

Харківський національний автомобільно-дорожній університет


Механічний факультет


Кафедра технології металів і матеріалознавства ім. О. М. Петриченко

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

магістра

**ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ МІЖШАРОВИХ З'ЄДНАНЬ  
ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ В ТЕХНОЛОГІЯХ FDM-ДРУКУ  
І ПОСТ-ОБРОБЛЕННЯ ВИРОБІВ**

Завідувачка кафедри, д-р техн. наук, проф.  Діана ГЛУШКОВА

Нормоконтролер, канд. техн. наук, доц.  Юрій ДУДУКАЛОВ

Керівник, , канд. техн. наук, доц.  Юрій ДУДУКАЛОВ

Студент гр. МС-61-24



Ярослав ЧОРНИЙ

Харків – 2025

# ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет механічний  
Кафедра технології металів і матеріалознавства ім. О.М. Петриченко  
Освітній рівень другого (магістерського)  
Спеціальність G8 Матеріалознавство  
Освітня програма «Матеріалознавство»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувачка кафедри



\_\_\_\_\_ Діана ГЛУШКОВА

« 11 » жовтня 2025 року

## **З А В Д А Н Н Я НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ**

Чорному Ярославу Руслановичу

1. Тема роботи: «Підвищення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку і пост-оброблення виробів»

Керівник роботи Дудукалов Юрій Володимирович, канд. техн. наук, доцент.

Затверджені рішенням Вченої ради механічного факультету 8 жовтня 2025 року протокол № 155.

2. Строк подання студентом кваліфікаційної роботи 08.12.2025 р.

3. Вхідні дані до роботи: звіт по переддипломній практиці, робочі креслення деталей, технічні умови на продукцію.

4. Перелік питань, які потрібно розробити: 1 Стан питання. Літературний огляд та патентно-інформаційний пошук 2 Методики експериментальних досліджень. 3 Забезпечення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку. 4 Охорона праці і безпека в надзвичайних ситуаціях. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень): Ілюстративний матеріал до кваліфікаційної роботи магістра (14 слайдів).

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 11 жовтня 2025 р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Стан питання. Літературний огляд та патентно-інформаційний пошук	20.10.2025	
2	Методики експериментальних досліджень	30.10.2025	
3	Забезпечення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку	10.11.2025	
4	Охорона праці та безпека в надзвичайних ситуаціях	20.11.2025	
5	Формування висновків по роботі. Оформлення кваліфікаційної роботи	25.11.2025	
6	Підготовка презентації і доповіді	1.12.2025	

Студент



Ярослав ЧОРНИЙ

Керівник роботи



Юрій ДУДУКАЛОВ

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота: 75с., 39рис., 7 табл., 1 додаток, 30 джерел.

ТЕХНОЛОГІЯ, МІЦНІСТЬ, FDM-ДРУК, МІЖШАРОВЕ З'ЄДНАННЯ, ПОСТ-ОБРОБЛЕННЯ, МОДИФІКУВАННЯ, ВИРОБ, ПОЛІМЕРНИЙ МАТЕРІАЛ, ЗНОСОСТІЙКІСТЬ

Мета роботи – підвищення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку і пост-оброблення виробів.

Об'єкт дослідження – ресурсозберігаючі адитивні технології виробництва і ремонту машин.

Предмет дослідження – способи модифікування полімерних матеріалів для зміцнення міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку і пост-оброблення виробів.

Задачі дослідження:

– виконати аналіз досягнутого рівня застосування адитивних технологій, можливостей існуючих методів 3D-друку та матеріалів, що можуть бути застосовані для виробництва і ремонту машин;

– провести експериментальні дослідження підвищення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів і визначити властивості полімерних матеріалів після модифікування.

Рішення даної проблеми відкриє можливості для виробництва і ремонту деталей машин на основі FDM-друку, забезпечить значне підвищення ефективності машинобудівних і машиноремонтних підприємств.

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Стан питання. Літературний огляд та патентно–інформаційний пошук.....	6
1.1 Технологічні можливості адитивного ремонтного виробництва..	6
1.2 Пост-обробка виробів 3D-друку.....	11
1.3 Полімерні матеріали для 3D-друк.....	17
1.4 Існуючі способи модифікування.....	23
2 Методики експериментальних досліджень.....	33
2.1 Підготовка зразків для дослідження.....	33
2.2 Установка для високочастотного імпульсного електромагнітного модифікування.....	37
2.3 Методики дослідження міцності.....	40
3 Забезпечення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-ДРУКУ.....	43
3.1 Застосування способу модифікація для підвищення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів.....	43
3.2 Дослідження впливу модифікування в процесі екструзії полімерних матеріалів.....	51
3.3 Аналіз методів пост- оброблення.....	57
4 Охорона праці.....	61
4.1 Визначення шкідливих та небезпечних чинників у лабораторії.	61
4.2 Аналіз небезпечних і шкідливих чинників на робочих місцях..	62
4.3 Організаційні заходи з охорони праці.....	67
4.4 Пожежна безпека.....	67
Висновки.....	70
Перелік посилань.....	71

## ВСТУП

На сьогодні адитивні технології є важливою перспективною галуззю в сучасному виробництві і ремонті. Поки ці технології займають невеликий відсоток у виробництві, проте часто використовуються для створення прототипів деталей [1]. За допомогою 3D друку виготовляється багато унікальної та індивідуальної продукції. Існує можливість врахувати особливості виробів, обрати оптимальні режими друку, щоб покращити якість деталі і скоротити час на її подальшу обробку.

Адитивне виробництво вже зараз використовується для виготовлення деталей чи механізмів. Здобутки останніх років дали змогу суттєво розширити номенклатуру матеріалів, що використовуються в 3D-друці. Таким чином в даний момент на ринку представлено три види принтерів, що друкують відповідно пластиками, фотополімерами, металами.

Так, для прототипування під час ремонту кузова автомобіля може використовуватися друк пластиком та фотополімерами. Нажаль отримати ідеальні поверхні та розміри деталі відразу після друку неможливо. На якість отриманих деталей впливає багато факторів, починаючи від налаштувань та режимів друку і закінчуючи особливостями матеріалів, впливом зовнішнього середовища.

До одного з найбільш актуальних технологічних трендів в даний час відносяться адитивні технології, в яких пошарове нарощування матеріалу відповідно до заданої комп'ютерної твердотільної моделі практично замінює традиційні процеси різання, пресування і штампування [2]. Основною перевагою даних технологій є пряме відтворення на основі твердотільної моделі виробу будь-якої складності без застосування складного інструменту і дорогого оснащення. При цьому можливо впровадження по індивідуальним замовленням без урахування серійності, як одного з найважливіших показників технологічності виробів.

У той же час, незважаючи на бурхливий розвиток зазначених

технологій, актуальною проблемою є недостатня міцність виробів особливо з полімерних і композиційних матеріалів, що одержані шляхом 3D друку, що стримує їх застосування в основному виробництві динамічних технічних систем, до яких відносяться транспортні засоби.

Перспективним рішенням даної проблеми є модифікування структури як основного, так і армованого матеріалу шляхом додаткових електрофізичних впливів, наприклад, в електромагнітному полі.

На підставі викладеного рішення питань підвищення міцності виробів, створених на основі адитивних технологій, являє собою важливу актуальну задачу наукового і практичного плану.

Мета роботи – підвищення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку і пост-оброблення виробів.

Об'єкт дослідження – ресурсозберігаючі адитивні технології виробництва і ремонту машин.

Предмет дослідження – способи модифікування полімерних матеріалів для зміцнення міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку і пост-оброблення виробів.

Задачі дослідження:

- виконати аналіз досягнутого рівня застосування адитивних технологій, можливостей існуючих методів 3D-друку та матеріалів, що можуть бути застосовані для виробництва і ремонту машин;

- провести експериментальні дослідження підвищення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів та і визначити властивості полімерних матеріалів після модифікування.

Рішення даної проблеми відкриє можливості для виробництва і ремонту деталей машин на основі FDM-друку, забезпечить значне підвищення ефективності машинобудівних і машиноремонтних підприємств.

# 1 СТАН ПИТАННЯ. ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ТА ПАТЕНТНО-ІНФОРМАЦІЙНИЙ ПОШУК

## 1.1 Технологічні можливості адитивного ремонтного виробництва

Перед ремонтним виробництвом завжди стояло актуальне питання спрощення і зниження вартості відновлення деталей для механізмів, приладів, виготовлення для заміни їх складових частин й водночас контроль якості продукції, покращення експлуатаційних та конструктивних характеристик. Існує декілька принципів за допомогою яких вирішується питання індивідуальної обробки або оптимізується виробництво в цілому, комплексно.

Основними варіантами для рішення цієї проблеми є використання прогресивних методів відновлення, котрі знижують вартість обробки, оптимізація технологічного процесу, зменшення кількості операцій і переходів, заміна робочих місць на автоматизовані, вибір нових методів отримання заготовки, поліпшення конструкції виробу.

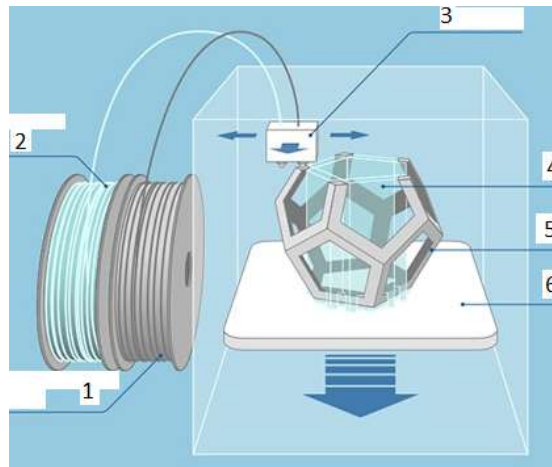
Ці методи дозволяють зменшити масу деталі, досягти підвищення її експлуатаційних характеристик. Одним із класичних варіантів зниження маси виробу, вузла є спрощення їх конструкції, зменшення кількості окремих деталей і елементів їх з'єднань.

Проте часто такий спосіб приводить до суттєвого підвищення складності конструкції, що приводить до ускладнення технології виготовлення таких деталей.

Адитивні технології дозволяють отримати пошарове нарощування або іншими словами – 3D-друк [3]. Сьогодні використання 3D-друку полягає в розповсюдженні методом виробництва прототипів та невеликих серій складних виробників. Ця технологія розділяється на велику кількість підвидів. Однак усі вони працюють за одним принципом – пошарового

нарощування. Найбільш розповсюдженими на сьогодні є Fused Deposition Modeling метод адитивного виробництва.

Fused Deposition Modeling (FDM) або в перекладі українською моделювання методом наплавлення – є найбільш розповсюдженою технологією 3D-друку. Зазвичай під терміном «3D-друк» мають на увазі друк за допомогою FDM (рис. 1.1).



- 1 – котушка з матеріалом моделі; 2 – котушка з матеріалом підтримки;  
 3 – екструдер; 4 – матеріал підтримки; 5 – виріб в процесі побудови;  
 6 – платформа для побудови

Рисунок. 1.1 – Схема процесу пошаровим укладання розплавленої полімерної нитки (FDM)

Технологія набула великого розповсюдження з декількох причин [4]. По-перше, це одна з найперших запатентованих технологій зв'язаних з адитивним виробництвом і 3D-друком. По-друге, за принципом друку вона є найпростішою, зібрати 3D-принтер для друку може кожен, хто має відповідні інженерні знання. По-третє, відносна дешевизна технології дозволяє знайти готові комерційні рішення в будь-якій цінній категорії. По-четверте, на ринку представлено широкий вибір марок пластиків для 3D-друку, що дозволяє обрати матеріал, який найкраще підходить вимогам до готової моделі.

FDM-технологія володіє наступними перевагами: отримувані вироби є досить міцними і зносостійкими; вартість матеріалів є низькою; більшість

недоліків друку (крім критичних типу розшарування моделі) можна виправити на етапі подальшої обробки деталі; використовувані матеріали досить просто обробляти, обробка не потребує спеціалізованого обладнання. До основних недоліків відносять: низьку точність друку в межах від 0.1 мм до 0.2 мм.

В порівнянні з іншими видами 3D-друку для більшості деталей необхідна чистова обробка при отриманні заданих параметрів поверхонь.

Для FDM-друку найбільш розповсюдженими є такі види пластиків [5].

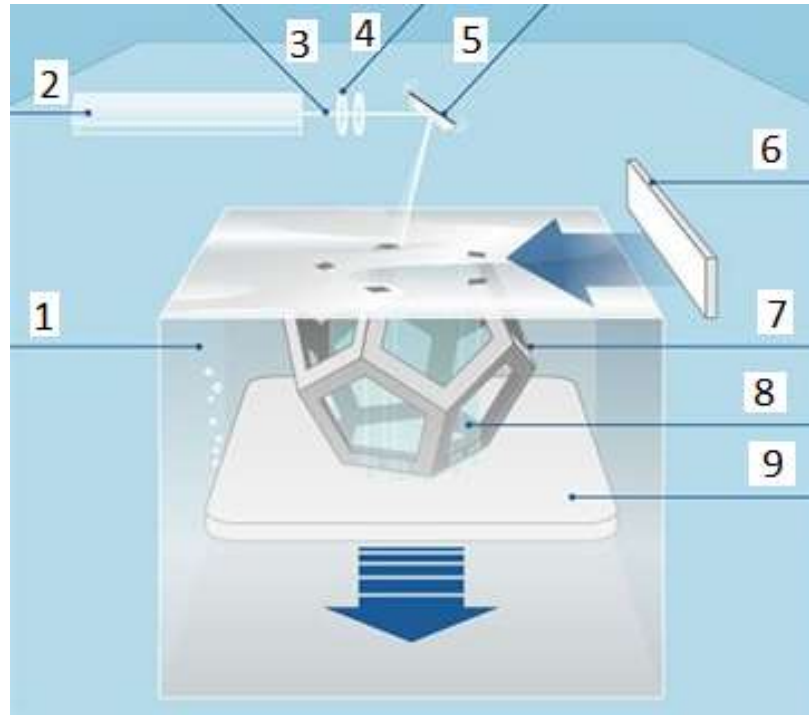
ABS характеризується високими показниками міцності готових виробів, проте для друку вимагає використання столика з підігрівом, адже досить швидко застигає, також бажано використовувати захисні кожухи на корпусі принтера для запобігання різкого зонального охолодження друкованої моделі.

PLA характеризується низькою температурою плавлення і довшим періодом застигання ніж STL, відповідно не потребує додаткового підігріву, має низьку міцність.

PVA – на відміну від пластиків описаних вище, використовується для друку підтримок, розчинний у воді.

Також популярною є Stereo-lithography (SLA або STL) в перекладі українською стереолітографія – ця технологія була запатентована у 1984 році Чаком Халлом, й фактично є першою запатентованою технологією 3D друку. Для друку тут використовується рідкий фотополімер, який застигає під дією лазерного випромінювання [6]. Матеріали і принтери, що використовуються SLA технологією набагато дорожчі, ніж для FDM-друку. Використання лазерних систем вимагає набагато вищих навичок оператора, підвищує небезпеку використання. Принцип роботи цієї технології зображений на рис. 1.2 і полягає в наступному. У ванну з рідким полімером вміщується платформа і занурюється на певну глибину, таким чином, щоб відстань від поверхні цієї платформи до поверхні рідкого полімера становила задану товщину шару матеріалу. Далі лазер за допомогою системи

наведення, що керована спеціалізованим управлінням, взаємодіє із полімером, викликаючи тим самим його затвердіння в заданих точках поверхні.



1 – рідина фото полімеру; 2 – лазер; 3 – лазерний промінь;  
4 – лінзи; 5 – X-Y скануюче дзеркало; 6 – свіпер; 7 – виріб;  
8 – підтримки; 9 – платформа для побудови

Рисунок 1.2 – Принцип роботи SLA технології

Після цього платформа опускається на відстань одного шару вниз, свіпер розрівнює поверхню фотополімеру отримуючи при цьому зайвий шлак, процес повторюється до тих пір поки модель не буде повністю виготовлена .

До переваг цього методу можна віднести: виготовлення деталей будь-якої складності, в тому числі тонкостінні деталі і деталі малого розміру; висока точність побудови, висока якість поверхні; властивості використовуваних полімерів дозволяють використовувати отримані зразки одразу після виготовлення; набагато більший розмір робочої камери ніж у інших видів принтерів; низький відсоток витрати матеріалу на підтримки. До

недоліків технології відносять: неможливість використання декількох матеріалів одночасно; висока вартість матеріалів і устаткування; низька кількість використовуваних матеріалів; високий час друку моделей.

## 1.2 Пост-обробка виробів 3D-друку

Подальша обробка (пост-обробка) виробів 3D-друку може покращити їх якість і підвищити міцність. Найбільш поширені такі методи пост-обробки полімерних матеріалів (рис. 1.3).



Рисунок 1.3 – Послідовність виконання 3Д-друку

Існує багато інформації та порад щодо пост-обробки 3D-друків, які можна розділили на дві категорії:

- доопрацювання виробу, прибирання технологічних додатків і підготовка до використання;
- фінішна обробка з естетичних вимог.

Пост-обробка включає методи очищення та підготовки, видалення опори та шліфування. Залежно від застосування предмета, ці прийоми зазвичай є першими кроками в пост-обробці.

### 1.2.1 Видалення підтримки

Видалення опори є найосновнішою формою пост-обробки. Зазвичай видалення опори не вимагає особливих зусиль, якщо тільки опори не стоять у вузьких кутах або в інших важкодоступних місцях [7]. Залежно від того, з чого вони зроблені, носії можуть бути нерозчинними або розчинними (розчинними у воді чи іншій рідині). Нерозчинні опори виготовлені з того ж матеріалу, що і основна частина. 3D-принтери FDM з одним екструдером можуть використовувати лише цей тип опори, оскільки деталь та її опори будуть надруковані з однієї катушки нитки. Видалення нерозчинних опор зазвичай виконується клацанням пальцями або зрізанням плоскогубцями. Якщо вам пощастить мати доступ до 3D-принтера з двома екструдерами, ви зможете використовувати розчинні опори. У той час як нерозчинні підкладки може бути дуже складно видалити у важкодоступних місцях, розчинні підкладки можна просто розчинити, замочивши деталь у воді або іншій рідині, не залишаючи майже ніяких слідів чи залишків. Двома найпоширенішими матеріалами для розчинних опор є HIPS і PVA. HIPS використовується з ABS і розчиняється в D-лімонені, тоді як PVA чудово підходить для PLA і розчиняється у воді.

Переваги: не потрібне спеціальне обладнання, розчинні опори забезпечують гнучкість конструкції.

Недоліки: навіть при обережному знятті опори можуть залишити сліди.

Якщо опори є конструктивно необхідними, то вони не покращують зовнішній вигляд.

### 1.2.2 Шліфування

Шліфування є найпоширенішою формою подальшої обробки. Як правило, FDM 3D-друк може мати трохи шорстку поверхню, і шліфування є найпростішим способом її згладжування. Після друку на поверхні деталі може залишитися кілька плям або неприємні сліди можуть залишитися після видалення опор. Ідеальним способом видалення таких плям є використання

наждачного паперу. Завжди краще починати з наждачного паперу з низькою зернистістю (150-400) і переходити до наждачного паперу з більшою зернистістю (до 2,0) за кілька етапів шліфування. Кілька ключових прийомів шліфування – це вологе шліфування та кругові рухи. Під час шліфування деталі тертя між наждачним папером і поверхнею виділяють тепло, що може негативно вплинути на тонкі риси друку, особливо з чутливим філаментом.

Переваги: якісна техніка підготовки перед поліруванням або фарбуванням, вирівнює поверхню, полімерні матеріали FDM можна шліфувати.

Недоліки: трудомісткість, складність з дрібними елементами та деталями, втрачається точність розмірів.

### 1.2.3 Зварювання

Якщо 3D-друк великих об'єктів за допомогою ABS, а об'єм 3D-принтера обмежений, то використовується зварювання. Це умовна назва, і не має спільного з металами. У 3D-друці FDM зварювання означає з'єднання деталей з ABS за допомогою ацетону. Ацетон має здатність розплавляти ABS, тому такі деталі можна з'єднувати за допомогою зварювання ацетоном.

Переваги: міцне з'єднання, недорого, низький рівень кваліфікації.

Недоліки: зварний шов ослаблює конструкцію, ацетоном зварюється тільки ABS пластик.

### 1.2.4 Склеювання

Зварювання є методом з'єднання кількох надрукованих на 3D-принтерах деталей з ABS. Для інших матеріалів з'єднання виконується склеюванням. Подібно до зварювання, це зазвичай використовується, коли щось не може бути надруковано через обмеження розмірів принтера. PLA і PETG є прикладами матеріалів, які можна склеїти разом за допомогою

сполучних агентів, таких як суперклеї, або спеціальних продуктів, таких як 3D Gloop.

Переваги: філамент з різних полімерів (PLA, PETG), недорого, не трудомісткий.

Недоліки: міцність низька, деталі слабкі в місці склеювання.

### 1.2.5 Згладжування

Згладжування – популярна техніка пост-обробки, особливо для друку з АБС. Ацетон має здатність розплавляти АБС і, отже, згладжувати лінії шару, видимі на поверхні деталі (рис. 1.4).



Рисунок 1.4 – Згладжування

Найпростіший спосіб – налити ацетон у велику ємність (рекомендується скляна), а потім помістити відбитки на платформу над ацетоном. Пари розплавляють зовнішній шар деталей. Також можна нанести невелику кількість ацетону пензликом на поверхню 3D-принтів. Але пари можуть бути шкідливими при вдиханні, викликаючи подразнення та інші негативні наслідки.

Для PLA згладжування не можна зробити за допомогою ацетону, оскільки він не плавить його. PLA можна згладити за допомогою хімічних

речовин, таких як THF або MEK, але результати будуть не найкращими, ніж ABS, згладжений ацетоном.

Переваги: гладка і блискуча поверхня, ацетон порівняно дешевий, швидко досягається результат.

