

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний факультет
Кафедра машин та обладнання сільськогосподарського виробництва

Допущений до захисту:
Завідувач кафедри
д.т.н., професор Веселовська Н.Р.

(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)
«___» _____ 2023 р.

**РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ
ВІДНОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ З ВИКОРИСТАННЯМ 3D-ДРУКУ**

Робота на здобуття освітнього ступеня «Магістр»
за спеціальністю 133 «Галузеве машинобудування»

Виконав: студент групи: 61-Маш
Купчук Віталій Миколайович

Керівник: к.т.н., доцент
Шаргородський Сергій Анатолійович

Вінниця – 2023 р.

ВІННИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Інженерно-технологічний
факультет

Кафедра машин та обладнання
сільськогосподарського виробництва

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

д.т.н., професор Веселовська Н.Р.

(підпис, вчене звання, прізвище, ініціали)

« ____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ НА МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ

студенту _____ Купчук Віталій Миколайович

на тему

«Розробка та дослідження технологічного процесу відновлення деталей з використанням 3D-друку»

затверджену Наказом від 02 грудня 2022 року № 187м

Вихідні дані для підготовки роботи:

1. Методичні вказівки з виконання магістерської роботи.
2. План-проспект магістерської роботи.
3. Підручники і навчально-методичні посібники, статистичні дані.
4. Наукові видання (монографії, книги, збірники, журнали, методики, матеріали ЦНТІ).
5. Методика економічної оцінки результатів досліджень.
6. Дані власних досліджень, одержаних в попередній період.

Календарний план виконання магістерської роботи

Структура роботи		Обсяг стор.	Термін підготовки
Анотація		2	Лютий 2023 року
Вступ		2	Березень 2023 року
Розділ 1	Аналіз стану питання ремонту сільськогосподарської техніки з використанням полімерних деталей	31	Квітень 2023 року
Розділ 2	Теоретичне обґрунтування способу виготовлення запасних частин за допомогою 3D-друку з вакуумним просоченням	25	Квітень 2023 року
Розділ 3	Програма і методики проведення експериментальних досліджень	14	Липень 2023 року
Розділ 4	Результати експериментальних досліджень	18	Серпень - Листопад 2023 року
Висновки		2	Жовтень 2023 року
Список використаних джерел		6	Листопад 2023 року

Термін подання роботи на кафедру

для попереднього захисту «__» _____ 2023 р.

Завдання видано «05» Грудня 2022 р.

Завдання прийняв до виконання _____ В.М. Купчук

Керівник _____ С.А. Шаргородський к.т.н., доцент
(підпис)

АНОТАЦІЯ

Магістерська робота складається зі вступу, 4 розділів, висновку, списку використаної літератури. Повний обсяг роботи 105 сторінки, у тому числі 99 сторінок основного тексту, 77 рисунків та 18 таблиць.

Робота присвячена вирішенню актуальної практичної задачі, що полягає у зниженні витрат на реновацію технічних засобів за рахунок застосування 3D-друку з вакуумним просоченням для запасних частин із полімерних композиційних матеріалів.

При виконанні огляду наукової літератури було встановлено, що перспективним методом підвищення властивостей міцності 3D-друкованих виробів є метод пост-обробки, що полягає у вакуумному просоченні деталей в полімерних компаундах. Така обробка дозволить склеїти шари пластику один з одним, зменшуючи тим самим анізотропію властивостей міцності і підвищуючи конструкційну міцність.

На основі аналізу матеріалів, що використовуються для виготовлення деталей за технологією FDM-друку, були обрані матеріали для виготовлення запасних частин за допомогою 3D-друку з вакуумним просоченням для ремонту сільськогосподарської техніки – пластики PLA та ABS через низькі значення температури друку до 250 °C та усадки до 0,8%, а також високих значень межі міцності до 35 МПа та відносного подовження до 6%.

За результатами експериментів було встановлено, що оптимальним часом витримки задля досягнення найкращої якості просочення є 30 хв. Частота появи пор у композиті на основі 3D-друкованого каркасу, просоченого епоксидною смолою, зменшується зі збільшенням відсотка заповнення та товщини стінки. Отримано залежність міцності та ударної в'язкості композитів на основі 3D-друкованих каркасів від щільності заповнення 20, 33, 50 % та напрямки укладання шарів пластику в процесі друку вздовж або впоперек осі зразка.

Ключові слова: адитивні технології, полімерні матеріали, 3D-друк, міцність, просочування, компаунди.

ANNOTATION

The master's thesis consists of an introduction, 4 chapters, conclusion, list of used literature. The total volume of the work is 105 pages, including 99 pages of the main text, 77 figures and 18 tables.

The work is dedicated to the most pressing practical task, which aims to reduce costs for the renovation of technical features for the design of 3D-printing sealing with vacuum leaks for spare parts made of polymer composite materials.

A recent review of the scientific literature revealed that a promising method for increasing the value of 3D-printing devices is the post-processing method, which is used for vacuum infiltration of parts in polymer compounds. This procedure allows the plastic balls to be glued together one by one, thereby changing the anisotropy of the power of value and the moving construction value.

Based on the analysis of materials that are used for the production of parts using FDM technology, materials were selected for the production of spare parts using an additional 3D-printing with vacuum infiltration for the repair of agricultural equipment - PLA and ABS plastics through low temperature values up to 250 °C and shrinkage up to 0.8%, as well as high values of interimportance up to 35 MPa and flow reduction up to 6%.

Based on the results of the experiments, it was established that the optimal winding time for reaching the deepest juice was 30 minutes. The frequency of pores appearing in a composite based on a 3D-printing frame infiltrated with epoxy resin changes with increasing thickness and thickness of the wall. The content of the value and impact toughness of composites based on 3D-printing frames was determined at filling thicknesses of 20, 33, 50% and the direct laying of plastic balls in the process of either sideways or across the axis.

Key words: additive technologies, polymer materials, 3D printing, strength, infiltration, compounds.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ РЕМОНТУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛІМЕРНИХ ДЕТАЛЕЙ.....	10
1.1 Традиційні способи виготовлення запасних частин із полімерних і композиційних матеріалів.....	10
1.1.1 Лиття під тиском.....	11
1.1.2 Пресування.....	13
1.1.3 Вакуум- і пневмоформування.....	15
1.1.4 Вільне лиття.....	15
1.1.5 Механічне оброблення.....	17
1.1.6 Методи виготовлення деталей із композитів на основі реактопластів.....	18
1.1.7 Методи виготовлення деталей із композитів на основі термопластів.....	23
1.2 Адитивні способи виготовлення запасних частин із полімерних і композиційних матеріалів.....	30
1.2.1 Моделювання методом пошарового наплавлення.....	32
1.2.2 Лазерна стереолітографія.....	34
1.2.3 Селективне лазерне спікання.....	35
1.3 Аналіз випадків застосування 3D-друку для виготовлення запасних частин різних машин.....	36
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАПАСНИХ ЧАСТИН ЗА ДОПОМОГОЮ 3D- ДРУКУ З ВАКУУМНИМ ПРОСОЧЕННЯМ.....	41
2.1 Обґрунтування вибору матеріалів і технологічних параметрів виготовлення 3D-друкованих каркасів.....	41
2.1.1 Огляд матеріалів, що застосовуються при 3D-друку за технологією FDM.....	41
2.1.2 Аналіз технологічних факторів 3D-друку за технологією FDM.....	43
2.2 Обґрунтування вибору просочувальних складів.....	50
2.2.1 Епоксидні компаунди.....	51

2.3 Теоретичний аналіз процесів в'язкої течії полімерних компаундів під час здійснення просочення.....	56
2.3.1 Особливості в'язко-текучої поведінки полімерів.....	56
2.4 Розроблення методики розрахунку максимально можливої товщини деталі під час вакуумного просочення 3D-друкованого каркаса.....	61
РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	66
3.1 Розробка програми та методики досліджень просочуваності 3D-друкованих каркасів залежно від геометрії каркаса.....	66
3.2 Програма досліджень механічних властивостей композитів.....	69
3.2.1 Розробка плану експерименту з дослідження впливу внутрішньої геометрії каркасів на механічні властивості композиту.....	69
3.2.2 Розроблення плану експерименту з дослідження впливу хімічного складу компаунда та режиму затвердіння на механічні властивості композиту.....	72
3.3 Методики випробувань.....	75
3.3.1 Визначення пористості з використанням методу.....	75
3.3.2 Методика випробувань на розтягнення.....	76
3.3.3 Методика випробувань на ударну в'язкість.....	78
РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ.....	80
4.1 Результати дослідження просочуваності 3D-друкованих каркасів різної геометрії компаундами.....	80
4.2 Результати дослідження пористості зразків із різною геометрією 3D-друкованого каркаса для механічних випробувань.....	87
4.3 Результати дослідження залежності механічних властивостей композитів від складу просочувального компаунда та режиму затвердіння.....	89
4.3.1 Результати випробувань на розтягнення.....	89
4.3.2 Результати випробувань на ударну в'язкість.....	94
ВИСНОВКИ.....	98
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	100

ВСТУП

Актуальність теми. У конструкціях сучасних сільськогосподарських машин дедалі більшого застосування знаходять деталі, виготовлені з полімерних матеріалів. Одночасно з поширенням полімерних деталей виникає проблема їх швидкої заміни в разі виходу з ладу. Як показує практика, найчастіше для виробників і дилерів техніки виявляється нерентабельним виготовлення і продаж запасних частин з полімерів. Замість них пропонується придбати цілий вузол, який на порядок дорожчий за зламану полімерну деталь. Проблемою є також і великі терміни постачання окремих деталей або вузлів через специфіку роботи наявних ланцюжків постачання запасних частин. Таким чином, терміни ремонту значно збільшуються, що згубно позначається на прибутковості підприємств агропромислового комплексу через крайню обмеженість часу виконання більшості агротехнічних робіт.

Альтернативою закупівлі запасних полімерних частин є їх самостійне виготовлення з використанням адитивних технологій.

Метою роботи є зниження витрат на реновацію технічних засобів за рахунок застосування 3D-друку з вакуумним просоченням для запасних частин із полімерних композиційних матеріалів.

Для досягнення поставленої мети вирішувалися наступні завдання:

1. Розробити спосіб виготовлення полімерних запасних частин для сільськогосподарської техніки з використанням 3D-друку на основі аналізу наявних підходів;
2. Розробити методику розрахунку максимально можливої товщини деталі під час вакуумного просочення 3D-друкованого каркаса полімерними компаундами;
3. Розробити методику експериментальної оцінки просочуваності 3D-друкованих каркасів полімерними компаундами у вакуумі;
4. Провести експериментальні дослідження впливу геометричних параметрів 3D-друкованих каркасів на їхнє просочуваність полімерними

компаундами та механічні властивості одержуваних композиційних матеріалів;

5. Провести експериментальні дослідження впливу складу просочувального компаунда і режиму затвердіння на механічні властивості композиційних матеріалів на основі 3D-друкованих каркасів.

Об'єктом дослідження є технологічний процес виготовлення запасних частин із полімерних композиційних матеріалів за допомогою 3D-друку з вакуумним просоченням для сільськогосподарської техніки.

Предметом дослідження є технологічний процес виготовлення запасних частин із полімерних композиційних матеріалів за допомогою 3D-друку з вакуумним просоченням для сільськогосподарської техніки.

Методи дослідження. Експериментальні дослідження виконані за оригінальними та відомими методиками з використанням сучасного науково-дослідного обладнання та засобів Центру інноваційних технологій Вінницького національного аграрного університету.

Наукову новизну становить: методика розрахунку максимально можливої товщини деталі під час вакуумного просочення 3D-друкованого каркаса полімерними компаундами; методика експериментальної оцінки просочуваності 3D-друкованих каркасів полімерними компаундами у вакуумі; закономірності впливу геометрії 3D-друкованого каркаса (товщини стінок і відсотка заповнення) на його просочуваність полімерними компаундами; закономірності зміни міцності та ударної в'язкості композитів на основі 3D-друкованих каркасів, просочених епоксидною смолою, від складу компаунду і режиму затвердіння після просочення.

Достовірність отриманих результатів. Достовірність отриманих результатів підтверджується проведенням вимірювань достатньої вибірки сертифікованого обладнання та підтверджується збіжністю аналітичних результатів з експериментальними даними. Це дозволило забезпечити обґрунтованість і доказовість прийнятих підходів і отриманих результатів.

РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПИТАННЯ РЕМОНТУ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКОЇ ТЕХНІКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ПОЛІМЕРНИХ ДЕТАЛЕЙ

1.1 Традиційні способи виготовлення запасних частин із полімерних і композиційних матеріалів

Вироби з полімерів, що входять до конструкцій сільськогосподарської техніки, мають різні форми і розміри. Різноманіття форм деталей, а також використовуваних для їх виготовлення полімерів, визначає широкий спектр технологій виготовлення цих деталей. Вибір того чи іншого методу виготовлення також багато в чому залежить від обсягу партії вироблених виробів. Наприклад, якщо для виробництва дрібних деталей із термопластів масовими тиражами найпродуктивнішим і найрентабельнішим є лиття під тиском, то для великих масивних виробів - гаряче пресування або контактне формування (табл. 1.1) [20].