Недоліки: ацетонове згладжування можливе лише для відбитків з ABS, точність розмірів може бути порушена, ризик деформації для великих відбитків.

### 1.2.6 Полірування

Ця техніка пост-обробки 3D-друку використовується для досягнення максимально гладкої поверхні. Полірувати 3D-принти можна за допомогою пластикових полірувальних машин та інструментів, доступних майже в кожному господарському магазині (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Відполірований корпус камери

Серветка з мікрофібри і пластикова полірувальна машина – це потрібно для полірування. Але перш ніж полірувати деталь, її потрібно належним чином відшліфувати тонким наждачним папером. Після шліфування промити і перевірити, щоб не залишилося частинок. Якщо ви використовуєте тканину, нанесіть полірувальний засіб на відшліфовану частину та переміщуйте тканину круговими рухами.

Переваги: створює гладку дзеркальну поверхню, недорого.

Недоліки: точність розмірів може бути порушена, потрібна середній рівень кваліфікації.

### 1.2.7 Епоксидне покриття

Епоксидне покриття 3D-принтів покращує міцність, може запечатувати пористі частини відбитка та виступати в якості захисного шару в цілому. Епоксидне покриття складається з двох різних хімічних речовин: самої епоксидної смоли та затверджувача. Співвідношення затверджувача та смоли має бути правильним, щоб досягти хороших результатів.

Переваги: підвищує міцність деталі, створює міцний захисний шар.

Недоліки: лінії шару не зникнуть повністю.

### 1.2.8 Гальваніка

Гальванопластика — це процес нанесення металевого покриття на інші метали або деталі з електропровідною поверхнею. Це техніка пост-обробки, яка може значно покращити міцність і візуальний вигляд (рис. 1.7). Гальваніка – це, в основному, перенесення металевого покриття з одного металу на інший (або деталь із електропровідною поверхнею).

Гальванопластика можлива завдяки хімічному процесу, який називається електролізом. Двома основними інструментами для електролізу є джерело живлення (акумулятор або випрямляч) і електроліт. Електроліт – це суміш солі металу, кислоти та води. Електричний струм необхідний для початку реакції між катодом, підключеним до негативного полюса джерела струму і анодом (позитивний полюс). Анод виготовляється з металу, який використовується як покриття, а частина, яку потрібно покрити, діє як катод. Оскільки надруковані на 3D-принтері деталі пластикові та не проводять

струм, потрібно буде належним чином відшліфувати їх і нанести струмопровідну фарбу перед тим, як робити гальванічне покриття.

Переваги: деталі стають міцнішими та провідними, точність розмірів не буде порушена, візуальний вигляд покращено.

Недоліки: потрібен високий рівень кваліфікації та засоби безпеки (рукавички та окуляри).

### 1.3 Полімерні матеріали для 3D-друку

ABS-пластик – найпоширеніший матеріал для 3D - друку, в основному, через свою дешевизну (ABS -пластик коштує приблизно в два рази дешевше свого головного конкурента – PLA -пластику). Втім, цей пластик для 3D-прінтера має також інші приємні особливості: він удароміцний і разом з тим еластичний, вологостійкий, нетоксичний, стійкий до впливу лугів, масел і миючих засобів, і може витримувати, нагрів до 100°C. До того ж, він може бути підданий переробці, тобто, при необхідності його можна використовувати повторно [7].

PLA-пластик. Цей матеріал відноситься до категорії біопластмас, оскільки основними ресурсами для його виробництва є кукурудза і цукровий очерет. Поряд з його безпекою (поліактид не токсичний), це є головною перевагою цього матеріалу. У порівнянні з ABS, цей пластик має більш високу температуру плавлення (близько 190°C), а значить процес друку з його використанням менш енерговитрат. З мінусів цього матеріалу можна відзначити його недовговічність і дорожнечу.

PVA-пластик. Він же полівінілацетат. Фактично, цей пластик для 3D-прінтера є нічим іншим, як клеєм ПВА, добре знайомим нам ще зі шкільних часів. Правда, в цьому випадку мається на увазі його аналог в сухому стані, що знаходиться в формі гранул або нитки. На ринку цей матеріал з'явився набагато пізніше, ніж PLA (в 2012 році), так що судити про його переваги поки рано. Єдине, що можна зараз сказати – в силу своєї

розчинності в воді, він відмінно підходить для поділу декількох деталей. Наприклад, якщо ви друкуєте гайку, накручену на болт з використанням цього матеріалу, після завершення процесу друку ви можете опустити прототип в воду і таким чином легко зняти гайку.

Полікапролактон (PCL). Він же поліморф і протопласт. Відмінний матеріал для швидкого прототипування в силу своєї низької температури плавлення (близько 60°C) і досить високої міцності. Крім того, PCL абсолютно безпечний, а також здатний швидко розкладатися на нешкідливі компоненти (лікувальні капсули роблять якраз з полікапролактона).

SBS – це міцність, пластичність і термостійкість, які роблять з цього матеріалу лідера, якому часто надається перевага в інженерних і механічних додатках. Модуль пружності набагато менше, ніж у ABS [8, 9]. Тобто, надруковані деталі виходять більш гнучкими. Подовження при розриві більше 250%. Нитка, на відміну від ABS, не ламається, не кажучи про PLA, який найбільш крихкий з розглянутих матеріалів. SBS має гнучку структуру. Він не обломиться і не обірветься під час друку. Навіть якщо пруток в екструдер подається під кутом в 90 градусів. Матеріал прозорий (93% світлопропускання). Фарбування матеріалу дає дуже гарний ефект. SBS ідеально підходить для друку плафонів світильників, прототипів прозорою посуду, пляшок і т.д. Обробляється і розчиняється лімоненом, діхлорметаном, сольвентом.

Nylon 618 Taulman - спеціально розроблений для 3D друку, його відмітними особливостями є: добре сполучення з поверхнею, висока водонепроникність, опір розриву і можливість вбирати фарбу. Моделі, надруковані цим матеріалом, мають натуральний білий колір з прозорою поверхнею.

Пластик також легко можна забарвити, як до друку, так і після.

Переваги Taulman 618 Nylon:

taulman 618 Nylon виробляють в США;

найкраще використовувати при температурі 245 оС;

taulman 618 Nylon не випускає парів під час друку;  
відповідає вимогам Європейського Хімічного Агентства. У пластиці не міститься ніяких токсичних хімікатів;

моделі, надруковані нейлоном, завжди буде легко відрізнити від будь-якого іншого пластика.

Nylon 645 – новий матеріал від компанії Taulman 3D. Taulman 645 Nylon має неповторні характеристики. Очікувана межа міцності дорівнює 16,533 фунта на квадратний дюйм (114 МПа), стійкість на розрив – 120%. Taulman 645 Nylon має всі якості, що і Taulman 618 Nylon 3D, але з поліпшеними характеристиками. Рекомендована температура друку від 230 °C до 265 °C.

Переваги Taulman 645 Nylon:

taulman 645 Nylon виробляють в США;

позитивні сполучні властивості;

текстура поверхні;

створюють з матеріалу найвищого ступеню очищення;

– nylon 645 прозоріший, ніж Nylon 618;

taulman 645 Nylon відповідає вимогам Європейського Хімічного Агентства. У пластиці не міститься ніяких токсичних хімікатів [10].

LAYWOO-D3 - цей матеріал розроблений в Німеччині спеціально для 3D-друку [11]. LAYWOO-D3 є композитом переробленого дерева (40%) і безпечного сполучного полімеру. Термічна стійкість матеріалу подібна PLA і їм можна друкувати в інтервалі температур від 175 °C до 250 °C. Після друку він виглядає як виріб з дерева, пахне деревом і приємний на дотик, крім того ви можете різати, шліфувати і розмальовувати свої вироби так само як можна це робити з будь-якими дерев'яними об'єктами. Змінюючи температуру можна навіть надрукувати річні кільця як на дереві. При 180 °C на виході виходить світлий відтінок, а при 245 °C – темний. Характеристики:

майже нульова деформація;

під час друку можливо робити поверхню грубої, гладкою або чергувати;

можливо друкувати річні кільця;  
добре прилипає до платформи, не вимагає підігріватися платформи;  
рекомендована температура екструдера - від 185 ° C (для світлого кольору) до 245 ° C (темний колір);  
матеріал складається на 40% з дерева.

PVA поливінілацетат [12] – це розчинний у воді пластмасовий полімер, який може використовуватися для друку підтримуючих опор для PLA і ABS об'єктів, який легко розчиняється в теплій воді, залишаючи прекрасну поверхню об'єкта і спрощуючи процес видалення опор (зазвичай досить виснажливий). Температура друку - приблизно 170 °C і ніколи не повинна перевищувати 200 °C.

HIPS - ударостійкий полістирол, пластмасова нитка, розчиняється в лімонені, іноді використовується для створення структур підтримки (особливо для ABS), які можуть бути легко видалені без механічного впливу. Лимонен - природний розчинник, який отримують з кірки лимонів та інших цитрусових. Температура друку HIPS приблизно 230 °C.

PET (поліетилентерефталат) являє собою безбарвну нитку з дуже високим рівнем прозорості. Матеріал легкий і ударостійкий. Може створювати унікальні моделі – прозорі, як скло.

Характеристики:

для друку використовуються настройки аналогічні налаштувань PLA;  
рекомендується температура друку 210 – 220 °C;  
температура платформи 65 °C;  
швидкість друку 20 – 40 мм/с;  
температура скловання 60 °C;  
густина 1,38 кг/дм<sup>3</sup>.

Laubrick – це нитка з ефектом пісковика для 3D-друку кам'яних поверхонь, блоків замків і середньовічних стін, імітації каменів при створенні 3D-друкованих ландшафтів і т.д. Laubrick – «кам'яна» нитка, може відтворювати як гладкі, так і шорсткі поверхні.

При збільшенні температури до 195 °С, 3D-надрукований елемент набуває дуже реалістичний ефект зернистості, властивий пісковіку.

Переваги:

деформація матеріалу практично нульова;

краска лягає на цей матеріал дуже добре;

має в своєму складі натуральні мінеральні матеріали (крейда і сополієфір);

при температурі від 165 до 190 °С 3D-надрукована поверхня гладка, при підвищенні температури до 210 °С – шорстка;

діаметр нитки 3мм / 1.75мм.

T-Glase [13]. Компанія Taulman3D випустила новий продукт. Низькотемпературний, високоміцний індустріальний пластик «t-glase» для використання в 3D друку. «T-glase» - це скорочення від tough glass (міцне скло), спеціально створений матеріал для користувачів, які зазвичай друкують PLA пластиком або використовують низькотемпературні настільні 3D принтери. Taulman t-glase отриманий з найсильнішою комбінації полімеру PETT, доступною на ринку. Taulman t-glase частина матеріалів Taulman. На відміну від досить гнучкого нейлону, t-glase досить жорсткий матеріал. Taulman t-glase поставляється прозорим, що є натуральним кольором цього типу полімерів. Підводячи підсумок, можна сказати, що пластик t-glase дуже чистий, міцний матеріал і при цьому дуже легкий. Так само, як і PLA пластиком, t-glase використовується при більш низьких температурах. Оптимальна температура приблизно 212 °С – 224 °С. Проте, може використовуватися в діапазоні від 207 °С до приблизно 235 °С. Цим матеріалом можна легко друкувати на акрилових, скляних, термострічці Karton та інших друкованих столах. Він мало схильний до деформації, що робить його чудовим матеріалом для того, щоб надрукувати великі об'єкти, t-glase друкує без будь-яких ароматів або парів. Taulman t-glase поставляється в котушках по 450 грам. Переваги Taulman t-glase:

високоміцний пластик;

t-glase можливо повністю переробити після використання, хоча не є біорозчинним матеріалом, як PLA (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Термопластичні полімерні матеріали для 3D-друку

Позначення матеріалу	Характеристика
ABS	Пластик дуже міцний і ударостійкий, легко шліфується, обробляється, стійкий до високих температур, добре підходить для друку з'єднань деталей. Найбільш популярний і доступний пластик на ринку.
ABS+	Завдяки вдосконаленій формулі підходить для друку при температурах нижче, ніж звичайний ABS. З ABS+ не буде проблем прилипання до столу, деламінації та деформації виробу.
coPET	Ідеальне рішення для друку прозорих і напівпрозорих виробів і запчастин. Має підвищену удароміцність і глянцеvu поверхню, піддається згинанню без тріщин. Понижена усадка в порівнянні з ABS.
HIPS	Відмінно підходить для 3d-друку підтримок завдяки розчиненню в лімонені.
PC	Для друку технічних виробів, для яких важлива гранична ударостійкість і міцність.
PLA	Для друку виробів з підвищеною деталізацією. PLA – біорозчинний полиефір, тому є одним з самих екологічно чистих пластиків.
Plastan	Інструмент для швидкого та якісного прототипування завдяки високій пластичності.

Так, АБС-пластик коштує приблизно в два рази дешевше свого головного конкурента - ПЛА-пластика. ПЛА-пластик відноситься до категорії біорозчинних пластмас, оскільки основними ресурсами для його виробництва є кукурудза і цукровий очерет. Нетоксичність поліактіду є головною перевагою даного матеріалу. Як видно з огляду, список полімерних матеріалів, використовуваних для 3D-друку, досить великий, який він

поступово поповнюється новими матеріалами, які, як у випадку з ПВА пластиком і полікапролактоном, можуть помітно розширити сферу застосування технологій 3D друку.

#### 1.4 Існуючі способи модифікування

Властивості ПКМ визначаються характеристиками матриці та наповнювача. У першому випадку одержують ізотропний матеріал із достатньо високими адгезійними й когезійними властивостями відносно вихідної (ненаповненої) матриці [13]. За відсутності специфічних взаємодій олігомера з поверхнею неактивного наповнювача молекулярна рухливість від його природи майже не залежить [14]. Але введення навіть невеликої кількості (до 1%) дрібнодисперсних наповнювачів може суттєво змінити фізико-механічні властивості композитів. Одним з ефективних шляхів підвищення експлуатаційних характеристик композитів є застосування високочастотного електромагнітного імпульсного поля (ВЕІП) і ультразвукового оброблення (УЗО).

Також способи модифікування класифікуються по глибині перетворення (рис. 1.6) і по стадії на якій виконується процес (рис. 1.7)

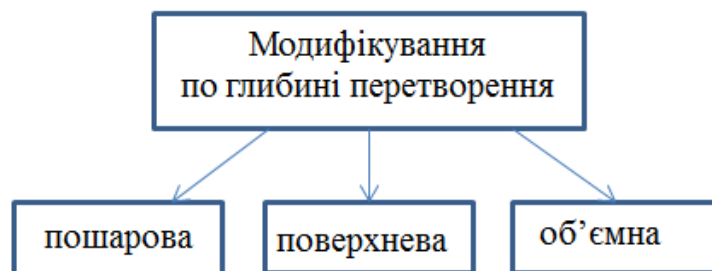


Рисунок 1.6 – Класифікація способів модифікування по глибині перетворення

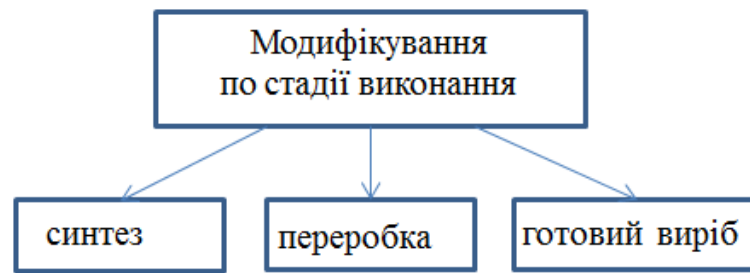


Рисунок 1.7 – Класифікація способів модифікування по стадії виконання

При цьому важливим є передача потужного імпульсу протягом короткого проміжку часу, що значно пришвидшує взаємодії у системі «адгезив – субстрат» [15, 16]. Існує три методи формування адгезійних з'єднань із використанням коливань високої інтенсивності: на стадії формування адгезиву; на стадії нанесення адгезійної маси на матеріал; із попереднім нанесенням адгезиву, склеюванням поверхонь і передачею енергії крізь матеріал самої деталі. ВЕП та УЗО забезпечують краще зшивання поверхневих шарів матриці й зменшення (до 2 %) повітряних включень, що суттєво підвищує когезійні характеристики композиту [17].

Доведено перспективність нановуглецевого модифікування реактопластичних композиційних матеріалів на основі епоксидних олігомерів за ефективних концентрацій нановуглецевого наповнювача [18]. Проте дані про ефективний вміст наповнювача різняться досить суттєво.

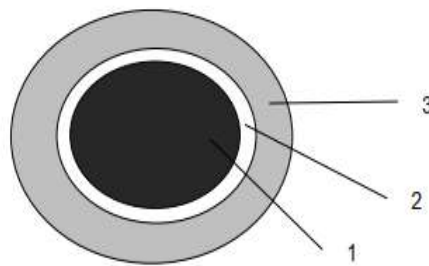
У сфері створення інтелектуальних полімерних композиційних матеріалів (ІПКМ) слід відзначити вчених. Ними розроблено дослідну технологію формування ІПКМ, зокрема, шляхом введення в конструкційний матеріал сенсорних елементів на основі оптичних волокон із брегівськими ґратками. Це дозволяє здійснювати моніторинг напружено-деформованого стану конструкції під час її експлуатації. Одержано дослідні зразки ІПКМ і розроблено технологію виготовлення лонжеронів. Згадані та інші

напрацювання потребують продовження й доповнення, особливо в частині створення сучасних композицій і відповідальних виробів із них.

ПМ являють собою гетерогенні системи, що складаються з двох або більше компонентів, що розрізняються за хімічним складом, фізико-механічними характеристиками і розділених в матеріалі чітко вираженим кордоном, причому одні з компонентів є армуючими складовими, а інші - сполучними їх матрицями [19].

Основне призначення наповнювача (рис. 1.8) - армувати, тобто зміцнювати матрицю, надавати матеріалу необхідні спеціальні властивості і зменшувати вартість деталі. Від властивостей наповнювача практично повністю залежать: межа міцності при розтягуванні, модуль пружності, твердість, коефіцієнт тертя, зносостійкість, теплопровідність, електричні і акустичні властивості. У «ідеальному» випадку наповнювач повинен мати наступні властивості:

- великий модулем пружності (чим більше, тим краще);
- гарну адгезію до зв'язуючого, що використовується (більше 20 МПа).



1 - наповнювач; 2 - міжфазовий шар;

3 - матриця (зв'язуюче)

Рисунок 1.8 – Найпростіша схема ПКМ

Вибір наповнювача визначається наступними факторами:

- передбачуваної технологією формування;
- призначенням деталі і її експлуатаційними властивостями;

- геометричними особливостями і масою деталі;
- економічними факторами.

Основне призначення зв'язуючого (сполучного) (рис. 1.9) – пов'язувати між собою наповнювач, забезпечувати спільну роботу всіх моноволокон (або часток, якщо використовується дисперсний наповнювач), забезпечити монолітність матеріалу і передачу (розподіл) напруг. Від властивостей сполучного практично повністю залежать: тепло- і термостійкість, стійкість до дії різних робочих середовищ (вода, пар, паливо, масла та ін.), ударна в'язкість, ударна міцність, стійкість до тривалого впливу знакозмінних навантажень, повзучість, релаксація напружень (рис. 1.9).

Після затвердіння (для термореактивних матеріалів) або застигання (для термопластичних) сполучна перетворюється в матрицю. Матриця являє собою безперервну фазу, товщина шару якої може змінюватися від 1 мкм до 1000 мкм [20].

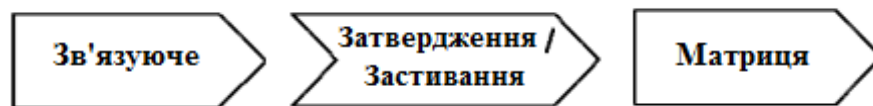


Рисунок 1.9 – Схема процесу утворення ПКМ

У «ідеальному» випадку сполучне (зв'язуюче) має володіти такими властивостями:

- деформаційні властивості матриці повинні бути не нижче, ніж у наповнювача  $\epsilon_M > \epsilon_N$ ;
- сполучне має мати великий модуль пружності ( $E > 2000$  МПа);
- сполучне має мати гарну адгезію до наповнювача ( $\tau_{ад} > 20$  МПа).

Вибір сполучного визначається наступними факторами:

- передбачуваної технологією формування;
- типом виробництва;
- геометричними особливостями і масою деталі;

– технологічними і експлуатаційними властивостями деталі.

Матриця і наповнювач повинні мати хорошу сумісність, але при цьому не повинні розчинятися один в одному. В одному матеріалі може бути кілька матриць або кілька типів наповнювачів.

Залежно від типу упаковок частинок наповнювача ПКМ можуть включати:

- наповнювач одного типу;
- кілька однотипних наповнювачів;
- волокна, що розподілені серед дисперсних наповнювачів.

Якщо в якості сполучного використовують суміші полімерів (або олігомерів), то такі сполучні називають гетерогенними, оліматрічними або гетероматрічними. Якщо в якості наповнювачів використовуються різні типи волокон або дисперсних наповнювачів, то такі матеріали називають гібридними.

Для оптимальної реалізації всього комплексу властивостей ПКМ необхідно забезпечення міцного взаємодії матриці і наповнювача по всій площі їх контакту. Властивості матеріалу на кордоні розділу матриця-наповнювач істотно відрізняються від властивостей кожного з цих компонентів. Цей шар отримав назву - міжфазовий шар (рис. 1.6) або межфазна зона. Його товщина зазвичай становить кілька атомів. Формування межфазної зони відбувається протягом певного часу, причому тривалість процесу залежить від в'язкості сполучного, його молекулярної маси, фізико-хімічних властивостей, швидкості його затвердіння, розмірів і структури пір в волокні і, нарешті, властивостей апрету [16-18]. Досить часто, міжфазовий шар є найбільш слабким місцем ПКМ, і саме по цій межі починається руйнування матеріалу.