Таблиця 1.1 – Залежність економічно ефективного обсягу виробництва виробів із пластмас від способу переробки

Спосіб переробки	Обсяг виробництва, шт.
Механічне оброблення	1-100
Термоформування	100-1000
Вільне лиття	500-1000
Ротаційне формування	500-1000
Пресування	1000-2000
Екструзія	1000-3000
Екструзія з роздуванням	3000-10 000
Лиття під тиском	10 000-100 000

Для виробництва одного і того ж полімерного виробу часто можна застосувати різні способи виробництва, і вибір оптимального методу проводиться на основі всебічної техніко-економічної оцінки. Економічна оцінка доцільності вибору того чи іншого методу виробництва полімерних виробів багато в чому базується на оцінці вартості виготовлення оснащення для цього методу, оскільки вартість оснащення закладається у вартість

кожного виробу, випущеного за її допомогою. Таким чином, якщо метод виробництва вимагає дорогого оснащення, то рентабельний він лише в тому разі, якщо випущена партія полімерних виробів досить велика.

1.1.1 Лиття під тиском

Одним із найбільш високопродуктивних процесів виготовлення виробів із полімерів є лиття під тиском. У процесі лиття під тиском (рис. 1.1) гранули полімеру пластифікуються під час обертання черв'яка в нагрівальному (інжекційному) циліндрі ливарної машини [20]. Машини, на яких проводять лиття під тиском, називаються термопластавтоматами (рис. 1.2).

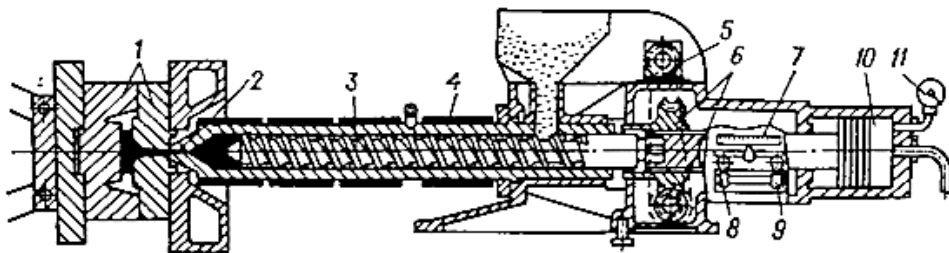


Рис. 1.1 – Схема машини для лиття під тиском: 1 - форма; 2 - сопло; 3 - черв'як; 4 - електронагрівач; 5 - гідродвигун; 6 - черв'ячний редуктор; 7 - шкала регулювання впорскування; 8, 9 - кінцеві вимикачі ходу черв'яка; 10 - гідроциліндр; 11 - манометр



Рис. 1.2 – Зовнішній вигляд ливарної машини (термопластавтомат)

Виріб у разі використання ливарних машин формується в спеціальних прес-формах (рис. 1.3). Їхня будова досить складна, оскільки вони містять складні ливарні канали, іноді з підігрівом, а також канали охолодження. До того ж у процесі лиття використовуються досить великі тиски, внаслідок чого для виготовлення форм придатні тільки метали, найчастіше сталі. Усі перераховані вище фактори зумовлюють високу вартість і трудомісткість виготовлення цих прес-форм, унаслідок чого їхня вартість починається від 300 тис. грн. Висока вартість форм призводить до того, що використання лиття під тиском рентабельне лише в разі великосерійного або масового виробництва.

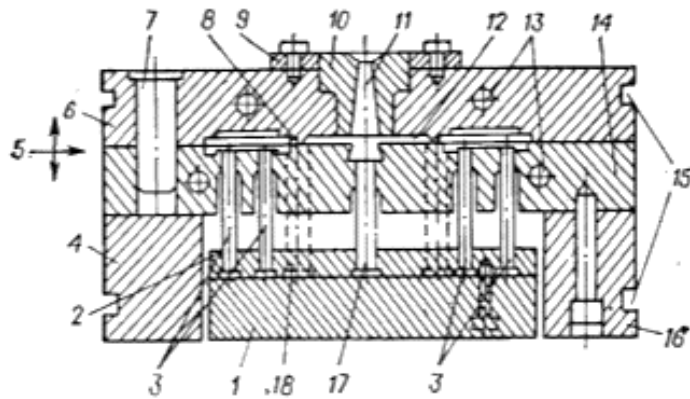


Рис. 1.3 – Ливарна форма звичайного типу: 1,2-нижня і верхня з'єднувальні планки системи штовхання; 3 - виштовхувачі; 4,16 - підкладки; 5 - площина роз'єму; 6 - матриця форми; 7 - напрямна колонка; 8 - впуск; 9 - напрямна кільця; 10 - літнікова втулка; 11 - літинковий канал; 12 - канал для розведення; 13 - канал для охолодження; 14 - пуансон; 15 - пази для кріплення; 17 - центральний виштовхувач (виштовхувач ливника); 18 - штифт для зворотного приземлення виштовхувача.

Перевагою цієї технології є можливість виготовляти вироби будь-якої геометричної форми, а також у широкому діапазоні мас від часток грама до кількох кілограмів.

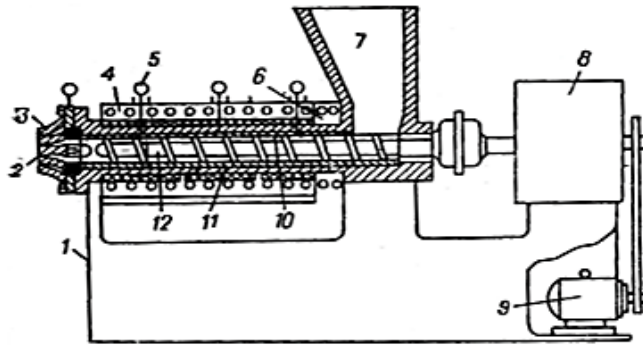


Рис. 1.4 – Спрощена схема однострув'ячного екструдера: 1 - станина; 2 - дорн; 3 - мундштук; 4 - система обігріву; 5 - термопара; 6 - система охолодження; 7 - завантажувальний бункер; 8 - редуктор; 9 - електродвигун; 10 - внутрішня гільза циліндра; 11 - нагрівальний циліндр; 12 – черв'як

Під час екструзії гранули полімеру надходять у нагрівальний циліндр, усередині якого знаходиться робочий орган – черв'як. Нагрівальний циліндр і черв'як умовно ділять на три зони: 1) завантажувальна, в якій відбувається ущільнення гранул, що надійшли; 2) зона стиснення, в якій матеріал поступово розплавляється і пластифікується завдяки теплоті, що підводиться від розташованих зовні циліндра нагрівачів, і теплоті внутрішнього тертя в матеріалі; 3) дозувальна, у якій весь гвинтовий канал черв'яка виявляється заповненим розплавом полімеру [20].

Екструзію широко використовують для виготовлення виробів простого незмінного перерізу, наприклад, труб, листів, плівок тощо.

1.1.2 Пресування

Суть технології пресування полягає в тому, що пресований матеріал у вигляді аркуша завантажується в прес-форму і під дією теплоти та тиску приймає її конфігурацію (рис. 1.5). Пресування зазвичай застосовується для переробки реактопластів, оскільки для термопластів більш рентабельні методи екструзії, лиття під тиском, вакуум- і пневмоформування. Однак у

деяких випадках, наприклад при отриманні масивних великогабаритних виробів, і термопласти переробляють пресуванням [20].



Рис.1.5 – Схема створення деталей із полімерних матеріалів методом пресування до (а) і після (б) змикання форм: 1 - попередньо нагріта заготовка; 2 - готовий виріб

Конструкції прес-форм у цьому разі мають схожі ознаки з формами, використовуваними під час лиття під тиском (рис. 1.6). Ці форми виготовляють зі сталей, що витримують вплив високих температур і навантажень.

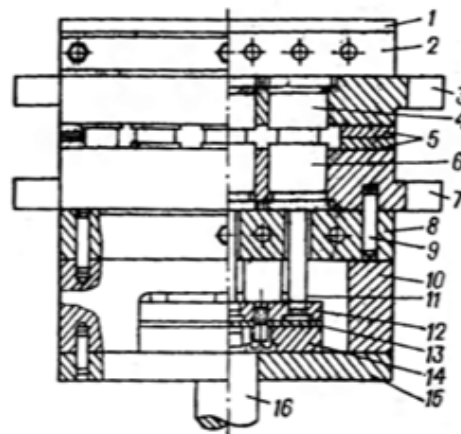


Рис. 1.6 - Багатогніздова прес-форма: 1 - верхня підкладка; 2 - верхня плита обігріву; 3 - обойма пуансонів; 4 - пуансон; 5 - опорні планки; 6 - матриця; 7 - обойма матриць; 8 - опорна плита (нижня плита обігріву); 9 - контрольний штифт; 10 - нижня підкладка; 11 - виштовхувач; 12 - верхня сполучна планка виштовхувачів; 13 - проміжна прокладка; 14 - нижня сполучна планка виштовхувачів; 15 - нижня плита; 16 - шпindelь

Пресування використовують під час виробництва відносно тонкостінних виробів, площею не більше $2,5 \dots 3 \text{ м}^2$, з не дуже високими вимогами до якості зовнішньої поверхні [20].

1.1.3 Вакуум- і пневмоформування

На відміну від попереднього методу, під час вакуум- і пневмоформування використовуються невеликі тиски в межах 1 атм. і спрощене оснащення (рис. 1.7). У цьому разі заготівля у вигляді полімерного листа формується завдяки створенню вакууму в порожнині між заготівлею і формою (вакуумформування) або тиску на заготівлю стисненого повітря (пневмоформування) [20].

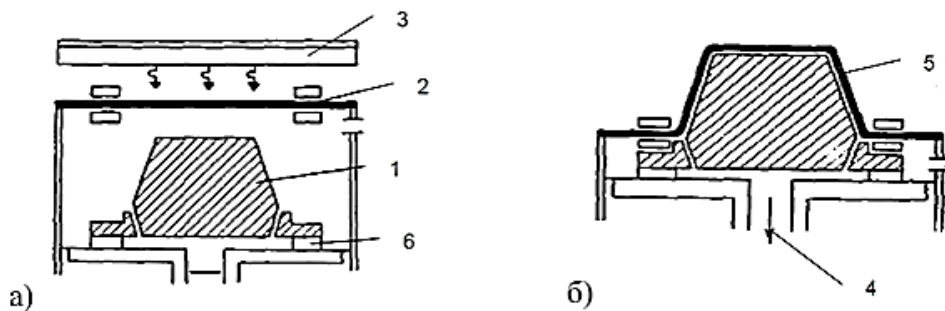


Рис. 1.7 – Схема початку (а) і закінчення (б) процесу створення деталей із термопластичних полімерів методом вакуумформування

Вакуум- і пневмоформування може бути застосовано тільки для виробів з однаковою товщиною по всьому перерізу, таких як кришки, корпуси тощо. Цей метод, порівняно з попередніми, ширше застосовують у дрібносерійному виробництві, оскільки технологічне оснащення, що використовується, набагато простіше і дешевше. Її часто виготовляють пошарово з деревоволокнистих плит з подальшим склеюванням.

1.1.4 Вільне лиття

Вільне лиття являє собою спосіб виробництва виробів з полімерних матеріалів, за якого рідку композицію заливають самопливом або під дуже

невеликим тиском у форму і твердіють у ній без тиску [20]. Великого поширення для виробництва виробів методом вільного лиття зараз набули вакуумноливарні машини, в яких процес дозування, перемішування компонентів і заливання суміші у форму здійснюється у вакуумі для поліпшення якості готових виробів (рис. 1.8).



Рис. 1.8 – Автоматична вакуумно-ливарна машина FVC-2A

Основним обмеженням застосування цього методу формування деталей є номенклатура використовуваних матеріалів. Як сировину під час вільного лиття можна використовувати матеріали, які у вихідному стані мають відносно низьку в'язкість, тобто різні термореактивні полімери, наприклад, пластизолі та олігомерні композиції.

Пластизолі являють собою концентровані дисперсії полімерів в органічних рідинах. Промислове застосування знайшли пластизолі на основі полівінілхлориду. Затвердіння пластизолів відбувається за підвищеної до 80-100 °С температури внаслідок желатинізації. Під час желатинізації матеріал завдяки сплавленню первинних структур полімеру набуває однорідності та міцності [20].

Олігомерні композиції складаються з двох компонентів: основи (власне олігомеру) і спеціальних добавок (затверджувача). Затвердіння цих матеріалів відбувається після змішування основи та затверджувача в

результаті хімічних реакцій і може протікати як за кімнатної, так і за підвищеної температури. Широко застосовують у промисловості такі олігомери, як епоксидні, поліефірні, кремнійорганічні, фенолформальдегідні смоли, олігоефіракрилати, олігоефіруретани, рідкі каучуки тощо [20].

Екструзію широко використовують для виготовлення виробів простого незмінного перерізу, наприклад, труб, листів, плівок тощо.

1.1.5 Механічне оброблення

Майже всі полімерні матеріали легко піддаються різанню на звичайному металорізальному обладнанні, проте механічне оброблення часто призводить до утворення тріщин у поверхневому шарі матеріалу та появи в ньому залишкових напружень, у зв'язку з чим цей метод рекомендують розглядати як можливий, але небажаний спосіб виготовлення виробів із полімерів [20].

Під час виготовлення виробів із полімерів із застосуванням механічної обробки використовують класичні методи, які застосовують і під час обробки металів, як-от точіння, фрезерування, шліфування. Підходять і стандартні верстати та інструмент, що застосовуються для обробки металів. Основною відмінністю процесів механічного оброблення полімерів від процесів механічного оброблення металів є значне розігрівання полімерів у процесі оброблення, що, зважаючи на невисоку теплостійкість цих матеріалів, може призвести до їхньої деструкції. У зв'язку з цим під час механічної обробки полімерів застосовують більш інтенсивне охолодження і більш щадні режими порівняно з металами.