Сили міжфазної взаємодії складаються з наступних сил (табл. 1.2):

- водневих сил (їх величина складає 4 – 50 Ккал / моль);
- адсорбційних (їх величина складає 10 – 15 Ккал / моль);
- донорно-акцепторних (їх величина складає 2 – 40 Ккал / моль);

– сил Ван-дер-Ваальсово взаємодії (їх величина 0,5 – 20 Ккал / моль).

Таблиця 1.2 – Середні значення міжмолекулярних сил

Тип зв'язків	Величина взаємодії, ккал / моль
Хімічний	300 – 800
Водневий	4 – 50
Донорно-акцепторний	2 – 40
Адсорбційний	10 – 15
Ван-дер-Ваальсовий	0,5 – 2

Діапазон зміни сил пов'язаний з особливостями будови конкретних пар матеріалів (пов'язує і наповнювача). Адсорбційні сили виникають в тому випадку, якщо полімерні молекули орієнтуються на поверхні частинок наповнювача, і виникає адсорбційний шар з підвищеними фізико-механічними характеристиками. Певна кількість наповнювача, для якої збільшення концентрації призводить до зростання ступеня структурування. Саме з цієї причини широке застосування знаходять методи підвищення активності поверхонь наповнювачів. Донорно-акцепторний зв'язок (так само як і хімічний і водневий) є одним з видів зв'язку з перенесенням заряду. Молекула, з якої має місце перехід електрона, називається донором (Д). Молекула, яка отримує електрон, – акцептором (А). Щоб такий перехід був можливий, вони повинні підійти досить близько один до одного. Спочатку між молекулами полімеру і наповнювача виникають дипольні взаємодії, потім дисперсійні, потім утворюються водневі зв'язки і тільки потім має місце донорно-акцепторне взаємодія.

Властивості ПКМ в значній мірі відрізняються від властивостей кожного з складових компонентів окремо. Композиційний матеріал може складатися з двох, трьох і більше компонентів. Розміри частинок вхідних компонентів можуть коливатися від сотих часток мікрометра до декількох міліметрів. Єдиної класифікації наповнювачів для полімерних матеріалів не

існує. За своєю природою наповнювачі поділяють на органічні та неорганічні, а за формою частинок – на порошкоподібні (дисперсні), сферичні (у вигляді порожніх мікросфер) і волокнисті. До органічних наповнювачів відносяться целюлоза, деревна мука, вугільна тканина, шунгіт і ін., До неорганічних – мелена слюда, кварцова борошно, графіт, азбест і ін. В якості наповнювачів використовують і газонаповнені мікросфери, які істотно знижують масу полімеру.

В чисельних дослідженнях вітчизняних и зарубіжних вчених [19–21], встановлені закономірності модифікуючого впливу високочастотного електромагнітного поля на різні діелектричні матеріали, в тому числі з прояви як діелектричного нагріву, так и нетеплових ефектів.

Однак, питання впливу високочастотного електромагнітного поля на структуру виробів з адитивних матеріалів до останнього часу не приділялось належної уваги. Також не розглянуті питання впливу високочастотного електромагнітного поля на матеріали, що складаються з компонентів з різними теплофізичними і діелектричними характеристиками, що має місце при армуванні вуглецевими композитами.

Відзначається [22], що високоміцні вироби формуються на основі технологій SLM з металевих и керамічних порошків, однак ці технології реалізуються на дорогому (500000 дол. і більше) обладнанні, матеріали також мають велику вартість.

Технології FDM і SLA істотно дешевше (вартість обладнання біля 1000 дол.), але вироби мають малу міцність и довговічність. Особливо важливою є нестійкість характеристик від деталі до деталі и від установки до установки. Отримані за даними технологіями матеріали відрізняються випадковою анізотропією властивостей и недостатньою міцністю в порівнянні з матеріалами, що одержані методами лиття, штампування, порошкової металургії.

Розробляються методи [23] підвищення міцності виробів з адитивних полімерних матеріалів шляхом застосування нових термопластів з

підвищеними фізико-механічними характеристиками (ПЕІ, ПЕЄК), створення композицій впровадженням частинок, коротких або довгих волокон, карбонових нанотрубок (УНТ-технології). Одним з перспективних методів підвищення міцності об'єктів адитивних технологій з полімерних матеріалів можна розглядати процес керованої укладки армуючого волокна по розрахунковій топологічній моделі навантаження [22].

Сучасне наукове співтовариство визнає необхідність модифікації існуючих полімерних волокон і матеріалів з них з метою надання їм додаткових експлуатаційних і технологічних властивостей. Модифікацію волокон проводять на різних етапах виробництва: під час синтезу полімеру; в процесі переробки полімеру в волокно або нитки; на стадії заключної обробки сформованого волокна або безпосередньо перед використанням готового волокна.

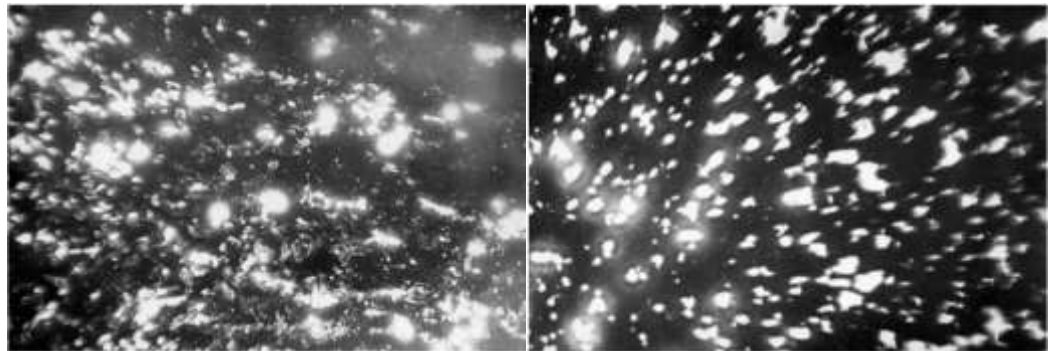
Хімічна модифікація означає спрямовану зміну хімічної будови шляхом сополімеризації при отриманні волокно створюючого полімеру або за допомогою введення додаткових функціональних груп (при обробці волокна, текстильного матеріалу або готового виробу).

В результаті виходить волокно з новими властивостями, такими, як з більш високою еластичністю, гідрофільністю і сорбційними властивостями.

Електромагнітна і ультразвукова обробка може бути використана для модифікації фізико-механічних властивостей полімерних волокон, збільшення їх хімічної і термічної стійкості. Може використовуватися в поєднанні з іншими методами електрофізичного модифікування. Наприклад, відомий спосіб збільшення змочуваності волокон за допомогою обробки їх коронним розрядом з наступним зануренням в 0,25% розчин тріетіленаміна в ізопропанолі з одночасним застосуванням ультразвукової енергії (35 кГц).

Але, незважаючи на переваги електромагнітної обробки (швидкість нагрівання, відсутність контакту з об'єктом обробки) її системи мають високий ступінь теплоємності, що може стати причиною деструкції полімеру.

Як відомо [24], при наповненні покриттів змінюється технологічний режим формування і їх властивості. Дослідження впливу зовнішнього магнітного поля на фізико-механічні властивості композиційних полімерних покриттів показали, що такі властивості, як розривна міцність покривної плівки і адгезійна міцність композиційних покриттів, отриманих на основі епоксидного олігомеру, різко відрізняються при обробці в магнітному полі в залежності від виду наповнювача при різній напруженості зовнішнього магнітного поля. Час обробки становить 1000 с. Для покриттів, наповнених діа- і парамагнітними наповнювачами, ефект нижче в порівнянні з покриттями з феромагнітними наповнювачами, а підвищення властивостей композиційних покриттів становить 25 – 35%. Ці факти свідчать про першорядну роль орієнтації структури для регулювання властивостей покриттів впливом магнітного поля (рис. 1.10).



а)

б)

збільшення  $\times 300$ 

а) – контрольна пластина ЕД-16 + залізний порошок;

б) – ЕД-16 + залізний порошок, що оброблений в магнітному полі

Рисунок 1.10 – Поверхневі структури композиційних полімерних покриттів, модифікованих в магнітному полі

Ефективні зміни досліджених властивостей в основному спостерігалися в покриттях, наповнених феромагнітними і парамагнітними наповнювачами. Композиційні покриття на основі епоксидного олігомеру, наповнені залізним порошком і  $\gamma$ -окисю заліза, при модифікуванні в

зовнішньому магнітному полі мають збільшення на 60–80% адгезійної міцності і міцності плівки на розрив в порівнянні з необробленим в магнітному полі. Ці зміни, як показало вивчення поверхневих структур покриттів (рис. 1.10), в основному викликані орієнтацією ферромагнітних наповнювачів уздовж силових ліній магнітного поля в об'ємі покриття.

При цьому певний внесок у поліпшення властивостей покриттів також вносить активізація процесів поляризації сегментів макромолекул, що призводять до поліпшення умов взаємодії на кордоні фаз наповнювач–сполучна і адгезив–субстрат, інтенсифікують процес зшивання термореактивних і кристалізації термопластичних зв'язуючих [24].

Дослідження показали, що при магнітній обробці полімерних покриттів найбільш високі значення їх фізико-механічних властивостей спостерігаються при введенні в них ферромагнітних наповнювачів або при поєднанні їх з діа- або парамагнітним наповнювачами, наприклад, залізний порошок – графіт або залізний порошок – тальк. Зміна властивостей композиційних покриттів при модифікуванні в магнітному полі в основному залежить від електромагнітних властивостей мінеральних наповнювачів.

## 2 МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

### 2.1 Підготовка зразків для дослідження

Процес 3D-друку починається зі створення 3D-моделі.

Для цієї мети існує програма 3D моделювання Fusion 360 (рис. 2.1).

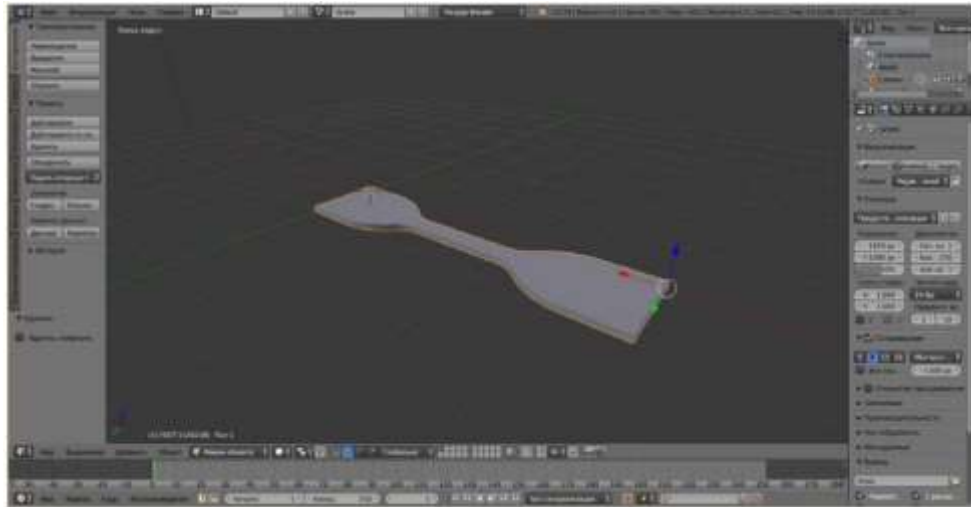


Рисунок 2.1 – 3Д-модель розривного зразка

Наступний етап - це слайсінг моделі, тобто нарізування її на шари і складання команд для 3d принтера. так само на цьому етапі задаються всі налаштування друку в тому числі: температура екструдера, температура столу, ширина однієї нитки вийшов з сопла, коефіцієнт заповнення, кількість периметрів і багато ін. на цьому етапі багато тонкощів. специфіка - коефіцієнт заповнення і кількості периметрів. 3d принтер може друкувати як цілісні деталі, так і полегшені: з порожнинами і перегородками всередині і зовнішньої стінки, ширина якої кратна ширині однієї нитки пластика, що вийшла з екструдера [22].

Кількість периметрів - цей параметр характеризує ширину стінки, підсумкова ширина обчислюється за формулою «ширина екструзії» × «кількість периметрів» = «ширина стінки». на рис. 2.2 представлена

ілюстрація на прикладі збільшеного в 2 рази зразка з двома і десятьма периметрами.

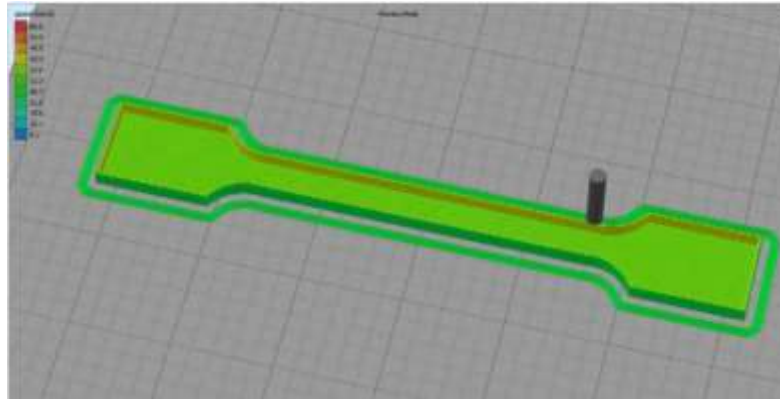
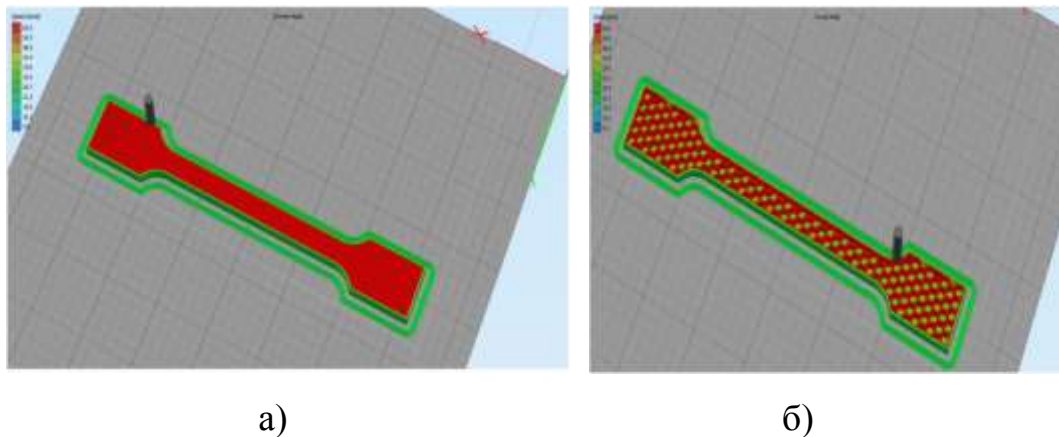


Рисунок 2.2 – Варіант периметру моделі

Коефіцієнт заповнення характеризує те, наскільки багато перегородок буде між стінками. 100% - цілісна деталь, 0% - тільки оболонка. нижче представлені скріншоти моделей деталей із заповненням 25% і 100%. 0% відсотків показано рис. 2.2. форма заповнення – правильний шестикутник (рис. 2.3).

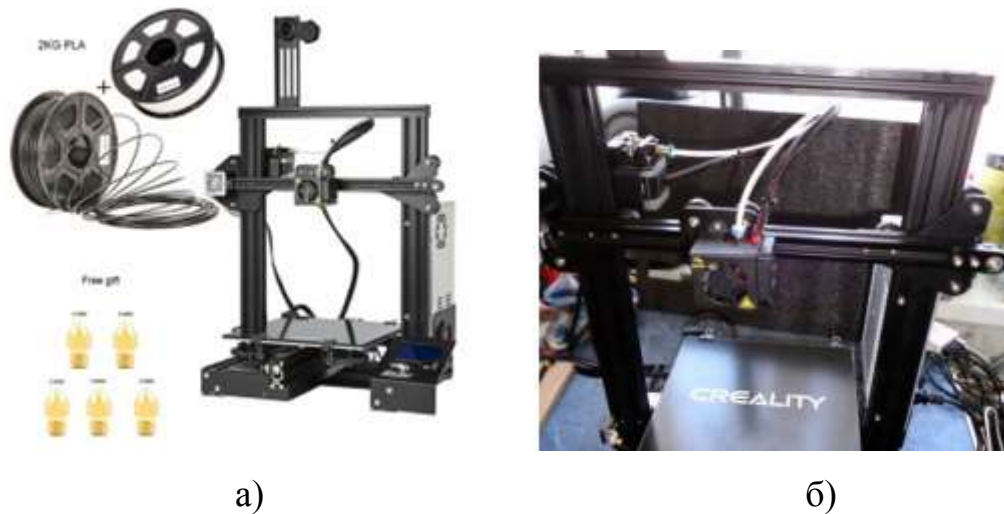


а) – коефіцієнт заповнення 100%; б) – коефіцієнт заповнення 20%

Рисунок 2.3 – Варіанти коефіцієнта заповнення

Зразки на випробування були виконані соплом 0.3 мм з 3 периметрами і 100% заповненням. У кваліфікаційній роботі застосовувався 3D принтер

моделі Ender 3Pro (рис. 2.4), він має кінематику  $xz$  – head,  $y$  – bed , екструдер без редуктора та електроніку на основі власної розробки фірми.



а) – загальний вигляд;

б – робоча зона принтера Ender 3Pro

Рисунок 2.4 – Принтер 3d-друку Ender 3Pro

Експериментальні зразки були отримані з ABS-пластику на 3D-принтері Ender 3Pro при наступних режимах друку: температура екструдера – 250 °С; швидкість друку 80 мм/с; коефіцієнт подачі пластика – 0,97; діаметр сопла екструдера – 0,3 мм; ширина нитки – 0,45 мм; висота шарів – 0,25 мм; температура столу першого шару – 115 ° с; температура столу інших шарів – 105 ° с.

Для того, щоб пластик надійно фіксувався на платформі, підвищують його адгезію до платформи. Роблять це нанесенням перфорованого покриття на стіл, лаком і підвищення його температури. Також підігрів столу допомагає зменшити ефект температурної усадки пластика, що не дає моделі загнути і відірвавшись від столу.

Моделі друкувалися перпендикулярно площині платформи, в повздожній укладці філаменту по довжині. А також вертикально, щоб сформувати поперечне розташування пошарових укладок. В процесі друку цих зразків виникала проблема – настільки високий і тонкий зразок не

встигав до\_кінця охолонути, залишався пластичний і відчував деформації навіть від руху по ньому сопла, що вело за собою зсув шарів відносно один одного. Але після складання трьох зразків в один пакет з'єднаний між собою з додатковими підтримками з боків, цей ефект був майже повністю виключений (рис. 2.5).

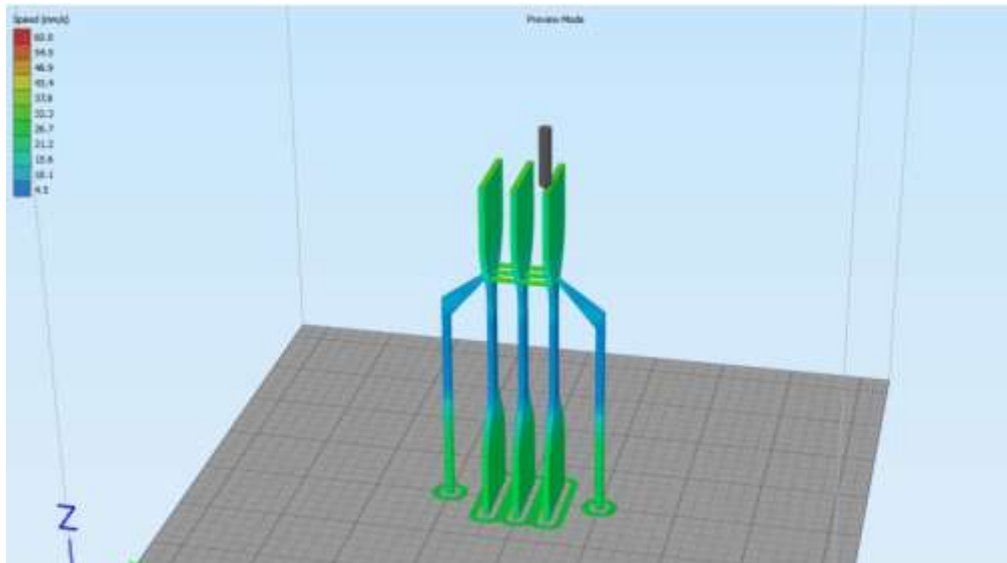


Рисунок 2.5 – Модель вертикального розташування зразків

На робочому столі 3D-принтера з підтримкою при підготовці моделей і проведенні пробних експериментів були відібрані наступні параметри, які можуть впливати на якість і точність деталей.

1. Ступінь заповнення (fill density), яка виражається відсотком заповнення структурами підтримки внутрішньої порожнини моделі.

2. Коефіцієнт екструзування (extrusion ratio), що дозволяє управляти інтенсивністю подачі матеріалу в друкувальну голівку принтера. цей параметр задає відношення реальної кількості матеріалу, що витрачається на один шар, до номінального. даний параметр задається у відсотках і становить від 80 до 125%.

3. Різні настройки, що визначають товщину (висоту) і кількість укладених шарів під час друку виробу.

4. Кількість проходів при побудові оболонки (тобто число проходів при побудові зовнішнього контуру виробу на кожному шарі). даний параметр впливає на товщину оболонки виробу - чим він вищий, тим більше оболонка.

5. Стандартні набори налаштувань якості друку (resolution), встановлені виробником принтера. Користувачеві доступні чотири зумовлених режиму якості друку: низька; стандартне; високе; найкраще. При виборі одного з режимів автоматично включається відповідний набір параметрів (товщина і кількість шарів, швидкість руху голівки під час робочих і холостих переміщень).