Одним зі значних недоліків механічного оброблення як методу виготовлення виробів із полімерів є неможливість отримати вироби порівняно складних форм порівняно з попередніми розглянутими методами.

1.1.6 Методи виготовлення деталей із композитів на основі реактопластів

Напилення. Метод напилення використовується для виробництва полімерних композиційних матеріалів (ПКМ), армованих рубаним волокном. Схему процесу представлено на рис. 1.9.

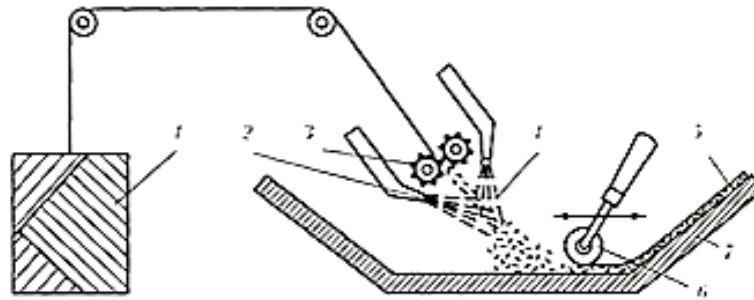


Рис. 1.9 – Схема створення деталей із ПКМ методом напилення рубленого волокна: 1 - бобіна з безперервним волокном; 2 - сполучна речовина; 3 - пристосування для різання волокна; 4 - активатор процесу затвердіння; 5 - шар сполучної речовини з армувальними наповнювачами; 6 - прикочувальний валик; 7 - оснащення.

Під час використання цього методу на попередньо підготовлену поверхню оснащення наноситься одночасно сполучна речовина і рубане волокно. Після нанесення рубленого волокна і сполучного, здійснюється прикочування валиком (для видалення повітряних включень). Після затвердіння сполучного готовий виріб знімають із форми [21].

Перевагою цього методу є можливість виготовлення великогабаритних виробів, як-от різні корпуси, і низька вартість використовуваного обладнання, оснащення, витратних матеріалів (можна застосовувати відходи безперервних волокон, що застосовуються в інших процесах), у зв'язку з чим метод напилення можна застосовувати в одиничному і дрібносерійному виробництві. Недоліками є великі витрати ручної праці, залежність якості одержуваного виробу від кваліфікації формувальника, шкідливі умови праці [21].

Намотування. При використанні цього методу армувальний матеріал у вигляді безперервного волокна (джгута, стрічки або нитки) намотується на обертову оправку [22]. Зв'язувальну речовину в цьому процесі наносять або до початку виконання намотування, тоді такий метод намотування називають "сухим", або в процесі виконання самого намотування, у цьому разі він отримав назву "мокрый". На рис. 1.10 показано схему "морого" намотування.

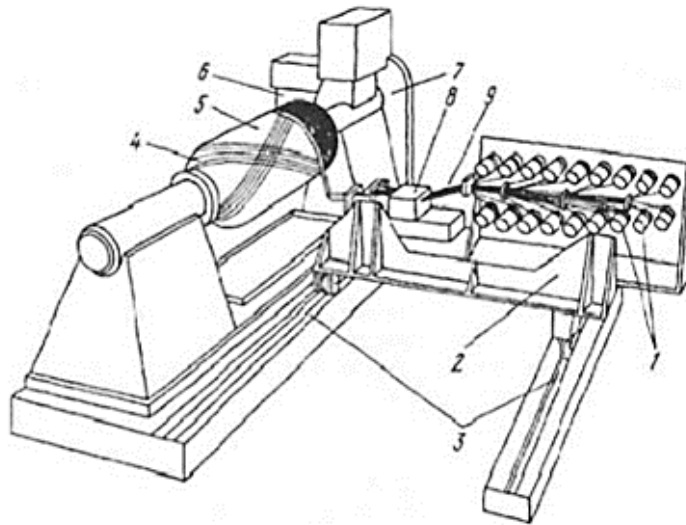


Рис. 1.10 – Схема "морого" намотування безперервного волокна: 1 - шпулі з нитками; 2 - шпулярник; 3 - напрямні переміщення укладально-просочувального тракту; 4 - спіральні шари; 5 - оправлення; 6 - окружні шари; 7 - привід обертання; 8 - ванна зі сполучною речовиною; 9 - сформована односпрямована стрічка

Перевагами цього методу є висока якість одержуваних виробів і висока продуктивність процесу. Недоліком є висока вартість застосовуваного обладнання та обмеженість форм одержуваних виробів. Широкого поширення цей метод набув для виробництва балонів високого тиску, баків, трубопроводів.

Пултурзія. Ця технологія отримала назву від англійських слів "pull" - тягнути і "extrusion" - екструзія [23]. Її сутність полягає в протягуванні пучка

безперервних волокон, змочених сполучною речовиною, через формувальну фільєру (рис. 1.11).



Рис. 1.11 – Схема створення деталей із ПКМ методом пултрузії

Цей метод є високопродуктивним і легко автоматизованим, одержувані вироби мають високі властивості міцності за рахунок високого вмісту волокна в перерізі та можливості здійснення якісного повного просочення. Недоліками є висока вартість обладнання та обмеженість форми одержуваних виробів [23]. Широке застосування метод отримав у великосерійному виробництві, типовим прикладом застосування є виготовлення будівельної арматури.

Контактне формування у відкритих формах. Контактне формування у відкритих формах виробляють із препрегів, що являють собою композиційні матеріали-напівфабрикати з аркушів тканих або нетканих волокнистих матеріалів, просочених невідтверділими полімерними зв'язувальними [24]. Схему процесу представлено на рис. 1.12.

Першою операцією під час контактного формування є нанесення на поверхню форми спеціальних матеріалів (антиадгезивів), які не дають змоги приклеїтися препрегам до поверхні форми. Далі пошарово викладають препрег, прокочуючи кожен шар валиком для видалення повітря. Останньою

операцією є затвердіння сполучної речовини, для чого може бути задіяний нагрів.

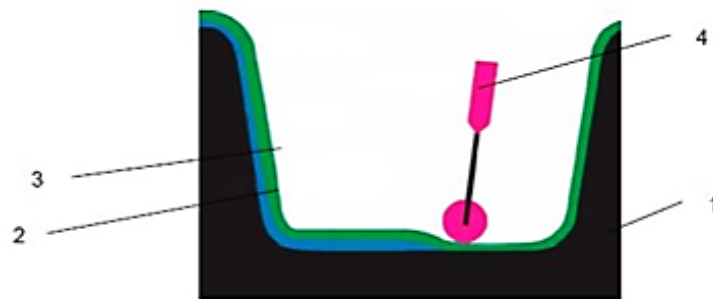


Рис. 1.12 – Схема створення деталей із ПКМ методом контактного формування з препрегів у відкритих формах: 1 - оснащення; 2 - армувальний матеріал; 3 - сполучна речовина; 4 - прикочувальний валик

Перевагами цього методу є низька вартість оснащення і простота виконання технологічного процесу. Недоліком є великі витрати ручної праці та велика кількість відходів препрегів, висока ймовірність виникнення повітряних бульбашок у деталях.

Вакуумна інфузія. Вакуумна інфузія є одним із найпоширеніших методів виробництва виробів із непідготовленого (сухого) тканого наповнювача [25]. Схему створення деталей із ПКМ методом вакуумної інфузії наведено на рис. 1.13. Першим етапом під час виготовлення ПКМ методом вакуумної інфузії є нанесення гелькоуту (захисно-декоративного покриття) на поверхню оснащення. Далі укладають шари сухої тканини в необхідній кількості. Після укладання тканину закривають плівкою і герметично приклеюють її до поверхні оснащення. До отриманого пакета також герметично підводять через трубку ємність зі сполучним, а назовні виводять трубку, приєднану до вакуумного насоса. Під час увімкнення насоса в пакеті створюється розрядження, внаслідок чого сполучна речовина спрямовується всередину області низького тиску і відбувається просочування тканини.

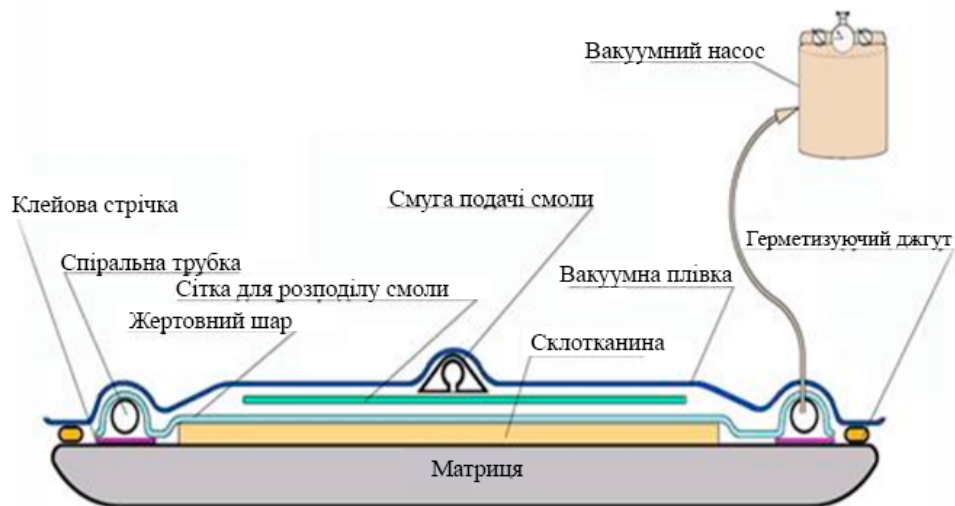


Рис. 1.13 – Схема створення деталей із ПКМ методом вакуумної інфузії.

Після завершення просочення проводять затвердіння деталі, іноді в автоклавах для усунення можливих бульбашок і підвищення якості виробів. Перевагами цього методу є низька вартість використовуваного оснащення, простота реалізації методу, поліпшення умов праці формувальника. Недоліком є високий ступінь залежності якості одержуваних виробів від кваліфікації формувальника.

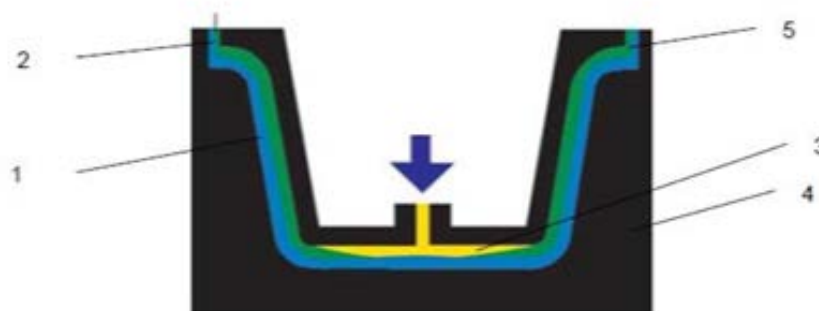


Рис. 1.14 – Схема створення деталей із ПКМ методом RTM: 1 - антиадгезивний склад; 2 - армувальний матеріал; 3 - сполучна речовина; 4 - матриця; 5 – пуансон

Просочення під тиском (RTM-технологія). Суть методу RTM (Resin Transfer Molding) полягає в інжекції сполучної речовини під тиском у

спеціальне оснащення (що являє собою герметично закриту форму), в якій попередньо викладено задану кількість шарів тканого наповнювача [26]. Основною відмінністю від попереднього методу є застосування більш високого тиску в процесі просочення, внаслідок чого виникає необхідність використання оснастки з двох жорстких напівформ. Схему процесу представлено на рис. 1.14.

Перевагою цього методу є його менша залежність від кваліфікації виконавця і можливість повної автоматизації процесу, а також підвищення якості виробів та їхніх механічних властивостей. Недоліком є висока вартість обладнання, а також більш дороге і трудомістке у виготовленні оснащення.

1.1.7 Методи виготовлення деталей із композитів на основі термопластів

Змішування на вальцях здійснюється в зазорі між паралельно розташованими порожнистими валками, що обертаються назустріч один одному [27]. Схему процесу і зовнішній вигляд змішувальних валків представлено на рис. 1.15. Вальці мають контрольовану температуру підігріву, швидкість обертання і зазор.

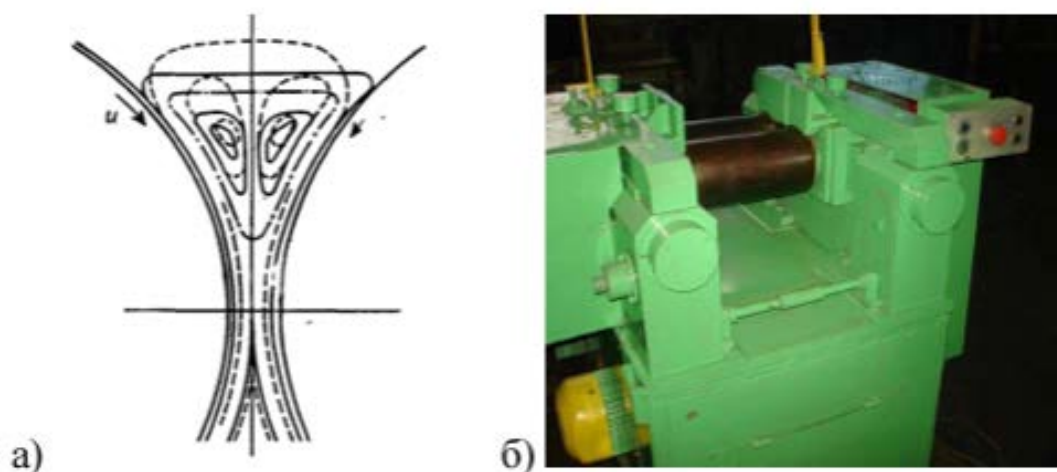


Рис. 1.15 – Траєкторії руху в'язких (-) і в'язкопружних (---) середовищ у валковому зазорі (а) і зовнішній вигляд змішувальних вальців (б)

Виникнення в матеріалі, що проходить через зазор, значних напружень зсуву дає змогу, окрім змішування, здійснювати на вальцях також операцію диспергування в полімері твердих і рідких компонентів (технічний вуглець, вулканізувальні добавки, пом'якшувачі, пластифікатори, стабілізатори, барвники тощо) [27].