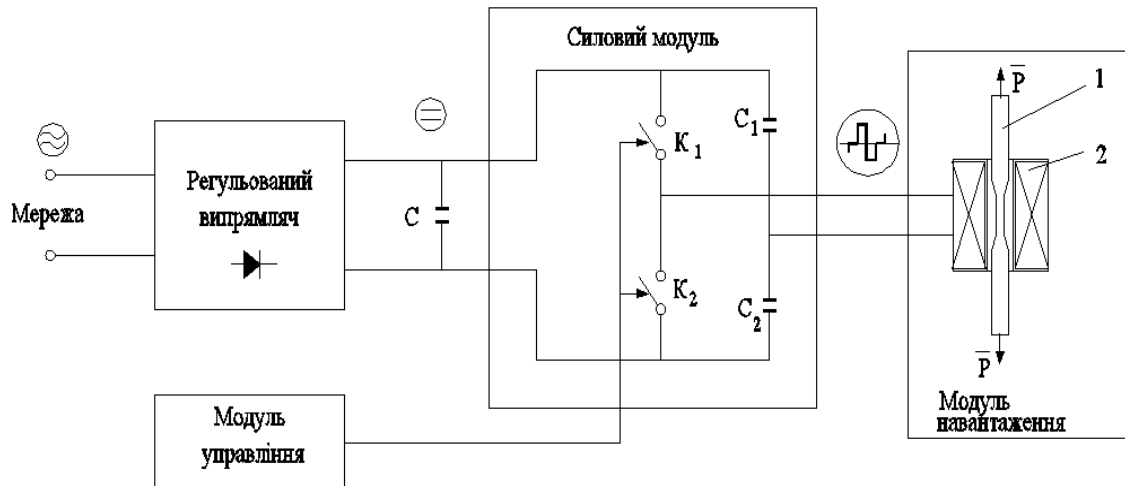
## 2.2 Установка для високочастотного імпульсного електромагнітного модифікування

Попередньо за результатами досліджень було встановлено [24], що серед великої кількості вхідних параметрів магнітної обробки як незалежно наповнювачів, так і композицій в цілому, домінуючими є час обробки інгредієнтів у полі індуктора та напруженість високочастотного імпульсного електромагнітного модифікування. Тому актуальним завданням на даному етапі досліджень є встановлення оптимальних режимів магнітного опромінення композицій для отримання матеріалів з поліпшеними когезійними властивостями.

Таке модифікування проводили з використанням спеціальної енергетичної установки. Імпульсна потужність випромінювання установки – до 3600 Вт. Встановлювали режими впливу високочастотного магнітного поля шляхом підбору дистанції до зразка і часу таким чином, щоб виключити термічні ефекти, особливо ймовірні при обробці зразків з армуючим вуглецевим композиційним матеріалом.

В якості джерела енергії для додаткового електромагнітного впливу на зону деформування пропонується спеціальний інвертор. Відомо, що по своїй дії інвертори представляють пристрої, як зворотні випрямлячі, тобто

перетворюють постійну напругу в змінну. Блок-схема напівмостового інвертора представлена на рис. 2.6.



1 – зразок з ПКМ; 2 – котушка намагнічення

Рисунок 2.6 – Блок-схема інвертора з модулем навантаження

Керуючі імпульси для верхнього плеча і нижнього плеча напівмоста узгоджені в часі (рис. 2.7).

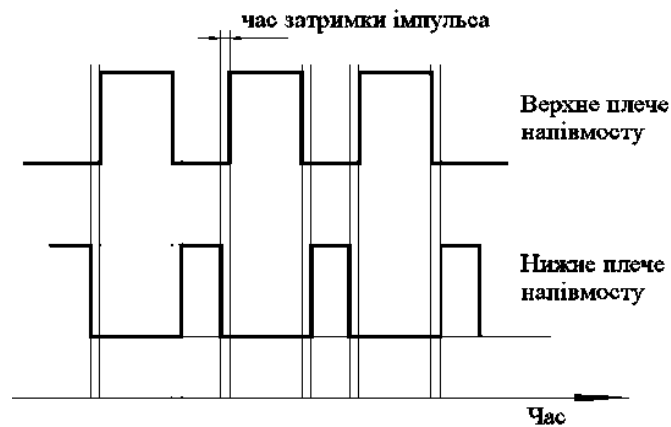


Рисунок 2.7 – Діаграми управляючих імпульсів

Відзначимо, що в тривалості управляючих імпульсів по плечах є проміжок часу, коли сигнали відсутні. Це інтервали часу затримки імпульсу (dead-time).

Основні складові цього інвертора: регульований випрямляч, модуль управління, силовий модуль і модуль навантаження. Вхідна мережа – напруга 220 В, промислова частота – 50 Гц. Вихідна напруга такого інвертора може бути як промислової частоти, так і підвищеної – десятки, сотні кГц і вище.

Одна з найважливіших переваг джерел живлення підвищеної частоти – це різке зменшення габаритних параметрів трансформаторів. Інший позитивний момент пов'язаний з тим, що силові елементи інверторів працюють в ключовому режимі, тобто основна частина втрат енергії відбувається лише в моменти перемикання.

Для цього в інверторі в якості ключів використовуються потужні польові транзистори з ізолюваним затвором MOSFET.

Технічна характеристика інвертора наведена в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Технічна характеристика інвертору

Показник	Значення показника
Застосування	Для створення електромагнітного впливу технологічного призначення
Вихідні параметри	Діапазони управління: – амплітуди напруги від 0 до 400 В, – амплітуди сили струму від 0 до 47 А, – робочих частот в діапазонах від 0,06 кГц до 1 кГц, від 0,6 кГц до 60 кГц, від 50 кГц до 3,0 МГц.
Управління	Плавне та високоточне по всьому діапазону частот
Форма імпульсу	Прямокутний меандр



Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд установка для модифікування високочастотними магнітними полями

Таким чином, сучасні швидкодіючі напівпровідникові ключі дозволяють істотно збільшити коефіцієнт корисної дії перетворювачів, наближаючи його для деяких конструкцій майже до 100%.

### 2.3 Методики дослідження міцності

Фізико-механічні властивості виробів, отриманих за FDM-технологій в даний час недостатньо вивчені і описані. Найпоширенішим методом друку пластиком є екструзійний метод (FDM-метод), що полягає в пошаровому наплавленні матеріалу. Популярність FDM методу викликана досить низькою вартістю принтерів і витратних матеріалів для друку. Крім того на велику поширеність даної технології впливає доступність комплектуючих для зборки FDM-принтерів [25].

Деталі, одержувані за FDM технології міцні, пружні, мають набір фізичних характеристик, що залежать від типу матеріалу. Однак, недостатня вивченість фізико-механічних властивостей виробів, отриманих 3D-друком стримує подальше поширення в виробництво FDM-технології. Дані за механічними властивостями, таких як межі міцності на розтяг, вигин,

стиснення, усадка і вага матеріалу необхідні для проектування раціональних конструкцій виробів, що виготовляються 3D-друком.

Дослідження, спрямовані на вивчення властивостей виробів отриманих 3D друком є актуальними. Для розширення області використання виробів, отриманих 3D друком по FDM-технології були визначені межа міцності зразків на розтягнення, отриманого за FDM-технологією.

Випробування зразків на розтягнення, вигин, стиснення здійснювалося на випробувальній установці UIT STM 050/300 (рис. 2.9). Визначалася межа міцності на розтяг [26]. Метою експериментальних досліджень було отримання залежності межі міцності на розрив зразка від структури поверхневого шару виробу з ABS пластику.

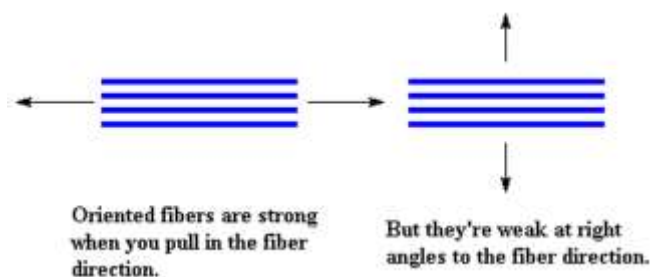


Рисунок 2.9 – Напрямки прикладання розривного зусилля на розривній машині UIT STM 050/300

Для випробування зразків матеріалів використовується машина UIT STM 050/300. Це сервопривідна випробувальна машина для проведення досліджень при середніх і високих навантаженнях. Можливе проведення випробувань нестандартних по формі зразків за різними стандартами і методиками, а також за індивідуальною програмою, що підготовлена дослідником. Точність процесу навантаження забезпечується конструкцією силової рами машини і прецизійною обробкою вузлів кульових пар. Управління випробуваннями здійснюється по комп'ютерним програмам.



Рисунок 2.10 – Розривна машина UIT STM 050/300

Межа міцності на розтягнення визначалася на розривній машині UIT STM 050/300. Швидкість випробування на розрив становила 5 мм / хв.

Розтягнення зразків є одним з основних видів механічних випробувань металів і полімерних матеріалів, їх з'єднань. Воно дозволяє виявляти їх важливі властивості та закономірності.

### 3 ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ МІЖШАРОВИХ З'ЄДНАНЬ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ В ТЕХНОЛОГІЯХ FDM-ДРУКУ

#### 3.1 Застосування способу модифікація для підвищення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів

Принцип роботи FDM-технології зображений на рис. 1.1. Цей метод заснований на тому, що термопластична полімерна нитка (філамент) подається в екструзійну головку 3D-принтера, в якій нагрівається до в'язкотекучого стану і видавлюється через сопло діаметром 0,1 – 0,3 мм по заданій траєкторії на нерухому підставу.

Наступні шари укладаються на попередні і тверднуть по мірі охолодження. При цьому пошарову орієнтацію укладання розплавленої полімерної нитки можна змінювати відповідно до обраного алгоритму, регулюючи анізотропію властивостей в кінцевому виробі або прототипі. Завдяки низькій вартості і високому рівню функціональних можливостей FDM-принтери і витратні матеріали для них в даний час є найбільш затребуваними на ринку адитивних технологій.

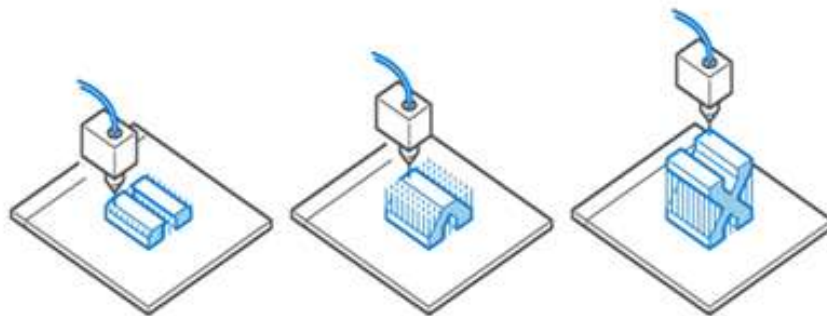


Рисунок 3.1 – Пошарове формування виробу

Для оцінки міцності виробів із ПКМ необхідним є визначення мінімальної кількості інтелектуальних датчиків для забезпечення можливості постійного отримання шуканої інформації.

Потрібну кількість інтелектуальних датчиків планується встановити експериментальним шляхом. Одночасно передбачається встановити ефективне співвідношення полімерної матриці, армувального макро наповнювача, наномодифікаторів [21, 23]. У цілому, варто дослідити:

- рецептури модифікованих, епоксидних композицій із заданим рівнем технологічних і фізико-механічних властивостей, призначених для одержання блочних термоосадних виробів, інших наномодифікованих ПКМ;

- конструктивно-технологічні параметри формувального устаткування та УЗ-засобів, ефективні режимні параметри фізико-хімічного модифікування термореактивних полімерів для отримання термоосадання;

- режими УЗ-кавітаційної технології термореактивних полімерів [24];

- методики визначення та введення потрібної кількості інтелектуальних датчиків для отримання достатнього рівня інформації про полімерні композиції й вироби із них;

- методики проектування елементів формувального устаткування на основі аналізу результатів досліджень поведінки реологічно складних середовищ у нестационарних процесах перероблення полімерів;

- методики уточненого моделювання тривимірного руху багатокомпонентних складних реологічних середовищ у робочих каналах складної геометричної форми;

- методику розрахунку міцності виробів, що дозволяє оптимізувати параметри їхнього виготовлення;

- технічні рекомендації з удосконалення конструкцій пластикаційних й формувальних пристроїв машин для зменшення впливу в'язкопружних властивостей композицій на форму й розмірну точність виробів на базі ПКМ.

Таким чином, визначено перспективні напрями досліджень для розроблення технології та обладнання для одержання модифікованих та інтелектуальних ПКМ, особливо для технологій 3Д-друку.

Забезпечення міцності полімерних матеріалів FDM-друку будується на врахуванні термомеханічних властивостей ПМ. Відомо, що при малих

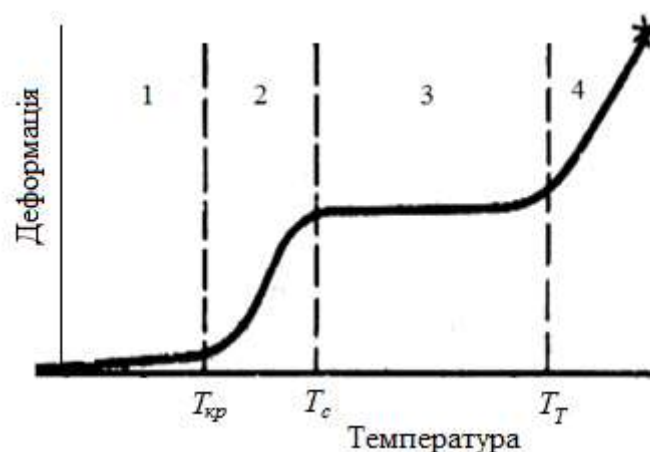
температурах полімер веде себе як скло, тобто знаходиться в склоподібному стані. Це демонструє залежність деформації полімерів від температури [13, 14]. Саме термомеханічні залежності формують в значній мірі механізм виникнення дефектів. Шляхом вимірювання деформації зразка аморфного полімеру при різних температурах можна побудувати залежність деформації від температури. На цій кривій виділяють чотири області. Кожна з цих областей має такі особливості [21].

Область 1 – сегменти не переміщуються, макромолекули не змінюють форму клубків.

Область 2 – перехідна, що характеризується температурою склування ( $T_C$ ). Деформація збільшується і досягає декількох десятків або декількох сотень відсотків.

Область 3 – розвинений високоеластичний стан. Полімер легко деформується і повертається у вихідний стан. Сегменти переміщуються, вузли флуктуаційної сітки руйнуються. Утворюються нові вузли флуктуаційної сітки.

Область 4 – значне зміщення сегментів. Вони не можуть перейти у вихідне положення. Це деформація в'язкої течії.



1 – область склоподібного стану; 2 – перехідна область;  
 3 – область високо еластичного стану; 4 – область в'язко-текучого стану;  
 $T_{кр}$  – температура крихкості,  $T_C$  – температура склування,  
 $T_T$  – температура текучості; зірочкою відмічена точка початку деструкції

Рисунок 3.2 – Термомеханічна крива аморфного полімеру

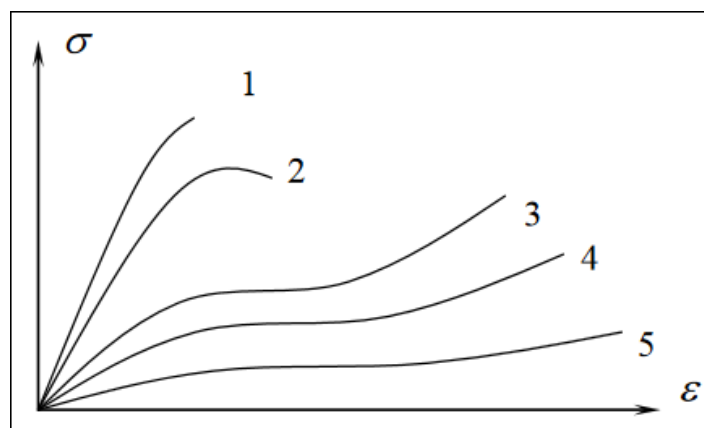
Нижче  $T_{KP}$  - крихкий стан, полімер легко руйнується при ударі.

Склоподібний та крихкий стан полімерів визначаються температурою. Температура склування – це температура, за якої ПМ переходить з високо еластичного стану в склоподібний.

Для виконання FDM-друку використовується ПМ, які знаходяться в області 2 і не досягли високо еластичного стану, при якому якісне формування виробу неможливе. У високо еластичному стані ПМ при охолодженні зменшує вільний об'єм не зайнятий макромолекулами. При цьому температурний коефіцієнт лінійного розширення на 1 – 2 порядки вищий, ніж для металів [5].

Температура склування ( $T_C$ ) – це температура, при якій вільний об'єм зменшується до 2,5% і полімер стає склоподібним. Нижче  $T_C$  вільний об'єм не зменшується. Зменшення лінійних розмірів відбувається лише за рахунок зменшення міжмолекулярних відстаней.

Це відбивається на вигляді діаграм деформування (рис. 1.5). При підвищенні температури міцність полімеру і модуль пружності зменшуються, діаграми деформування розташовуються нижче, ніж при низьких температурах [5].



крива 1 –  $T < T_{KP}$  ; криві 2, 3, 4 –  $T_{KP} < T < T_C$  ; крива 5 –  $T > T_C$

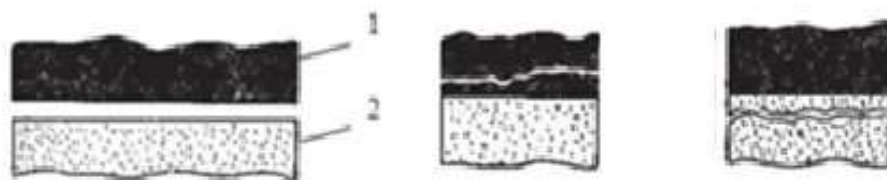
Рисунок 3.3 – Діаграми деформування полімеру  
в різних фізичних станах

Із зростанням температури зменшується межа вимушеної еластичності – за рахунок збільшення температури відбувається збільшення запасу теплової енергії і потрібна менша зовнішня енергія для розвитку вимушеної пружної деформації.

При  $T < T_C$  енергетичний бар'єр на шляху переміщення сегмента настільки великий, що процес деформування без великих механічних навантажень стає неможливим. Під дією напружень енергетичний бар'єр зменшується.

Таким чином, релаксаційні процеси в ПМ відбуваються не лише під впливом теплових рухів, але також під впливом модифікування і навантаження.

При цьому сегмент накопичує сумарний запас енергії (теплової та механічної), достатній для подолання потенціального бар'єру. Тому одним з ефективних шляхів забезпечення бездефектності і підвищення експлуатаційних характеристик ПМ, в тому числі з наповнювачами, є застосування високочастотного електромагнітного імпульсного поля (ВЕІП) або ультразвукового оброблення (рис. 3.3).



1 – адгезив; 2 – підложка

а) – адгезійне; в), с) – когезійне

Рисунок 3.3 – Види руйнування міжшарових з'єднань

Таким чином, FDM технологія має великий потенціал для розвитку і впровадження у виробництві, характеризується різноманіттям матеріалів, легкістю і відносною дешевизною.

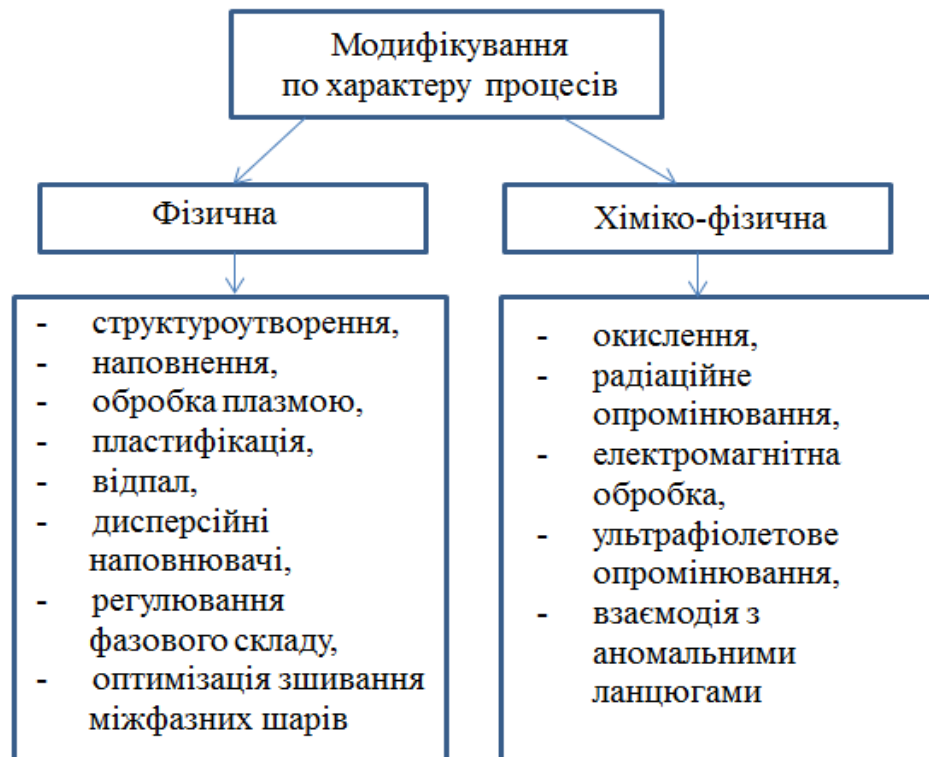


Рисунок 3.4 – Класифікація способів модифікування по характеру процесів

Але забезпечення якості в адитивних технологіях є актуальною проблемою, що поки не має відповідного теоретичного і практичного розроблення, особливо із застосуванням неруйнівних методів контролю. Тому формування методів забезпечення бездефектного FDM-друку ПМ виробів складної геометричної форми є метою цієї роботи.

На фізико-механічні властивості полімерних матриць впливають технологічні режими приготування ПМ, різного роду включення й дефекти, які зумовлюють різні механізми руйнування затверділої полімерної матриці. Прогнозування властивостей кінцевих композитів із наповнювачами нанометрового діапазону є ще більш складним завданням, особливо якщо враховувати складну побудову макромолекул ПКМ (рис. 3.5).








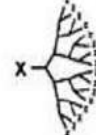

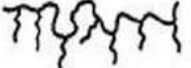




Лінійні	Розгалужені	Зшиті	Дендриміри
 гибкий клубок	 статистические короткие разветвления	 редкосштые	 сверхразветвленный (неидеальный дендрон)
 жесткий стержень	 статистические длинные разветвления	 густосштые	 идеальный дендрон
 цикл	 регулярные гребнеобразные разветвления	 взаимопроникающие сетки	 дендример
 полиротаксан	 регулярные звездчатые разветвления		

Рисунок 3.5 – Побудова макромолекул полімерних матеріалів

Важливий вплив на полімерне зв'язуюче має орієнтувальний вплив наповнювача. Орієнтування здійснюється не лише в адсорбованих молекулах, але й пов'язаних безпосередньо з ними (як відгук на ближню взаємодію).

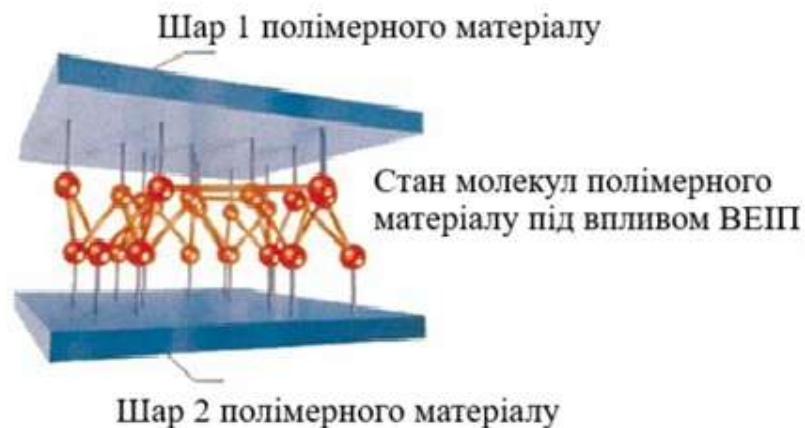
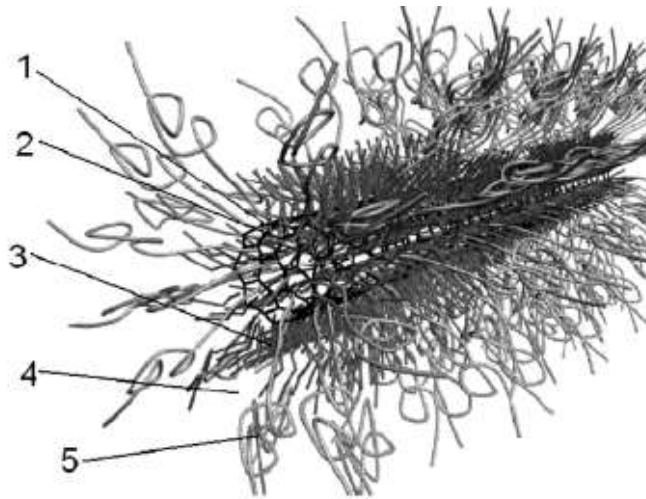


Рисунок 3.6 – Вид міжшарового з'єднання полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку

Дальнодія не обмежується впливом поверхневих силових полів. Мікроусадкові явища, що спостерігаються під час формування ПМ, також спричиняють об'ємне орієнтування (рис. 3.7).

Завдяки зменшенню частки міжглобулярних аморфних прошарків полімеру в межовому шарі відбувається збільшення ступеня кристалічності. Тому об'ємна маса полімеру в межовому шарі зростає порівняно з об'ємною фазою. Із межових шарів матриці утворюється каркас, носіями якого є частинки дисперсного наповнювача. При цьому наявність такого каркасу суттєво впливає на фізико-механічні характеристики композиту.



1 – наповнювач; 2 –адсорбований мікрошар; 3 –орієнтований шар;  
4 –перехідний шар; 5 –полімер в об'ємній фазі

Рисунок 3.5 – Морфологія межового шару біля поверхні

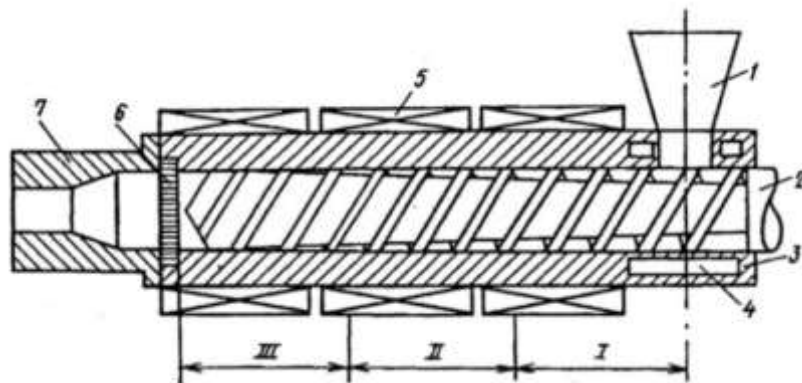
Щоб отримати позитивний ефект від наповнення густосітчастих термореактивних полімерних матриць жорсткими дисперсними частинками варто дотримуватися таких умов [19, 20]:

- ступінь наповнення має перебувати в оптимальних межах, обумовлених розміром дисперсних частинок;
- бажано використовувати дисперсні частинки нанометрового діапазону;
- наповнювач повинен мати адгезію до матеріалу полімерної матриці, переважно з хімічним зв'язком.

Часові параметри диспергування визначити складно, оскільки відсутні дані щодо середньої довжини й розмірів вуглецевих нанотрубок в агломераті. Тому ці величини встановлюють експериментально. В'язкість композиції зростає із збільшенням концентрації дисперсного наповнювача, проте це зростання не завжди є пропорційним вмісту ПКМ. Наголошується на ефективності вуглецевих наномодифікаторів для виготовлення конструкційних елементів із ІПКМ. Очікується, що встановлення їхнього ефективного вмісту й виду дозволить зменшити масу конструкційних елементів на 10% і більше, а також суттєво покращити експлуатаційні властивості ІПКМ. Спрямованої зміни структури й властивостей виробів із термореактивних полімерів можна досягти за допомогою УЗ-кавітації, що сприяє згортанню міжвузлових фрагментів уздовж вісі деформації [11, 25].

### 3.2 Дослідження впливу модифікування в процесі екструзії полімерних матеріалів

Екструзія полімерного матеріалу відбувається через екструдер спеціальної конструкції, на якому встановлені електромагнітні катушки для модифікування ВЕП.



1 – бункер 2 – шнек; 3 – циліндр; 4 – охолоджуюча рідина; 5 – катушки ВЕП; 6 – решітка; 7 – формуюча головка; I, II, III – технологічні зони

Рисунок 3.6 – Схема екструдера з модифікуванням ВЕП

Адгезія - (від лат. *adhaesio* - прилипання) це зчеплення або зв'язок, що виникає при дотику поверхневих шарів двох різнорідних тіл. Наприклад, зв'язок між фарбою та металевою поверхнею, на яку вона нанесена. Завдяки цьому явищу фарба та штукатурка міцно утримуються на стінах, стелях та бетонних поверхнях, а також міцно склеюються різні матеріали. Адгезія обумовлюється силами молекулярної взаємодії, т. е. силами зчеплення різнорідних молекул, атомів, іонів, функціональних компонентів, що у поверхневих шарах контактуючих тіл. Ці сили зчеплення називаються адгезійними силами, а сама взаємодія - адгезійною взаємодією.

Адгезійна міцність - сила, необхідна для руйнування адгезійної сполуки (розриву) при деформації (відрив або зсув). Адгезійна міцність залежить від складу матеріалу обох поверхонь, що контактують, від розміру площі їх контакту, а також від напрямку і швидкості прикладеної зовнішньої сили. Робота, витрачена подолання сил зчеплення, називається роботою адгезії чи роботою відриву.

В основі механізму склеювання лежить складний процес. З ним пов'язане існування кількох теорій, що трактують явище з різних позицій. Єдиної думки наразі не існує.

- Адсорбційна теорія, згідно з якою явище здійснюється в результаті адсорбції адгезиву на порах та тріщинах поверхні субстрату.

- Механічна теорія розглядає адгезію як результат проникнення молекул адгезиву у верхній шар субстрату; пояснює склеювання лише пористих матеріалів.

- Електрична теорія реалізується шляхом контактної електризації, яка має місце при тісному зіткненні адгезиву та субстрату.

Адгезив та субстрат в адгезійному з'єднанні ототожнюються з обкладками електричного конденсатора, а процес роз'єднання – з розсуванням обкладок конденсатора. При цьому між пластинами виникає різниця потенціалів, яка зростає із збільшенням зазору між ними до настання електричного розряду.

- Сутність дифузної теорії зводиться до взаємної чи односторонньої дифузії молекул з адгезиву субстрат. Коли речовина проникає в молекули полімеру, вплітаючись у них, створюючи міцні ланцюги. Дозволяє зрозуміти механізм адгезії взаєморозчинних полімерів, не пояснюючи процесів склеювання металу, деревини, скла.

Потенційною причиною таких результатів є FDM-технологія, яка використовується для отримання виробів з АБС-пластиків, при якій полімер наноситься на підкладку у вигляді розплаву; процес оформлення виробу подібний зварюванню полімерних матеріалів, і в результаті виробу мають щільну структуру. При створенні виробів з поліаміду використовується SLS-технологія, при якій відбувається спікання частинок полімеру з отриманням виробів, що мають пори. Подібні зміни властивостей виробів з полімерних матеріалів, одержуваних різними методами, описані в дослідженнях процесу формування деталей з поліетилену і пластмас.

Порівняльний аналіз результатів досліджень, присвячених зміні властивостей полімерів, показує, що властивості виробів з полімерних матеріалів, одержуваних методом ротаційного формування, що мають також пористу структуру, відрізняються від властивостей матеріалів, заявлених виробником.

Крім зниження деяких показників міцності і уявної щільності виробу з поліаміду, одержувані по SLS-технології, мають шорстку поверхню

Наступним етапом дослідження застосування різних пластиків і полімерів в промисловому виробництві став аналіз фізико-механічних властивостей полімерів в залежності від режиму друку.

Виготовлення зразків і фізико-механічні випробування на стиск, вигин і розрив проводилися відповідно до державних стандартів. Зразки з поліаміду отримані з використанням SLS-технології при режимах, рекомендованих виробником обладнання, зразки з АБС-пластика марки REC створені з використанням FDM-технології, температуру розплаву і швидкість його нанесення варіювали.

Для АБС-пластика марки REC (рис. 3.1) проведено ряд досліджень. За результатами фізико-механічних випробувань полімерів був зроблений висновок про можливість застосування поліаміду марки ПА-12 і АБС пластика марки REC, виготовлених за технологіями SLS і FDM, для створення деталей перспективних БДМ.

При фрактографічному дослідженні морфології зламів зразків пластмас були отримані наступні результати. При вивченні зламів чітко видно збільшення пористості матеріалу і зміна характеру порожнин і кратерів, що, ймовірно, пов'язано з в'язкістю розплаву і температурою скловування АБС-пластика.

Злам зразків, виготовлених при температурі розплаву на виході з сопла 245 °С і швидкості нанесення 40 мм/сек показаний на рис. 3.2.

Помічено, що порожнини знаходяться на кордоні з'єднується матеріалу і проходять по всьому зразком, утворюючи своєрідну досить однорідну структуру матеріалу. Простежується кореляційний зв'язок між формою і обсягом порожнин в матеріалі і отриманими фізико-механічними властивостями цього матеріалу.

Злам зразків, виготовлених при температурі розплаву на виході з сопла 245 °С і швидкості нанесення 60 мм/сек показано на рис. 3.3.

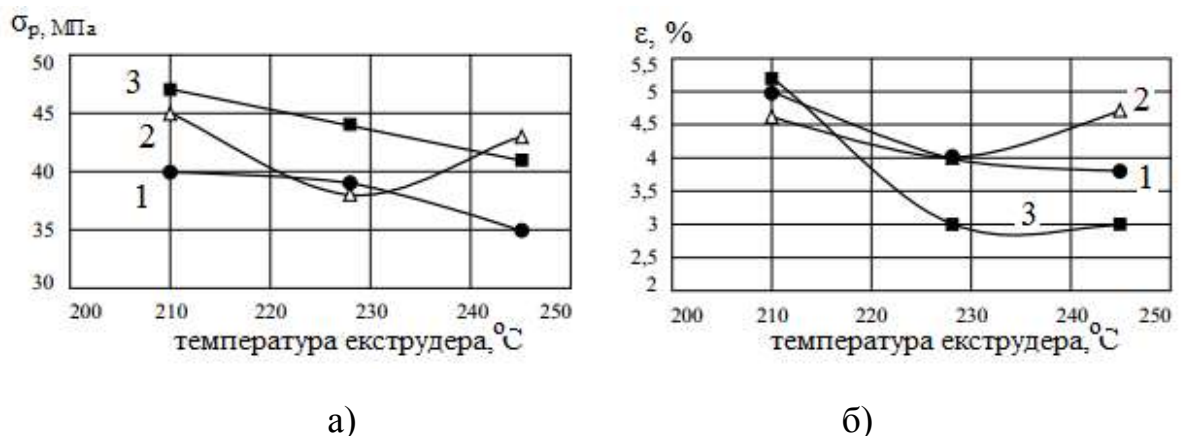
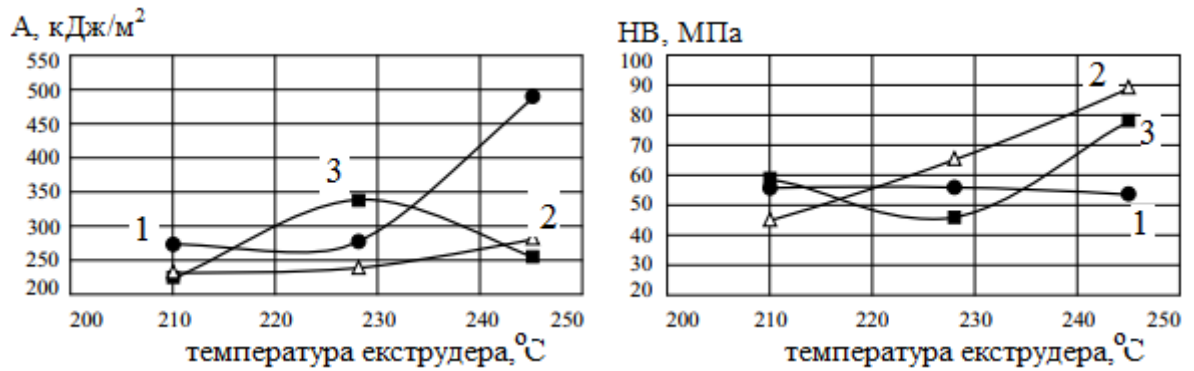


Рисунок 3.7 – Результати фізико-механічних випробувань АБС-пластику

випробувань АБС-пластику



а)

б)

Швидкість нанесення розплаву: 1 – 0,04 м/с; 2 – 0,05 м/с; 3 – 0,06 м/с

а) – ударна в'язкість (А); б) – твердість по Бринелю (НВ);

Рисунок 3.8 – Результати фізико-механічних випробувань АБС-пластику

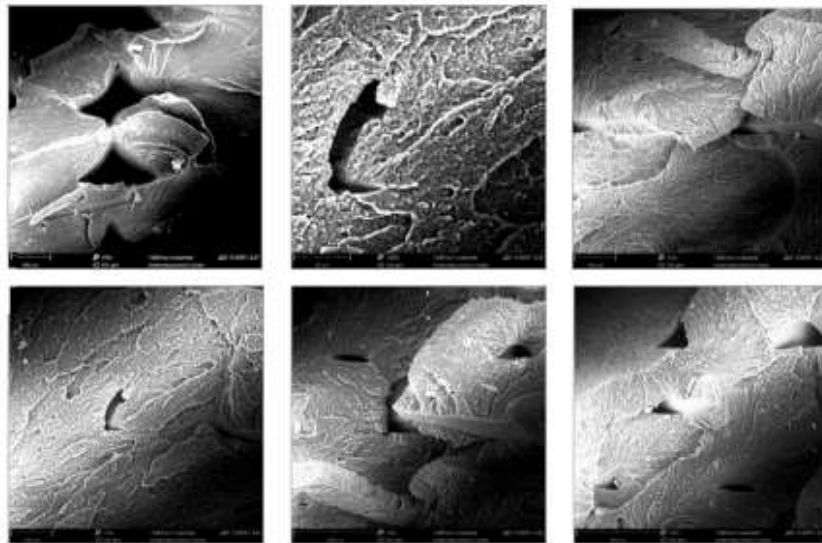


Рисунок 3.9 – Результати фрактографічних досліджень зламів АБС-пластику (швидкість руху екструдера – 40 мм/сек)

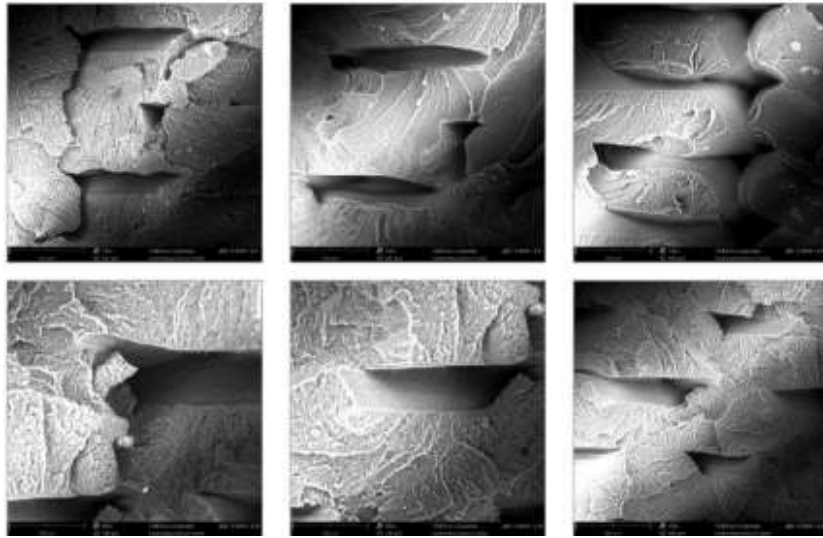


Рисунок 3.10 – Результати фрактографічних досліджень зламів АБС-пластику (швидкість руху екструдера – 60 мм/сек)

Зразки (рис. 3.7) мають підвищену твердістю по Брінеллю (НВ), кращими показниками руйнівного напруження при розтягуванні, відносному подовженні при розриві і руйнує напрузі при стисканні, що, швидше за все, пов'язано з отриманою структурою зразка, на відміну від майже суцільного матеріалу в зразках (рис. 3.8), проміжні результати спостерігаються у зразка зі швидкістю руху екструдера – 50 мм/сек. Зворотна залежність спостерігається в результатах ударної в'язкості і руйнівного напруження при згині, що, можливо, зумовлено найбільшою цілісністю структури матеріалу і зниженням в ній внутрішніх напружень від більш низькій швидкості нанесення в зразках.

Отримані результати вказують на необхідності продовжити дослідження впливу структури адитивного матеріалу на його фізико-механічні властивості шляхом створення штучної структури матеріалу і варіювання його природної пористості.

Результати розрахунків і аналізу наших розробок лягли в основу серії натурних випробувань.

### 3.3 Аналіз методів пост-оброблення

Попередньо встановлено [21 – 24], що ВЕІП сприяє підвищенню адгезійної міцності епоксидних композитів з феромагнітними наповнювачами. Проте, покриття, виконані із застосуванням зазначених матеріалів, повинні мати не тільки поліпшені адгезійні властивості, але й когезійну міцність. Зазначимо, що аналіз когезійної міцності ПКМ проводили за показниками модуля пружності та руйнівних напружень при згинанні розроблених композитів.

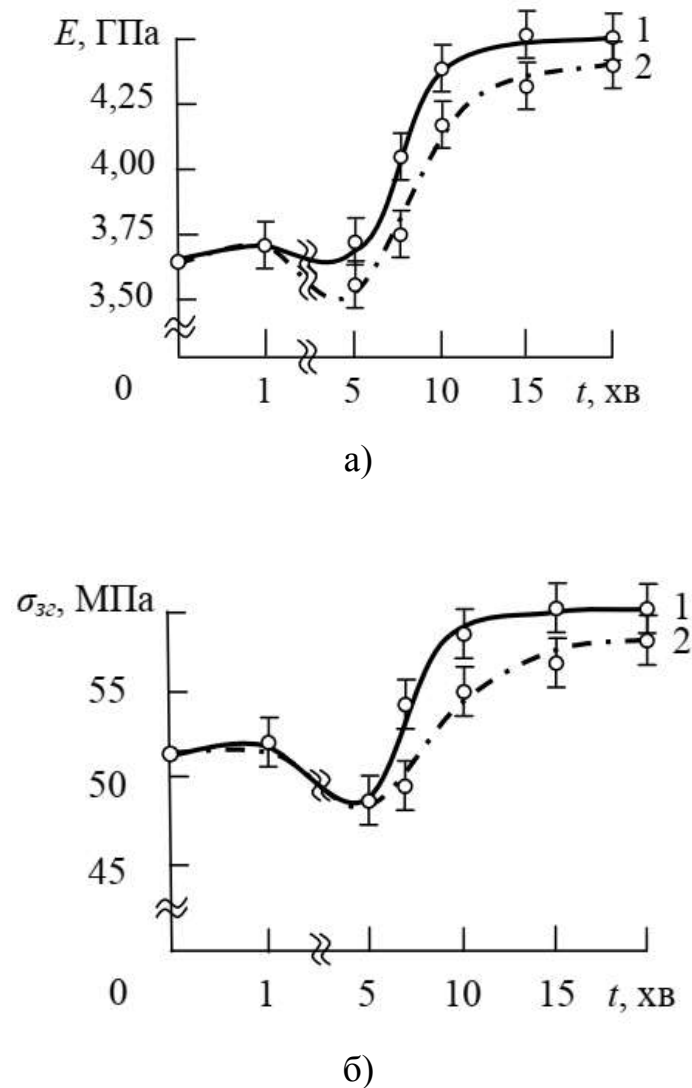
Дані властивості вибрано, виходячи з умов експлуатації підйомно-транспортних машин на сучасних машинобудівних підприємствах і транспорті.