Лопатеві змішувачі. Змішування в лопатевих змішувачах здійснюється за допомогою двох горизонтально розміщених лопатей, що обертаються назустріч одна одній з різними швидкостями в закритому корпусі (рис. 1.16а). Різноманітність матеріалів, що змішуються, та операцій, що здійснюються лопатевими змішувачами, зумовила велику кількість їхніх конструктивних різновидів. Залежно від призначення змішувачів форма їхніх робочих органів має різну конфігурацію, яку вибирають на підставі практичних даних (рис. 1.16б).

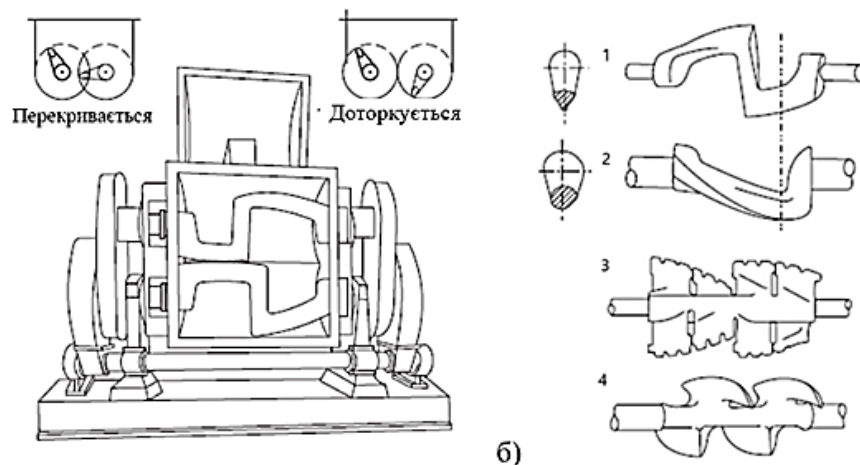


Рис. 1.16 – Дволопатевий сигмоподібний змішувач (а) і види змішувальних ножів для дволопатевого змішувачів (б): 1 - сигмоподібні (або Z-подібні); 2 - поодинокі вигнуті, 180°; 3 - крильчатка, що перекривається; 4 - подвійний Набен

Найчастіше композиції, наповнені короткими волокнами, готуються з використанням Z-подібних ножів. Поодинокі вигнуті ножі використовуються в тих випадках, коли необхідно досягти мінімального руйнування волокон.

Роторні змішувачі. Змішувачі, лопаті яких займають приблизно 60% об'єму закритої камери, називаються роторними. Найбільшого поширення набули так звані роторні змішувачі Бенбері (рис. 1.17).

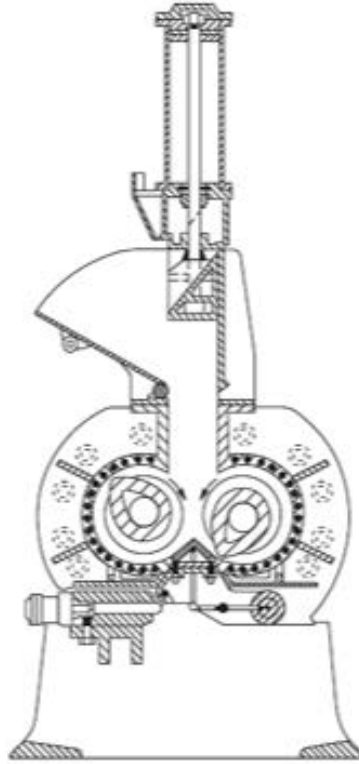


Рис. 1.17 – Роторний змішувач Бенбері

Різні роторні змішувачі відрізняються розмірами та об'ємом матеріалу, що одночасно завантажується, формою робочої частини роторів, частотою їхнього обертання, потужністю приводу і тиском на оброблюваний матеріал у камері змішування. Залежно від форми поперечного перерізу роторів, змішувачі поділяють на три основні типи: з овальними, тригранними і циліндричними роторами, серед яких найбільшого поширення набули змішувачі з овальними роторами. Змішувачі з тригранними роторами використовуються для приготування невеликих кількостей сумішей, особливо чутливих до підвищення температури. Ротори з циліндричною поверхнею мають гвинтові виступи: один великий і два меншого розміру. У цих змішувачах змішання і диспергування протікають не в масі, укладеній між стінкою камери і лопаттю ротора, а головним чином у зазорі між

роторами, в тонкому шарі матеріалу, що змішується, що в поєднанні з більшою на 50% площею поверхні, що охолоджує, забезпечує нижчу температуру суміші під час її виготовлення [18].

Шнекові (черв'ячні) екструдери. Шнекові екструдери здійснюють процес безперервного ламінарного змішування полімерів. Їх також називають черв'ячними, оскільки робочим органом такого екструдера є гвинт Архімеда [17]. Екструдери такого типу поділяють на одношнекові (рис. 1.18) і двошнекові (рис. 1.19).