Як було зазначено, частота коливань ВЕІП –  $f = 2,25$  МГц, напруженість ВЕІП –  $H = 1265$  А/м. Тривалість ABS-пластика та ABS-пластика з наповнювачами змінювали у діапазоні від  $t = 1$  хв до  $t = 20$  хв. Експериментально встановлено (рис. 3.1), що модуль пружності немодифікованих ПКМ з частками сталі 45 (50 мас.ч.) становить  $E = 3,65$  ГПа. Модифікація ВЕІП безпосередньо часток наповнювача впродовж часу  $t = 1 – 5$  хв не приводить до підвищення модуля пружності матеріалів (різниця у значеннях знаходиться в межах похибки експерименту). Збільшення тривалості модифікування наповнювача до  $t = 10$  хв забезпечує збільшення модуля пружності ПКМ з  $E = 3,65$  ГПа (для вихідного ПКМ) до  $E = 4,35$  ГПа. Надалі зростання тривалості ВЕІП до  $t = 15$  хв сприяє збільшенню модуля пружності ПКМ до  $E = 4,50$  ГПа. Збільшення тривалості ВЕІП понад  $t = 15$  хв не забезпечує поліпшення когезійних властивостей ПКМ.

При ВЕІП композицій з частками сталі 45 спостерігали наступну тенденцію. На початковому етапі (за тривалості ВЕІП впродовж часу  $t = 1 – 5$  хв) спостерігали зниження показників модуля пружності ПКМ з

$E = 3,65$  ГПа (для вихідного ПКМ) до  $E = 3,50$  ГПа. Збільшення тривалості ВЕП композицій до  $t = 10 - 15$  хв сприяє підвищенню показників модуля пружності ПКМ до  $E = 4,15 - 4,30$  ГПа. Надалі збільшення тривалості обробки композицій не забезпечує поліпшення когезійної міцності ПКМ.

На рис. 3.1 показана залежність модуля пружності і руйнівних напружень при згинанні ABS-пластика і ABS-пластика з наповнювачем, що наповнений частками сталі 45 (50 мас.ч.) від тривалості ВЕП.



1 – ABS пластик з наповнювачем; 2 – ABS пластик

а) – модуля пружності  $E$ ; б) – руйнівних напружень при згинанні  $\sigma_{32}$

Рисунок 3.1 – Залежність модуля пружності і руйнівних напружень при згинанні ПКМ з наповнювачем частками сталі 45

Отже, можна констатувати, що оптимальним часом ВЕП як наповнювача, так і композицій є  $t = 10 - 15$  хв. При цьому доцільно проводити ВЕП безпосередньо наповнювача, що забезпечує підвищення модуля пружності ПКМ з  $E = 3,65$  ГПа (для вихідного ПКМ) до  $E = 4,35 - 4,50$  ГПа. Модифікація ВЕП композицій при аналогічних режимах зумовлює підвищення модуля пружності ПКМ до  $E = 4,15 - 4,30$  ГПа. Модифікацію ВЕП наповнювача чи композицій понад  $t = 15$  хв проводити немає необхідності, позаяк це не приводить до суттєвого збільшення величини модуля пружності ПКМ і, з точки зору збільшення енергетичних витрат, є недоцільним.

Аналогічні висновки можна зробити, аналізуючи залежність руйнівних напружень при згинанні від тривалості ВЕП ПКМ з частками сталі 45. Експериментально встановлено, що руйнівні напруження при згинанні немодифікованих ПКМ, наповнених частками сталі 45, становлять  $\sigma_{32} = 51$  МПа. Модифікація як ПКМ з наповнювачем, так і ПКМ ВЕП впродовж часу  $t = 1$  хв не приводить до зміни руйнівних напружень при згинанні. Навпаки, при збільшенні часу ВЕП до  $t = 5$  хв спостерігали зменшення руйнівних напружень від  $\sigma_{32} = 51$  МПа (для вихідних ПКМ) до  $\sigma_{32} = 48$  МПа. Надалі збільшення тривалості ВЕП забезпечує підвищення показників когезійних властивостей ПКМ, які досягають свого максимуму за часу модифікації впродовж  $t = 10 - 15$  хв. За таких режимів ВЕП показники руйнівних напружень при згинанні становлять  $\sigma_{32} = 58 - 60$  МПа (при модифікації наповнювача) та  $\sigma_{32} = 55 - 57$  МПа (при модифікації композиції). При збільшенні тривалості ВЕП понад  $t = 10 - 15$  хв спостерігали стабілізацію значень руйнівних напружень при згинанні ПКМ. Це свідчить про те, що з економічної точки зору збільшення тривалості ВЕП понад  $t = 15$  хв не є доцільним. Окремо слід зазначити, що при дослідженні залежності модуля пружності і руйнівного напруження при згинанні від тривалості ВЕП спостерігали погіршення властивостей КМ у діапазоні часу модифікації –  $\Delta t = 1 - 5$  хв. Такий ефект, на наш погляд, характеризує прояв

явища магнітної в'язкості при високочастотній обробці матеріалів з феромагнітними властивостями [26].

На наступному етапі проводили аналогічні дослідження з метою виявлення впливу тривалості ВЕП на механічні властивості ПКМ, наповнених частками залізного сурику (10 – 20 мкм) за вмісту 50 мас.ч. на 100 мас.ч. ABS пластику.

Експериментально встановлено, що оптимальним часом ВЕП є  $t = 15$  хв. За такого режиму ВЕП спостерігали підвищення модуля пружності з  $E = 4,8$  ГПа ( для вихідного ПКМ) до  $E = 5,5$  ГПа (при ВЕП наповнювача) і до  $E = 5,1$  ГПа (при ВЕП композиції).

Аналогічно, впродовж часу ВЕП  $t = 15$  хв спостерігали підвищення показників руйнівних напружень при згинанні ПКМ від  $\sigma_{32} = 71$  МПа (для вихідного ПКМ) до  $\sigma_{32} = 82$  МПа (при модифікації ABS-пластик з наповнювачем) і до  $\sigma_{32} = 78$  МПа (при модифікації ABS-пластику).

Збільшення тривалості ВЕП понад  $t = 15$  хв не приводить до поліпшення когезійних властивостей матеріалів, наповнених частками залізного сурику. Водночас слід зазначити, що для ПКМ з добавками залізного сурику, порівняно з композитами, наповненими сталевими частками, прояв явища магнітної в'язкості (під час модифікування ВЕП у діапазоні часу  $t = 1 - 5$  хв) є більш вираженим. У цьому часовому діапазоні модифікування ВЕП інгредієнтів ПКМ показники когезійних властивостей матеріалів зменшуються, порівняно з вихідними композитами, на 6 – 11 %. На наш погляд, це зумовлено особливостями структури і магнітною сприйнятністю часток сталі 45 та залізного сурику. Дані характеристики, у першу чергу, визначають перебіг процесів намагнічування часток, що є важливим при структуроутворенні композитів під час зшивання.

## 4 ОХОРОНА ПРАЦІ

### 4.1 Визначення шкідливих та небезпечних чинників у лабораторії

Дана кваліфікаційна робота присвячена дослідженням властивостей полімерних матеріалів, отриманих методом FDM-друку, що проведені в умовах лабораторії кафедри технології металів і матеріалознавства. У даному розділі розглянуто основні шкідливі й небезпечні фактори, розроблені заходи щодо їхнього усунення. Окрім цього виконаний розрахунок захисного заземлення.

Лабораторія розташована на першому поверсі. Лабораторія має розміри:

- довжину  $A = 10$  м;
- ширину  $B = 6$  м;
- висоту  $H = 3,5$  м.

Лабораторія обладнана обігрівом, вентиляцією, освітленням, гарячою та холодною водою, засобами пожежогасіння, засобами індивідуального захисту, спеціальним обладнанням для проведення друку.

Робота у лабораторії пов'язана з ходьбою та не вимагає переміщення ваги, дослідження проводяться сидячи або стоячи. Робота середньої важкості, характеризується відсутністю систематичних фізичних навантажень. Фізична категорія роботи Іа. Енерговитрати організму (витрата енергії при виконанні роботи) складають 172 – 232 Дж/с (150 – 200 ккал/год).

До факторів виробничого середовища та шкідливих і небезпечних чинників у лабораторії належать:

- мікрокліматичні фактори;
- хімічні фактори;
- пил;
- шум;
- освітлення;

– небезпека ураження електричним струмом.

## 4.2 Аналіз небезпечних та шкідливих чинників на робочих місцях

### 4.2.1 Мікрокліматичні фактори

Самопочуття і працездатність людини залежать від мікрокліматичних та метеорологічних умов виробничого середовища, в якому він знаходиться і виконує трудові процеси. Під метеорологічними умовами розуміють декілька чинників, що впливають на людину: температуру, вологість і швидкість руху повітря, а також барометричний тиск і теплове випромінювання. Сукупність цих чинників називають виробничим мікрокліматом [36].

Параметри мікроклімату у лабораторії наведені у табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри мікроклімату лабораторії

Найменування	Фактичне значення	Оптимальне значення	Припустиме значення
Температура повітря, °С	20	18 – 20	17 – 23
Вологість повітря, %	55	40 – 60	75
Швидкість руху повітря, м/с	0,2	0,2	0,2 – 0,3

Діючими нормативними документами, що регламентують метеорологічні умови виробничого середовища, є «Загальні санітарно-гігієнічні вимоги до повітря робочої зони» та «Санітарні норми проектування промислових підприємств».

#### 4.2.2 Хімічні фактори

У результаті погіршення стану повітряного середовища в приміщенні можуть створюватися несприятливі умови праці, що впливають на самопочуття працюючих, що призводить до зниження продуктивності праці. На шкідливі речовини, що виділяються у виробничому приміщенні встановлені гранично-допустимі концентрації (ГДК) у повітрі робочої зони, значення яких наведено у табл. 4.2.

##### Вплив шкідливих факторів на організм людини

**В.** Бор та його сполуки. Використовуються в якості напівпровідникових матеріалів та діелектриків. Алмазоподібна модифікація нітриду бору (боразон) по твердості майже не поступається алмазу та застосовується як абразивний матеріал.

**Al.** У вигляді порошку алюмінію можна спалити на повітрі, в результаті цього утвориться білий тугоплавкий оксид алюмінію  $Al_2O_3$ , що є вибухонебезпечним.

**Si.** Для деяких організмів кремній є дуже важливим біогенним елементом. Він входить до складу опорних утворень у рослин і скелетних – у тварин. М'язова тканина людини містить  $(1-2) \times 10^{-2}\%$  кремнію, кісткова тканина –  $17 \cdot 10^{-4}\%$ , кров – 3,9 мг/л.

Сполуки кремнію відносно не токсичні. Але дуже небезпечним є вдихання високодисперсних частинок як силікатів, так і діоксиду кремнію, що утворюється, наприклад, при вибухових роботах, при роботі піскоструминних апаратів і т.д. Мікрочастки  $SiO_2$ , що потрапили до легенів, кристалізуються в них, а утворені кристали руйнують легеневу тканину та викликають важку хворобу – силікоз. Для того, щоб не допустити попадання в легені небезпечної пилу, необхідно використовувати респіратор для захисту органів дихання.

Таблиця 4.2 – Небезпечні шкідливі речовини у лабораторії

Джерело виділення	Фактична концентрація, мг/м <sup>3</sup>	ПДК, мг/м <sup>3</sup>	Клас небезпеки
B	3	5	III
Al	4,5	6	III
Si	0,01	0,05	I
Cu	1,6	3	III
Ni	2,4	4	III
Cr	4,8	0,0015	I
Mn	1,2	3	III

Cu. У надлишкових кількостях мідь спричиняє токсичну дію на організм людини. При потраплянні до організму із їжею, що містить більше 50мкг/кг міді, спостерігаються характерні ознаки отруєння – металевий смак у роті, блювота, біль у животі. При надходженні в менших кількостях, мідь накопичується у печінці, що викликає фізіологічні розлади організму.

Ni. Цільний металевий нікель не є небезпечним. Пил, пари нікелю та його сполуки токсичні. Цей елемент здатний накопичуватися у роговиці, тому отруєння ним може призвести до значного погіршення зору.

Cr. Хром – один з біогенних елементів, постійно входить до складу тканин рослин та тварин. Металевий хром практично нетоксичний, але металевий пил хрому подразнює тканини легенів.

Пил є шкідливим фактором виробничого середовища, оскільки негативно впливає на організм людини. Під впливом пилу можуть виникати такі захворювання, як пневмоконіози, екзема, дерматити, кон'юнктивіти та ін. Чим дрібніше пил, тим він більш небезпечний для людини. Найбільш небезпечними для людини вважаються частки розміром від 0,2 до 7 мкм, які,

потрапляючи в легені при диханні, затримуються в них і, накопичуючись, можуть стати причиною захворювання.

#### 4.2.3 Шум

До шкідливих факторів, що виникають при проведенні досліджень у лабораторії плазмотехнології, також належить шум. Шум спричиняють вентилятор, вентиляційна система та установка для плазмового напилення. Шум, що виникає під час роботи вентилятора, належить до аеродинамічних шумів з частотою 63Гц відповідно до стандарту.

Гранично допустимий рівень шуму складає 75 – 80 дБ. Шум, що виникає під час роботи установки плазменного напилення, належить до імпульсних шумів, що перевищують 150 дБ. Такий шум може спричинити травми барабанної перетинки та призвести до втрати слуху [38].

Підвищення рівня шуму також викликає зміни в нервовій системі, впливає на психіку людини, серцево-судинну систему, викликає головний біль.

#### 4.2.4 Освітлення

Освітлення у виробничих приміщеннях повинно відповідати характеру зорової роботи. Збільшення освітленості робочих поверхонь покращує умови бачення об'єктів, підвищує продуктивність праці. Проте існує межа, при якій подальше збільшення освітленості майже не дає ефекту і є економічно недоцільним.

У лабораторії освітлення є штучним. Штучне освітлення зазвичай створюють електричними джерелами світла, які включають в міру необхідності, регулюють інтенсивність світлового потоку і його спрямованість. Таке освітлення вимагає витрат електроенергії і відрізняється за спектром від природного світла. Світильники розміщені на стелі.

Правильно спроектоване й виконане освітлення забезпечує можливість нормальної діяльності на робочому місці. Стан зору людини, його нервової системи, безпека на виробництві у значній мірі залежать від умов освітлення. Безпечні умови світлового середовища роблять сприятливий загальний психофізіологічний вплив на працездатність та активність людини, й так само на якість виконуваної роботи. Для створення таких умов у лабораторії застосовують люмінесцентні лампи [39].

Посилаючись на таблицю 1 ДБН В 2.5.28-2006 “Природне та штучне освітлення” значення коефіцієнта природного освітлення для виробничих приміщень можна визначити, якщо:

- характеристика зорової роботи відрізняється малою точністю;
- найменший розмір об’єкта розрізнення більше 5 мм;
- зорова робота належить до V розряду.

У такому разі значення коефіцієнта дорівнює 1%.

Характеристика освітленості робочого місця приведена у табл. 5.3.

Таблиця 4.3 – Характеристика освітленості робочого місця у лабораторії

Фактичне значення освітленості, Лк	Нормативне значення освітленості, Лк
120	100

Дана лабораторія належить до V розряду зорової роботи. Характеристика зорової роботи не потребує високої точності.

#### 4.2.5 Небезпека ураження електричним струмом

Також небезпечним фактором у лабораторії є електричний струм. Експлуатація та обслуговування електроустановок, що використовуються, здійснюється відповідно до «Правил технічної експлуатації електроустановок

споживачів» та «Правил техніки безпеки при експлуатації електроустановок споживачів» згідно з якими дана лабораторія належить до приміщень без підвищеної небезпеки.

Основними мірами запобігання ураженню електричним струмом у лабораторії є ізоляція дротів, захист від дотику до частин устаткування, що перебуває під напругою та застосування захисного заземлення. Підлоги в лабораторії виконані з дерева та не проводять електричний струм.

#### 4.3 Організаційні заходи з охорони праці

Робота в лабораторії ведеться в одну зміну й розрахована на проведення наукових досліджень. Площа лабораторії дорівнює  $60\text{м}^2$ , а об'єм  $210\text{м}^3$ .

Індивідуальними засобами захисту називаються різноманітні пристрої та одяг, що застосовуються під час роботи для захисту тіла, голови, рук, ніг, органів подиху, зору та слуху. Річна потреба в засобах індивідуального захисту для робітників дослідницької лабораторії наведена у табл. 5.4.

Лабораторія обладнана шафами для робітників, де можна зберігати особисті речі та спеціальний одяг, обігрівом, вентиляцією, освітленням, гарячою та холодною водою, засобами пожежогасіння, засобами індивідуального захисту. Для надання першої допомоги, у разі виникнення травм, є аптечка.

#### 4.4 Пожежна безпека

Виробничий процес у лабораторії по вибуховій та пожежній небезпеці, згідно з БНіП 2.01.09-85 належить до категорії Г вогненебезпечних. Негорючі речовини і матеріали в гарячому, розжареному або розплавленому стані, процес обробки яких супроводжується виділенням променистого тепла, іскр і

полум'я; горючі гази, рідини та тверді речовини, які спалюються або утилізувалися у якості палива.

Будинок, у якому розміщена лабораторія, побудовано з негорючих матеріалів (цегли, залізобетону, скла), він має II ступінь вогнестійкості.

Пожежі в лабораторії можуть виникнути в результаті загоряння електроустаткування при перевантаженні, при перегрівих та коротких замиканнях, внаслідок дії статичного або газового розряду, через необережність.

Небезпека виникнення пожежі в лабораторії зменшена за допомогою наступних заходів:

- оснащення систем керування електроустаткування автоматами максимального захисту від струму та плавких запобіжників;
- обладнання системою витяжної вентиляції, що зменшує концентрацію шкідливих речовин у повітрі;
- електроустаткування та освітлення розроблене у іскро- та вибухобезпечному виконанні;
- статичний заряд уходить у землю через мережу заземлення;
- ймовірність ураження будинку блискавкою зменшена за допомогою застосування системи захисту від блискавки.

Для гасіння можливих пожеж у лабораторії передбачені первинні засоби пожежогасіння: вода; ящик з піском, об'ємом 0,5м<sup>3</sup>; вогнегасник хімічно-пінний ОХП-10, що призначений для гасіння пожеж твердих та рідких речовин, які спалахнули; вогнегасник вуглекислотний ОУ-5, призначений для гасіння електроустановок, які перебувають під напругою не більше 380 В та для невеликих кількостей всіх видів горючих та тліючих речовин.

Первинні засоби пожежогасіння в лабораторії наведені у табл. 4.5.

Таблиця 4.5 – Первинні засоби пожежогасіння

Противопожежний інвентар	Кількість
--------------------------	-----------

та устаткування	
Вогнегасник пінний ОХП-10	1
Вогнегасник вуглекислотний ОУ-5	2
Ящик з піском (0,5м <sup>3</sup> ) та лопатою	1

На підставі аналізу шкідливих та небезпечних факторів, що мають місце при проведенні дослідження в приміщенні лабораторії, у роботі передбачені організаційно-технічні заходи щодо їх усунення.

Для зменшення концентрації шкідливих речовин, що виділяються, використовується місцева витяжна вентиляція, дія якої полягає у видаленні шкідливих речовин з джерела їх утворення то вентиляції повітря.

До факторів, що впливають на умови праці, належать метеорологічні умови приміщення, освітлення, пил, шум та інші. Було розроблено заходи щодо поліпшення умов праці в лабораторії, заходи пожежобезпеки та ураження електричним струмом. Для запобігання ураженню працівників електричним струмом проведено розрахунок та розроблено конструкцію захисного заземлення.

## ВИСНОВКИ

1. Виконаний аналіз досягнутого рівня застосування адитивних технологій, можливостей способів модифікування полімерних матеріалів, виявив, що вони можуть бути застосовані для підвищення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку і пост-оброблення виробів.

2. Доведено, що обробка високочастотним електромагнітним полем (при частоті  $f = 2,25$  МГц і напруженості  $H = 1265$  А/м) приводить до поліпшення адгезійних властивостей полімерних матеріалів. Відбувається граничне зміцнення когезійного і адгезійного шву міжшарових з'єднань полімерних матеріалів за рахунок максимального заповнення мікрodefektів і збільшення на 15 – 20 % фізико-механічних характеристик міцності.

3. Доведено, що модифікування ПКМ доцільно проводити на протязі всього часу генерування для компенсації процесу охолодження виробу. При цьому температура початкового прогріву платформи встановлюється в інтервалі 180 – 185 °С.

4. Аналізуючи отримані результати в цілому слід зазначити, що для досягнення високих показників міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів для 3Д-друку, доцільно проводити обробку високочастотним електромагнітним полем безпосередньо ABS-пластиків в процесі генерування виробів і особливо протягом 15 хвилин в якості спеціальної операції пост-оброблення.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. A Brief History of Additive Manufacturing and the 2009 Roadmap for Additive Manufacturing: Looking Back and Looking Ahead / D.L. Bourell, J.J. Beaman, M.C. Leu, D.W. Rosen // Proceedings of Rapid Tech. 2009: US - Turkey Workshop on Rapid Technologies. - Istanbul, 2019. - P. 1-8.
2. Мельник Л.І. Хімія і фізика полімерів: Навч. посібник – Київ: НТУУ "КПІ" 2016. – 161 с.
3. Ehrenberg, R. The 3-D Printing Revolution: Dreams Made Real One Layer at a Time / R. Ehrenberg // Science News. - 2016. - Vol. 183. - Iss. 5. - P. 20-25.
4. Шидловський М.С. Нові матеріали: Частина 1 – Структура і механічні властивості конструкційних полімерів та пластмас. [Текст]: Навчальний посібник для студентів ЗВО– К.: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 192 с.
5. Holmes L.R. Research Summary of an Additive Manufacturing Technology for the Fabrication of 3D Composites with Tailored Internal Structure / L.R. Holmes, J.C. Riddick // JOM. – 2014. - Vol. 66. - Iss. 2. – P. 270 – 274.
6. Bendsoe M.P. Topology Optimization: Theory, Methods and Applications / M.P. Bendsoe, O. Sigmund. – Berlin: Springer, 2016. – 370 p.
7. 3D друк в умовах біомедичного використання [Електронний ресурс] : конспект лекцій з дисципліни «3D друк в умовах біомедичного використання» для студентів спеціальності «Біомедична інженерія» денної та заочної форм навчання / уклад. Б. Єфременко. – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – 56 с.
8. Simultaneous Optimization of Topology and Orientation of Anisotropic Material using Isoparametric Projection Method / T. Nomura, E.M. Dede, T. Matsumori, A. Kawamoto // Advances in Structural and Multidisciplinary Optimization - Proceedings of the 11<sup>th</sup> World Congress of Structural and Multidisciplinary Optimization (WCSMO-11). – The University of Sydney,

Australia, 2015. – P. 728 – 733.

9. Allaire G. Topology Optimization for Minimum Stress Design with the Homogenization Method / G. Allaire, F. Jouve, H. Maillot // *Structural and Multidisciplinary Optimization*. – 2024. – Vol. 28. – Iss. 2–3. – P. 87–98.

10. Архангельский Ю.С. Довідкова книга по НВЧ-електротермія: довідник / Ю.С. Архангельский. – Одеса: Науч. кн., 2016. – 560 с.

11. Akash D. Topology Optimization of Bridge Structures Using Optimality Criteria Method / D. Akash, M. Anadi // *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRAS ET)*. – May 2015. – Vol. 3. – Iss. 5. – P. 1034–1038.

12. Luo Y. An Enhanced Aggregation Method for Topology Optimization with Local Stress Constraints / Y. Luo, M.Y. Wang, Z. Kang // *Comput Methods Appl. Mech. Eng.* – 2018. – Vol. 254. – P. 31–41.

13. Підгорна Л.П. Теорія та методи дослідження і випробування пластмас, клеїв та герметиків / Л.П. Підгорна, Г.М. Черкашина, В.В. Ледедев – Харків: НТУ «ХП», 2015. – 276 с.

14. Жергева О. А. Аналіз способів модифікації волокнистих матеріалів. // О.А. Жергева, І.О. Абдулін, Л.А. Пенітов, К.Д. Костін // *Вісник технологічного університету*. 2018. – №20 – С. 19 – 27.

15. Балашов А.В., Черданцев А.О., Новіковський Е.А., Ананьїн С.В., Білоплатов С.В. Дослідження міцності виробів, що отримані методом 3D-друку // *Вісник технологій* – № 2. – 2018.– С. 61– 64.

16. Igume M.S., Lavr N.A. Adhesion of linear lowdensity polyethylene and oligomers // *Polymer Science. Ser. D*. 2017. Vol. 10. № 1. P. 55–58.

17. 3-D printing manufacturing process is here // *UAS Vision*. URL: <http://www.uasvision.com/2012/07/16/3-d-printing-manufacturing-process-is-here/> (дата обращения: 30.03.2025).

18. Колосов О.Є. Одержання волокнистонаповнених реактопластичних полімерних композиційних матеріалів із застосуванням ультразвуку/ О.Є.Колосов, В.І. Сівецький, О.П. Колосова. – К.: Політехніка, 2015. – 295 с.

19. Технології 3D-друку, [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [http://www.ixbt.com/printer/3d/3d\\_tech.shtml](http://www.ixbt.com/printer/3d/3d_tech.shtml). – Дата доступу: 20.04.2023.
20. Глушкова Д. Б. Вплив різних видів поверхневої обробки на стан поверхні тертя / Д. Б. Глушкова, В. П. Тарабанова, Е. А. Нестеренко // Дні науки 2012: матеріали 8-й Міжнар. наук.-практ. конф. – Прага, 2012. Т. 89. С. 53 – 58.
21. Дудукалов Ю.В., Глушкова Д.Б., Багров В.А., Сорокін В.Ф., Степанюк А.І., Тернюк М.Е. «Спосіб комбінованого друку 3D-об'єктів» № u 202107788 від 03.08.2022, Бюл.№ 31.
22. Arvanitidi, E., Drosos, C., Theocharis, E., Papoutsidakis, M. 2019. 3D Printing and Education. International Journal of Computer Applications, 24, 55–59. DOI: 10.5120/ijca2019919711
23. Ford, S., Minshall, T. (2019). Where and how 3D printing is used in teaching and education. Additive Manufacturing, 25, 131–150. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.10.028>
24. Abou Hashem, Y., Dayal, M., Savanah, S., Strkalj, G. (2015). The application of 3D printing in anatomy education. Medical education, 20, 1, Article: 29847. DOI: <https://doi.org/10.3402/meo.v20.29847>
25. Schubert, C., van Langeveld, M. C., Donoso, L. A. (2014). Innovations in 3D printing: a 3D overview from optics to organs. British Journal of Ophthalmology, 2, 159–161. DOI: <http://dx.doi.org/10.1136/bjophthalmol-2013-304446>
26. Zhang, T., Cummings, M., Dulay, M. (2022). An Outreach/Learning Activity for STEAM Education via the Design and 3D Printing of an Accessible Periodic Table. American Chemical Society and Division of Chemical Education, 10, 3355–3359. DOI: <https://pubs.acs.org/doi/10.1021/acs.jchemed.2c00186>
27. Левченко О. Г. Охорона праці у зварювальному виробництві: Навчальний посібник.– К.: Основа, 2010. – 240 с.
28. ДСТУ 2456-94. Зварювання дугове і електрошлакове. Вимоги безпеки.

29. ДСН 3.3.6.042-99. Державні санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень.

30. ДСН 3.3.6.037-99. Санітарні норми виробничого шуму, ультразвуку та інфразвуку.

ДОДАТОК А  
ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ  
ДО ДИПЛОМНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Механічний факультет

Кафедра технології металів і матеріалознавства ім. О. М. Петриченко

## ІЛЮСТРАТИВНИЙ МАТЕРІАЛ

до кваліфікаційної роботи магістра

## ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ МІЖШАРОВИХ З'ЄДНАНЬ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ В ТЕХНОЛОГІЯХ FDM-ДРУКУ І ПОСТ-ОБРОБЛЕННЯ ВИРОБІВ

Завідувачка кафедри, д-р техн. наук, проф.  
Нормоконтролер, канд. техн. наук, доцент  
Керівник, канд. техн. наук, доцент  
Студент групи МС-61-24



Діана ГЛУШКОВА



Юрій ДУДУКАЛОВ



Юрій ДУДУКАЛОВ



Ярослав ЧОРНИЙ

Харків 2025

**Мета роботи** – підвищення міцності міжшарових з’єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку і пост-оброблення виробів.

**Об’єкт дослідження** – ресурсозберігаючі адитивні технології виробництва деталей машин.

**Предмет дослідження** – способи модифікування полімерних матеріалів для зміцнення міжшарових з’єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку і пост-оброблення виробів.

**Задачі дослідження:**

- виконати аналіз досягнутого рівня застосування адитивних технологій, можливостей існуючих методів 3D-друку та матеріалів, що можуть бути застосовані для виробництва і ремонту машин;
- провести експериментальні дослідження підвищення міцності міжшарових з’єднань полімерних матеріалів та і визначити властивості полімерних матеріалів після модифікування.

Рішення даної проблеми відкриє можливості для виробництва і ремонту деталей машин на основі FDM-друку, забезпечить підвищення ефективності машинобудівних і машиноремонтних підприємств.

# НОВІ АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ 3Д-ДРУКУ ВИРОБІВ СКЛАДНОЇ ГЕОМЕТРИЧНОЇ ФОРМИ

Класифікація 3Д-технологій за [ISO/ASTM 52900](#)

3D-друк, який також називають адитивним виробництвом, є зонтичним терміном, який охоплює групу різних процесів.

У 2015 році, [ISO/ASTM 52900](#)

Стандарт був створений з метою стандартизації всієї термінології та класифікації кожного з різних типів 3D-принтерів.

Загалом наразі визначено та встановлено сім категорій процесів адитивного виробництва, які дали багато різних типів технологій 3D-друку:

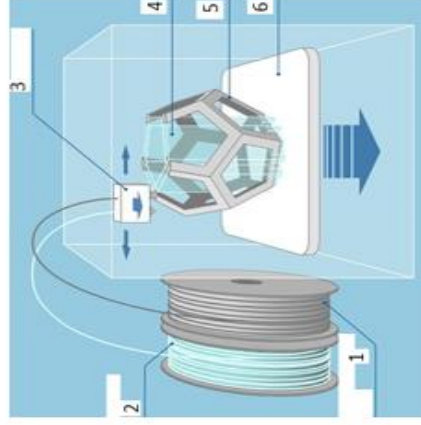
- екструзія матеріалу;
- ПДВ полімеризація;
- стереолітографія;
- лазерне спікання;
- електронно-променеве адитивне

виробництво;

- метод металевого 3D-друку на основі літографії;
- ультразвукова консолідація.

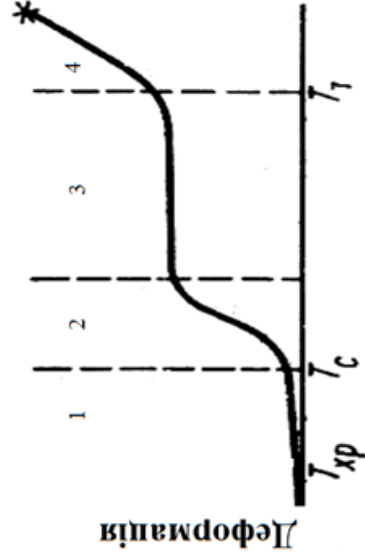


Рисунок 1.3 – Послідовність виконання 3D-друку



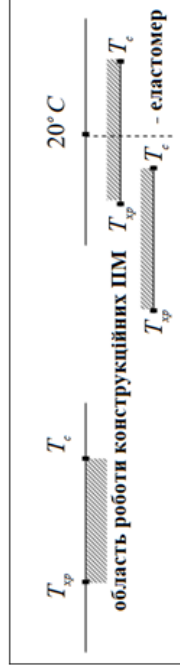
1 – котушка з матеріалом моделі; 2 – котушка з матеріалом підтримки; 3 – екструдер; 4 – матеріал підтримки; 5 – виріб в процесі побудови; 6 – платформа для побудови

Рисунок. 1.1 – Схема процесу пошаровим укладання розплавленої полімерної нитки (FDM)



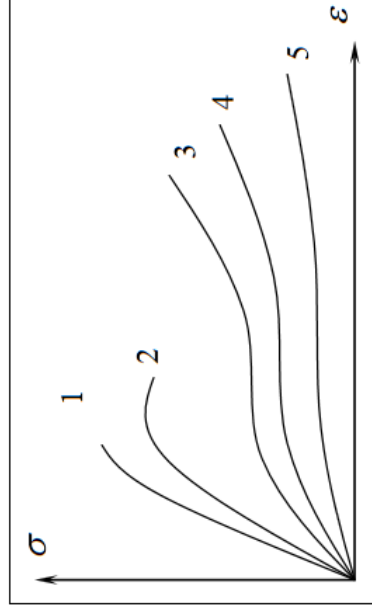
## Температура

- I – область склоподібного стану; II – перехідна область;
  - III – область високоеластичного стану; IV – область в'язко-текучого стану;
  - $T_{кр}$  – температура крихкості,  $T_c$  – температура склування,
  - $T_g$  – температура текучості; зірочкою відмічена точка початку деструкції
- Рисунок 1.5 – Термомеханічна крива аморфного полімеру**



**Рисунок 1.6 – Температурні області різних станів полімерів**

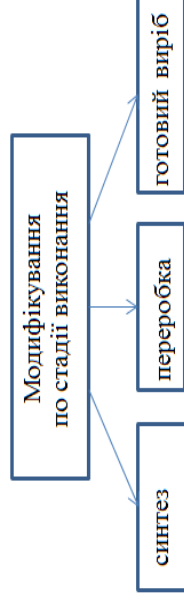
В залежності від величини температури склування, полімери розділяються на еластомери та конструкційні (жорсткі) полімери. Якщо  $T_c < 20^\circ C$  – полімер називається еластомером. Якщо  $T_c > 20^\circ C$  – це конструкційний полімер.



крива 1 –  $T < T_{кр}$ ; криві 2, 3, 4 –  $T_{кр} < T < T_c$ ; крива 5 –  $T > T_c$

**Рисунок 2.9 –** Діаграми деформування полімеру в різних фізичних станах

При  $T < T_c$  енергетичний бар'єр на шляху переміщення сегмента настільки великий, що процес деформування без великих механічних навантажень стає неможливим. Під дією напружень енергетичний бар'єр зменшується.

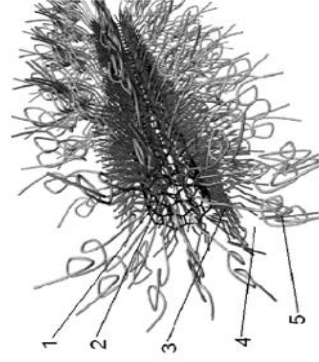


Забезпечення бездефектного FDM-друку будеється на врахуванні термомеханічних властивостей ПМ. Відомо, що при малих температурах полімер веде себе як скло, тобто знаходиться в склоподібному стані. Саме термомеханічні залежності формують в значній мірі механізм виникнення дефектів.

# МАТЕРІАЛИ ДЛЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

Таблиця 4 – Области застосування ПМ

Матеріал	Області застосування
Полістилен низької щільності	ПМ на основі термопластичних зв'язуючих
Полістилен високої щільності	Шпалги, заглушки, листи, плівки для упаковок, бочки та ін. деталі
Фторопласт	Меблева фурнітура, вентиляційні коробки, кришки і деталі з підвищеними механічними властивостями
Полівінілхлорид	Ушльоновальні кільця, арматура трубопроводів, сальники, підшипники
Полікарбонат	Труби і шпалги будівельного призначення, віроподобнаючі прокладки, ушльоновачі широкого призначення
Поліаміди	Деталі світлотехнічних приладів, конденсаторна плівка, деталі екстер'єру
Поліпропілен	Антифрикційні і електроізоляційні вироби, підшипники, муфти, шестерні, електротехнічна арматура
Феноласти	Ручки, гайки і корпусу апаратури, фольгувальні тканини, канати, корпусу аккумуляторів
Амінопласти	ПМ на основі термореактивних зв'язуючих
Склопластики	Вироби з підвищеними діелектричними властивостями, що працюють в умовах підвищеної вологості, циклічних температур і вібрацій
Органопластики	Дуго- і криволінійні деталі, які використовують у вузлах запалювання автомобілів
Вуглепластики	Корпусні деталі
	Бронзопластики та ін. Вироби з підвищеними вимогами стійкості до дії ударних навантажень
	Конструкційні деталі і вироби найширшого призначення



1 – наповнювач; 2 – адсорбований мікрошар; 3 – орієнтований шар; 4 – перехідний шар; 5 – полімер в об'ємній фазі

Рисунок 1.8 – Морфологія межового шару біля поверхні

				
СОРЕТ пластик MonoFilament 1,75 мм 0,75 кг 395 грн.	ABS флекс пластик MonoFilament 1,75 мм 0,75 кг 420 грн.	СОРЕТ пластик MonoFilament жельтий 1,75 мм 0,75 кг 397 грн.	ABS+ пластик Ріксівіте 1,75 мм 1 кг 400 грн.	ASA пластик MonoFilament 1,75 мм 0,75 кг 560 грн.
				
РЕТ пластик MonoFilament натуральний 1,75 мм 0,75 кг 425 грн.	Пластик Nylon Ріксівіте 1,75 мм 1,2 кг 440 грн.	Флекс пластик Ріксівіте 1,75 мм 0,9 кг чорний 480 грн.	СОРЕТ пластик MonoFilament 1,75 мм 0,75 кг 510 грн.	РЕТГ пластик Ріксівіте 1,75 мм 1,4 кг натуральний 550 грн.
				
РВТ пластик MonoFilament 1,75 мм 0,75 кг натуральний 540 грн.	ФЛЕХ пластик Ріксівіте 1,75 мм 0,9 кг натуральний 550 грн.	РЕТГ пластик Ріксівіте 1,75 мм 1,4 кг натуральний 550 грн.	РЕТГ пластик Ріксівіте 1,75 мм 1,4 кг натуральний 550 грн.	РЕТГ пластик Ріксівіте 1,75 мм 1,4 кг натуральний 550 грн.

# МІЦНІСТЬ МІЖШАРОВИХ З'ЄДНАНЬ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ В ТЕХНОЛОГІЯХ FDM-ДРУКУ

6

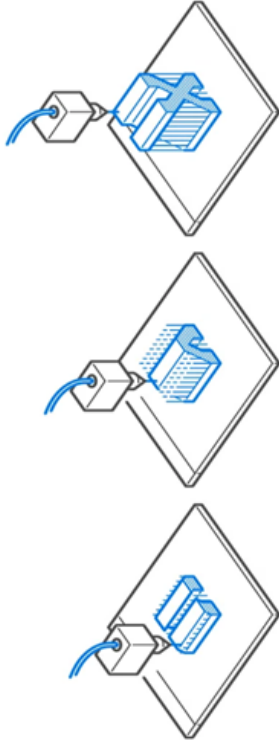
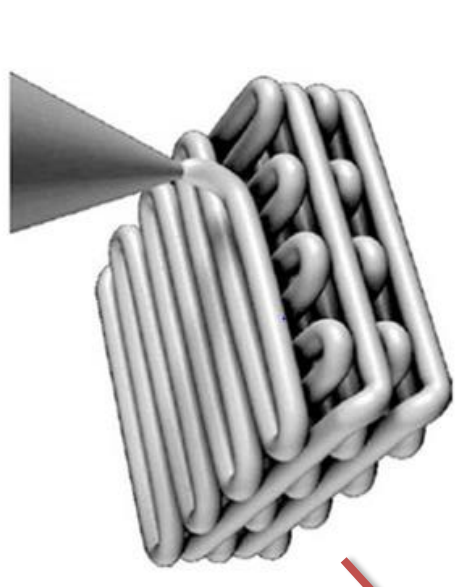
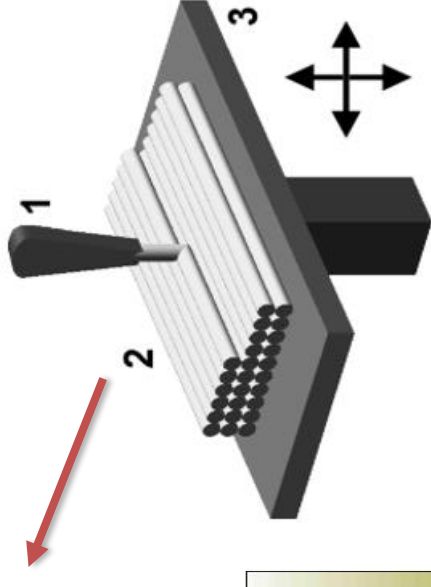
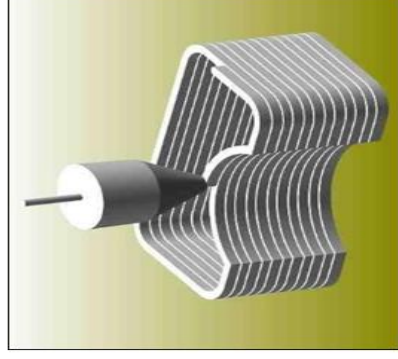
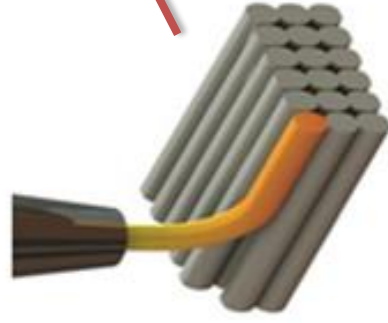


Рисунок 1.2 – Пошарове формування виробу за рахунок екструзії матеріалу



МІЦНІСТЬ МІЖШАРОВИХ  
З'ЄДНАНЬ, ЩІЛЬНІСТЬ  
КОНТАКТУ МІЖ ШАРАМИ  
ФІЛАМЕНТУ

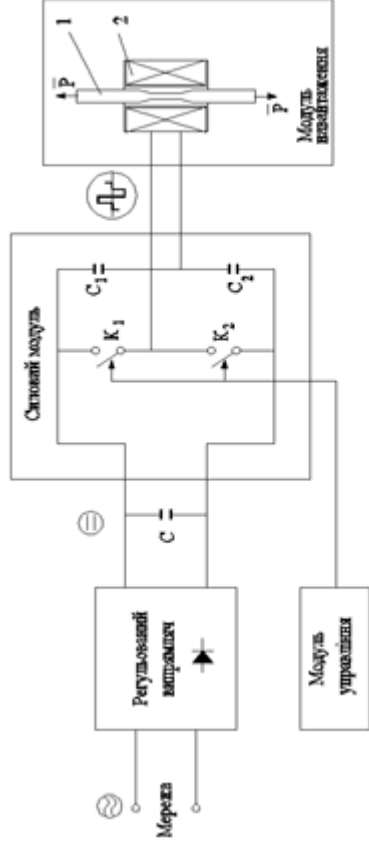


**Основна проблема** – забезпечення бездефектного пошарового формування в процесах FDM-друку.

Рисунок 1.1 – Схема формування шарів деталі

6

# УСТАНОВКА ДЛЯ МОДИФІКУВАННЯ ВИСОКОЧАСТОТНИМ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМ ІМПУЛЬСНИМ СТРУМОМ



1 – зразок з ПКМ; 2 – катушка намагнічення



Рисунок 2.2 – Блок-схема інвертора з модулем навантаження

Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд установки для модифікування ВИСОКОЧАСТОТНИМИ МАГНІТНИМИ ПОЛЯМИ

Таблиця 2.2 – Технічна характеристика інвертору

Показник	Значення показника
Застосування	Для створення електромагнітного впливу технологічного призначення
Вихідні параметри	Діапазони управління: - амплітуда напруги від 0 до 400 В, - амплітуда сили струму від 0 до 47 А, - робочих частот в діапазонах від 0,06 кГц до 1 кГц, від 0,6 кГц до 60 кГц, від 50 кГц до 3,0 МГц.
Управління	Плавне та високочоточне по всьому діапазону частот
Форма імпульсу	Прямокутний меандр

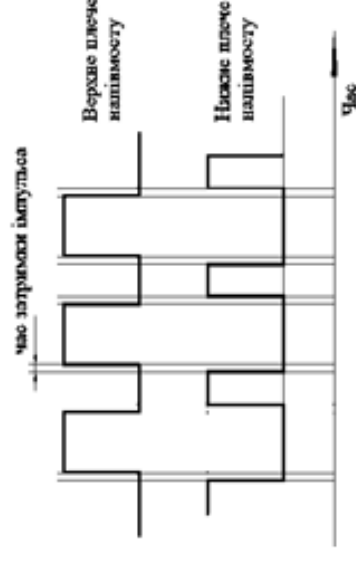

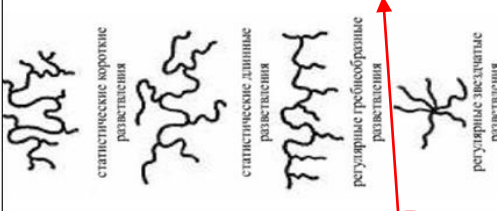
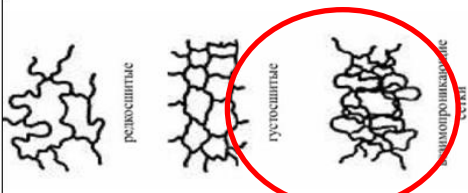
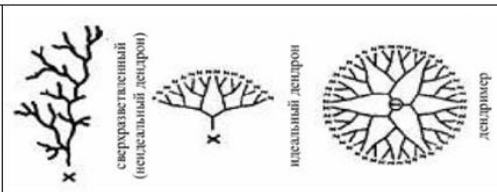


Рисунок 2.3 – Діаграми управляючих імпульсів

# ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ МІЦНОСТІ МІЖШАРОВИХ З'ЄДНАНЬ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ МІЖМОЛЕКУЛЯРНОЮ ВЗАЄМОДІЄЮ

Лінійні	Розгалужені	Зшиті	Дендриміри
 <p>глибокий клубок жесткий стержень</p>	 <p>статистичне коротке розгалуження статистичне довге розгалуження регулярне гребінообразне розгалуження регулярне зірчасте розгалуження</p>	 <p>редкошпигте густошпигте сшитий полімер</p>	 <p>сверхкритический (неидеальный дендрон) идеальный дендрон дендример</p>



1 – адгезив; 2 – підложка  
а) – адгезійне; в), с) – когезійне

Рисунок 3.3 – Види руйнування міжшарових з'єднань

Таблиця 1.2 – Середні значення міжмолекулярних сил

Тип зв'язків	Величина взаємодії, ккал / моль
Хімічний	300 – 800
Водневий	4 – 50
Донорно-акцепторний	2 – 40
Адсорбційний	10 – 15
Ван-дер-Ваальсовий	0,5 – 2

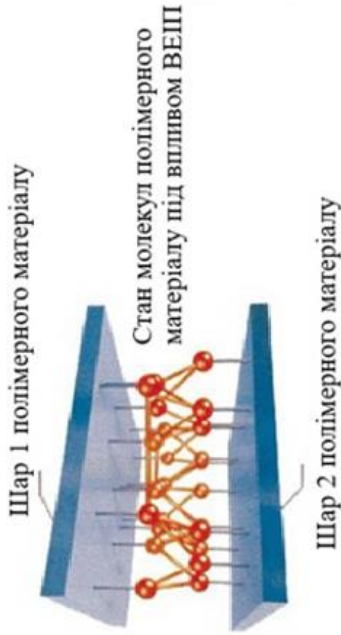


Рисунок 3.5 – Вид міжшарового з'єднання полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку

# МЕТОДИКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

## Методики дослідження міцності

9

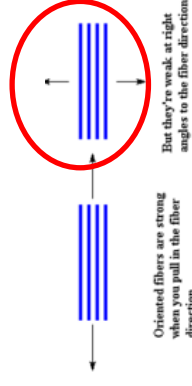
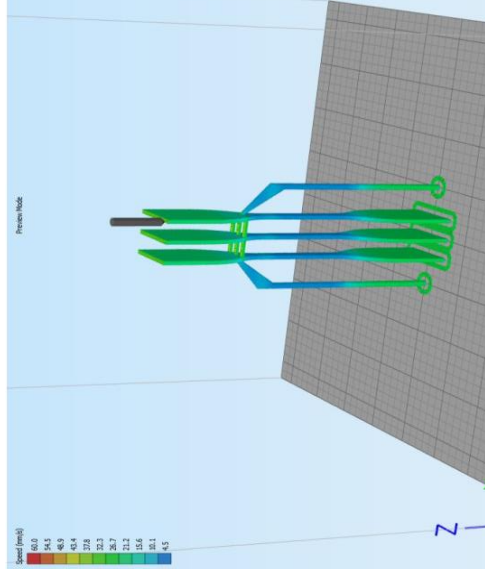
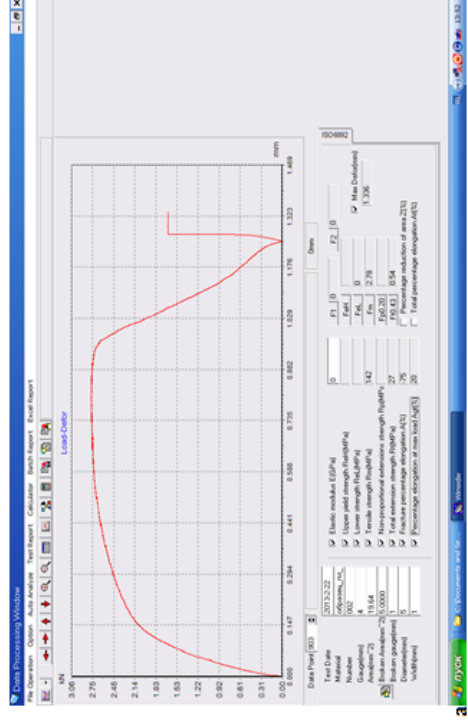


Рисунок 2.9 – Напрямки прикладання розривного зусилля на розривній машині UIT STM 050/300

4 – Разрывная машина UIT STM 050/300



а) б)

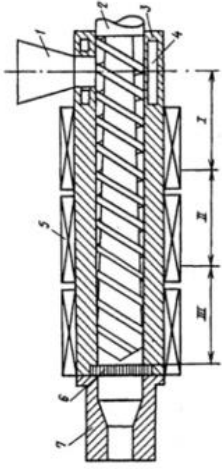
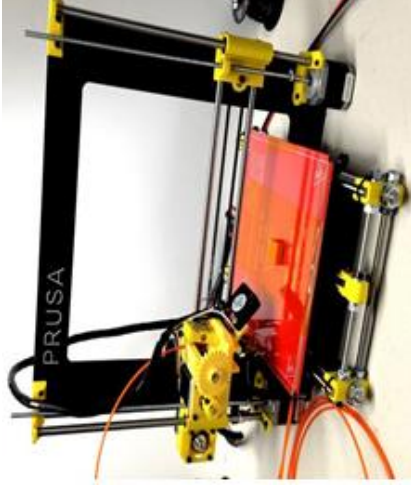
а) – зразки з ABS пластика; б) – зразки з PETG пластика

Рисунок 2.7 – Зразки з пластика після випробувань на розтяг

Екранна форма для результатів випробувань

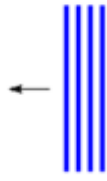
зразка матеріалу на розтягування

# ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВЕШ В ПРОЦЕСІ ГЕНЕРУВАННЯ ВИРОБУ

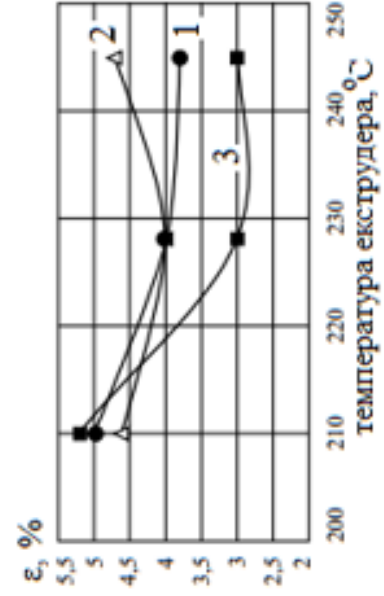
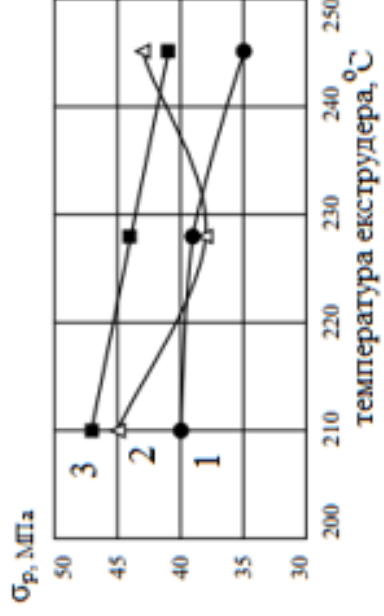


1 – бункер 2 – шнек; 3 – циліндр; 4 – охолоджуюча рідина; 5 – катушки ВЕШ; 6 – решітка; 7 – формуюча головка; I, II, III – технологічні зони

Рисунок 3.6 – Схема екструдера з модифікуванням ВЕШ



But they're weak at right angles to the fiber direction.



а) б)

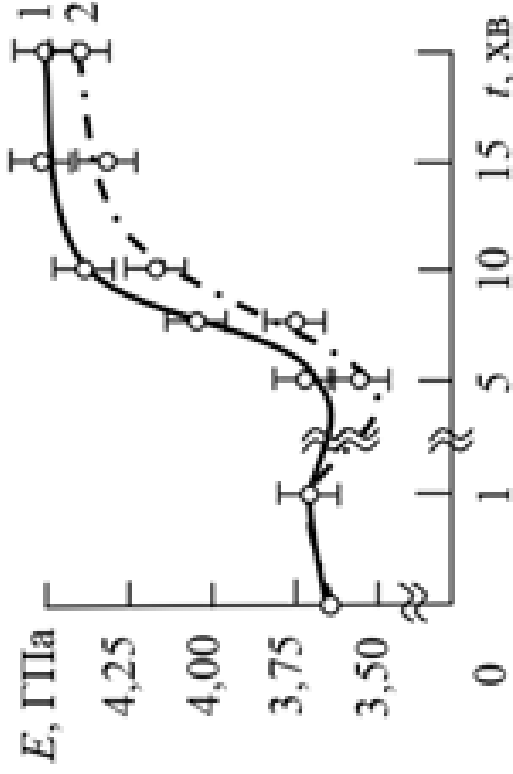
Швидкість нанесення розплаву: 1 – 0,04 м/с; 2 – 0,05 м/с; 3 – 0,06 м/с

а) – руйнуюча напруга розтягування (σ<sub>p</sub>); б) – відносне подовження розриву(ε);

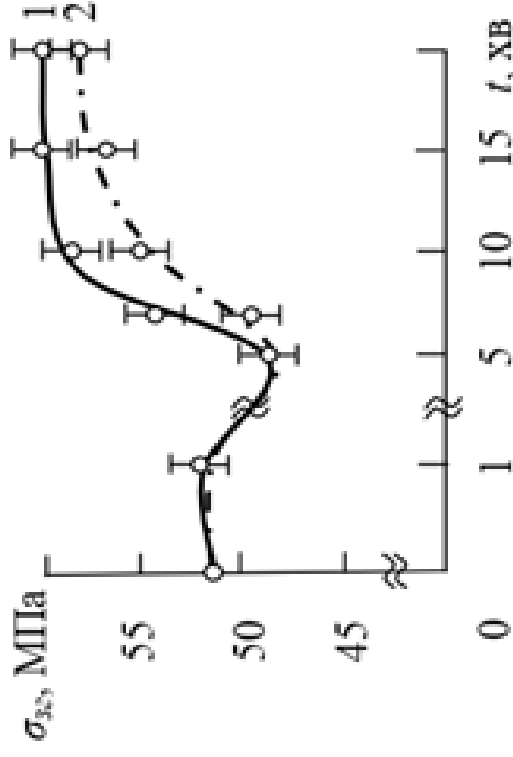
Рисунок 3.7 – Результати фізико-механічних

випробувань ABS-пластику

Дослідження фізико-механічних властивостей полімерів  
для модифікації в умовах пост-оброблення



а)



б)

Встановлено, що вплив електромагнітного поля високочастотного діапазону на ПМ підвищує міцність за рахунок релаксації внутрішніх напружень в з'єднанні і появи у адгезиву міцної поперечно-зшитої структури.

1 – ABS пластик з наповнювачем; 2 – ABS пластик

а) – модуль пружності  $E$ ; б) – руйнівних напружень при згинанні  $\sigma_{0.2}$

Рисунок 3.1 – Залежність модуля пружності і руйнівних напружень при згинанні ПКМ з наповнювачем частками сталі 45

1. Виконаний аналіз досягнутого рівня застосування адитивних технологій, можливостей способів модифікування полімерних матеріалів, виявив, що вони можуть бути застосовані для підвищення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку і пост-оброблення виробів.

2. Доведено, що обробка високочастотним електромагнітним полем (при частоті  $f = 2,25$  МГц і напруженості  $H = 1265$  А/м) приводить до поліпшення адгезійних властивостей полімерних матеріалів. Відбувається граничне зміцнення когезійного і адгезійного шву міжшарових з'єднань полімерних матеріалів за рахунок максимального заповнення мікрodefektів і збільшення на 15 – 20 % фізико-механічних характеристик міцності.

3. Доведено, що модифікування ПКМ доцільно проводити на протязі всього часу генерування для компенсації процесу охолодження виробу. При цьому температура початкового прогріву платформи встановлюється в інтервалі 180 – 185 °С.

4. Аналізуючи отримані результати в цілому слід зазначити, що для досягнення високих показників міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів для 3Д-друку, доцільно проводити обробку високочастотним електромагнітним полем безпосередньо ABS-пластиків в процесі генерування виробів і особливо протягом 15 хвилин в якості спеціальної операції пост-оброблення.

Вітаємо АНДРІЙ СУМІНОВ,

Ми завершили аналіз документа на плагіат:  
**ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ МІЖШАРОВИХ З'ЄДНАНЬ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ В ТЕХНОЛОГІЯХ FDM-ДРУКУ І ПОСТ-ОБРОБЛЕННЯ ВИРОБІВ**

Автор: Чорний Я.

Отримані коефіцієнти подібності:

Коефіцієнт подібності 1: 16.27%

Коефіцієнт цитування: 0.39%

Заміна букв: 26

прогалини: 0

Мікропробіли: 4

Інтервали: 0

Пошук контенту ШІ

Індикатор Контенту ШІ: ---

Щоб відкрити інтерактивний звіт, натисніть [сюди](#)

Якщо у Вас виникли запитання, зв'яжіться з нами за адресою:

[ukraine@strikeplagiarism.com](mailto:ukraine@strikeplagiarism.com)

Strikeplagiarism.com

Будь ласка, не відповідайте на це повідомлення. Додаткова інформація доступна на веб-сайті

<https://panel.strikeplagiarism.com>

Офіс Plagiat.pl Sp. z o.o., власник системи StrikePlagiarism.com, зареєстрований за адресою: м. Варшава, вул. Гданська 2/67, 01-633, ІПН: 5262874777, Період: 140124469, внесений до Національного судового реєстру Районного суду міста Варшава під номером KRS 0000236.

Ви отримали цей електронний лист, оскільки створили обліковий запис на сайті <https://panel.strikeplagiarism.com>. Якщо це не ви пройшли реєстрацію, будь ласка, зв'яжіться з нами.

## РЕЦЕНЗІЯ

«Підвищення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку і пост-оброблення виробів»,  
що виконана студентом групи МС-61-24 механічного факультету ХНАДУ  
Чорним Ярославом Руслановичем

Кваліфікаційна робота присвячена актуальній проблемі підвищення ефективності ресурсозберігаючих адитивних технологій, що можуть бути застосовані у виробництві і ремонті деталей машин. Предмет дослідження – підвищення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку і також пост-оброблення виробів. Вирішення цієї проблеми підвищує рівень бездефектності виробів в адитивних технологіях, розширює можливості застосування цих технологій. Способи забезпечення бездефектного пошарового формоутворення модифікуванням виробів застосовуються для усунення причин виникнення дефектів у виробах з метою вдосконалення технологій 3D-друку.

В кваліфікаційній роботі Чорного Я.Р. вивчалися процеси FDM-друку полімерними матеріалами, особливості перспективних способів модифікації виробів електромагнітною обробкою імпульсним полем, взаємозв'язок між режимними параметрами процесів формування міжшарових з'єднань і їх міцності.

Методи дослідження: для вивчення процесів FDM-друку із полімерів виробів застосовувались візуально-вимірні і оптичні методи, виконувались дослідження адгезії, твердості поверхонь, вивчалися умови застосування електромагнітної обробки імпульсним полем під час укладання матеріалу і в умовах пост-оброблення.

Виконаний аналіз досягнутого рівня продуктивності і якості формоутворення в адитивних технологіях показав, що існують проблеми міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку і пост-оброблення виробів.

Проведені експериментальні дослідження та визначені властивості полімерів дозволили сформулювати основні технічні вимоги до електромагнітної обробки імпульсним полем в умовах FDM-технології друку.

Загалом тема кваліфікаційної роботи узгоджується з перспективним напрямом дослідницьких робіт по створенню нових технологій полімерних матеріалів. Кваліфікаційна робота Чорного Я.Р. присвячена вирішенню актуальної проблеми, має елементи наукової новизни, що відповідають науково-технічному рівню кваліфікаційної роботи магістра.

Кваліфікаційна робота відповідає завданню, відноситься до категорії реальних дослідницьких робіт, оформлена згідно вимог стандартів, включає пояснювальну записку та демонстраційний матеріал у вигляді презентації в необхідному обсязі. Матеріал кваліфікаційної роботи викладений грамотно з використанням достатньої кількості літературних джерел.

Кваліфікаційна робота відповідає вимогам до випускних робіт ХНАДУ, заслуговує доброї оцінки, а її автор, Чорний Я.Р., присвоєння звання магістра за спеціальністю G8 «Матеріалознавство».

Рецензент кваліфікаційної роботи,  
доцент кафедри Матеріалознавства,  
НТУ «ХПІ», канд. техн. наук

Олена РЕБРОВА

" 7 " 12 2025 р.

Национальний технічний університет "Харківський національний університет імені Петра Могили"



МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АВТОМОБІЛЬНО-ДОРОЖНІЙ УНІВЕРСИТЕТ

В І Д Г У К

керівника кваліфікаційної роботи магістра,  
що виконана студентом групи МС-61-24 механічного факультету  
Чорним Ярославом Руслановичем,  
«Підвищення міцності міжшарових з'єднань полімерних  
матеріалів в технологіях FDM-друку і пост-оброблення виробів»

Кваліфікаційна робота присвячена актуальній проблемі підвищення ефективності ресурсозберігаючих адитивних технологій, що можуть бути застосовані у виробництві і ремонті деталей машин. Предмет дослідження – підвищення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку і також пост-оброблення виробів. Вирішення цієї проблеми підвищує рівень бездефектності виробів в адитивних технологіях, розширює можливості застосування цих технологій. Способи забезпечення бездефектного пошарового формоутворення модифікуванням виробів застосовуються для усунення причин виникнення дефектів у виробах з метою вдосконалення технологій 3D-друку.

В кваліфікаційній роботі Чорного Я.Р. вивчалися процеси FDM-друку полімерними матеріалами, особливості перспективних способів модифікації виробів електромагнітною обробкою імпульсним полем, взаємозв'язок між режимними параметрами процесів формування міжшарових з'єднань і їх міцності.

Методи дослідження: для вивчення процесів FDM-друку із полімерів виробів застосовувались візуально-вимірвальні і оптичні методи, виконувались дослідження адгезії, твердості поверхонь, вивчалися умови застосування електромагнітної обробки імпульсним полем під час укладання матеріалу і в умовах пост-оброблення.

Виконаний аналіз досягнутого рівня продуктивності і якості формоутворення в адитивних технологіях показав, що існують проблеми міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку і пост-оброблення виробів.

Кваліфікаційна робота має елементи наукової новизни та відповідає науково-технічному рівню кваліфікаційної роботи магістра. Кваліфікаційна робота виконана згідно до завдання, відноситься до категорії реальних дослідницьких робіт, оформлена згідно вимог стандартів, включає пояснювальну записку та демонстраційний матеріал у вигляді презентації в необхідному обсязі. Потрібно відзначити грамотність викладення змісту кваліфікаційної роботи, а також достатню повноту бібліографічних посилань.

В кінці роботи надані рекомендації щодо підвищення міцності міжшарових з'єднань полімерних матеріалів в технологіях FDM-друку і пост-оброблення виробів.

Кваліфікаційна робота відповідає вимогам до випускних робіт ХНАДУ, заслуговує оцінки “добре”, а її автор, Чорний Я.Р., присвоєння звання магістра за спеціальністю G8 – «Матеріалознавство».

Керівник кваліфікаційної роботи,  
канд. техн. наук, доц.



Ю.В. Дудукалов

“ 8 ” 12 2025 р.