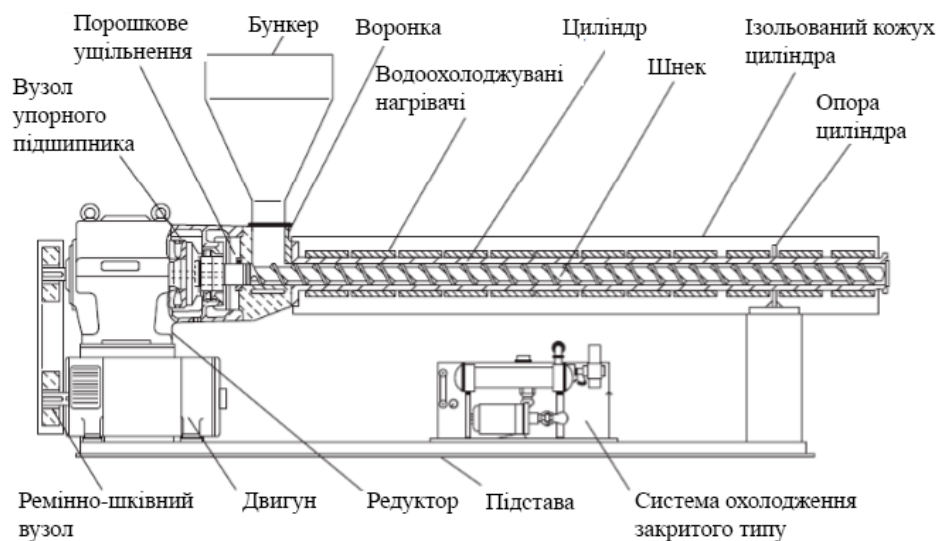


Рис. 1.18 – Конструкція одношнекового екструдера

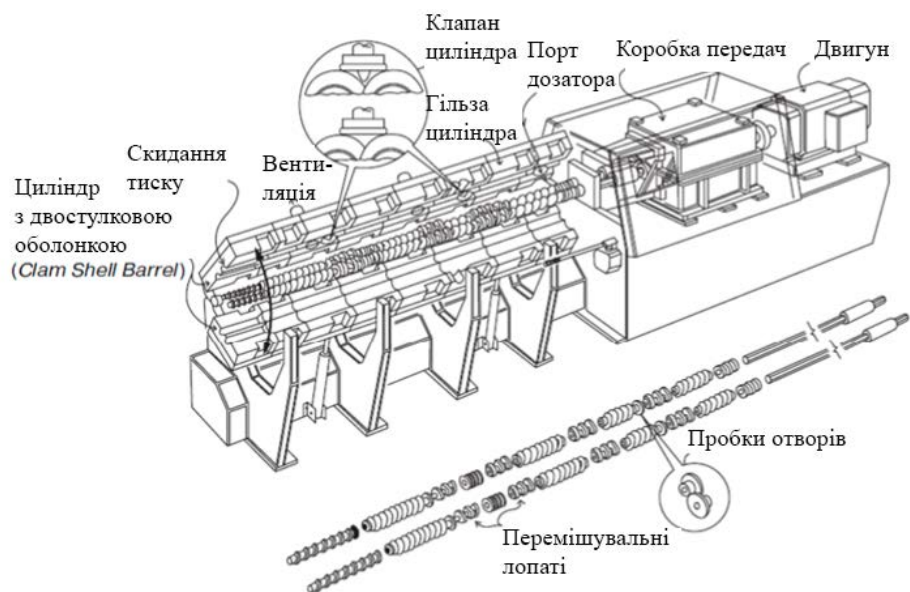


Рис. 1.19 – Конструкція двошнекового екструдера

Для того, щоб одношнековий екструдер здійснював не просто процес транспортування матеріалу, а саме його перемішування, шнек і корпус мають виконуватися зі змінною нарізкою. Глибина витків шнека і корпусу має постійно змінюватися по всій робочій довжині таким чином, щоб глибина нарізки черв'яка зменшувалася, в той час як глибина нарізки корпусу збільшувалася, і навпаки (рис. 1.20). При цьому сума поперечних перерізів міжвиткових каналів шнека і корпусу має залишатися постійною. Число зон зі змінною за глибиною нарізкою може бути різним (від двох до шести). Тангенціальні зусилля, що діють на матеріал під час його перетікання з нарізки корпусу в нарізку шнека (або навпаки), призводять до перерозподілу часток матеріалу всередині гвинтових каналів, а деформація зсуву, якої зазнає матеріал у каналах нарізки корпусу та шнека, спричиняє інтенсивне диспергуюче змішання компонентів [16].

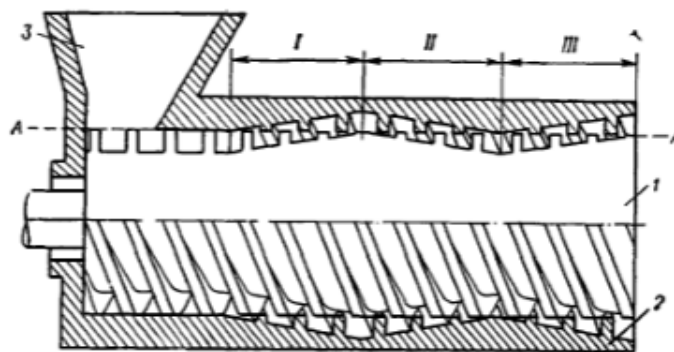


Рис. 1.20 – Схема змішувача зі змінною нарізкою шнека та корпусу: 1 - шнек; 2 - корпус; 3 - завантажувальна воронка; I-III - зони змішання; А-А - поверхня інтенсивних напружень зсуву

Різновидом одношнекових екструдерів є шнековий осцилювальний змішувач. Робочий орган цих машин додатково до обертання здійснює зворотно-поступальний рух в осьовому напрямку. Гвинтова нарізка на шнеку виконана переривчастою і складається з окремих гвинтових лопатей. У канали між лопатями входять місильні зуби, укріплені на корпусі. Змінний осьовий і обертальний рух шнека забезпечує інтенсивне зрушення, стиснення

і розрив матеріалу в робочій порожнині, що сприяє рівномірному перемішуванню і пластикації маси [14].

Двошнекові екструдери дають змогу змішувати більш в'язкі матеріали, ніж при використанні одношнекових, і з більшою інтенсивністю. Збільшення змішувальної та гомогенізувальної здатності пояснюється наявністю у гвинтових каналах шнеків циркуляційних потоків у взаємно перпендикулярних напрямках. Більшість двошнекових машин має шнеки, що зачіпляються, що, своєю чергою, спричиняє інтенсивну деформацію зсуву в зазорах зачеплення, перетираючий і "валковий" вплив на перероблюваний матеріал у зоні сполучення [13].

При використанні одношнекових екструдерів для отримання сумішей вихідні компоненти необхідно попередньо змішувати в сухому стані в простих стрічкових або скребкових змішувачах і потім завантажувати суміш у живильний бункер. При використанні двошнекових екструдерів операцію попереднього перемішування компонентів можна виключити, однак завантаження наповнювача слід здійснювати вже в зону розплавленого полімеру, щоб уникнути процесу утворення агломератів [10].

Дискові екструдери. Конструкцію дискового екструдера наведено на рис. 1.21. Принцип роботи дискового екструдера засновано на ефекті Вейсенберга, сутність якого полягає в тому, що під час течії розчинів і розплавів полімерів, які мають в'язко-пружні властивості, в умовах простого зсуву між нерухомим корпусом 1 і обертовим диском 2 виникають не тільки дотичні, а й нормальні напруження, що видавлюють матеріал через мундштук. Будь-яка частка матеріалу, що потрапляє в робочий зазор, переміщається під дією нормальних напружень у радіальному напрямку до центру корпусу, проходячи циліндричні перерізи з постійним радіусом, у яких швидкості зсуву рівні через симетрію та однорідність їхнього поля. Унаслідок перетворення роботи тертя на теплоту в частці матеріалу з великою в'язкістю спостерігається підвищення температури, що призводить

до зниження в'язкості, яка вирівнюється по всьому об'єму під час проходження матеріалу через зазор. Завдяки малому зазору і високій швидкості обертання диска виникають великі деформації зсуву, що забезпечують інтенсивне змішування полімеру [8].

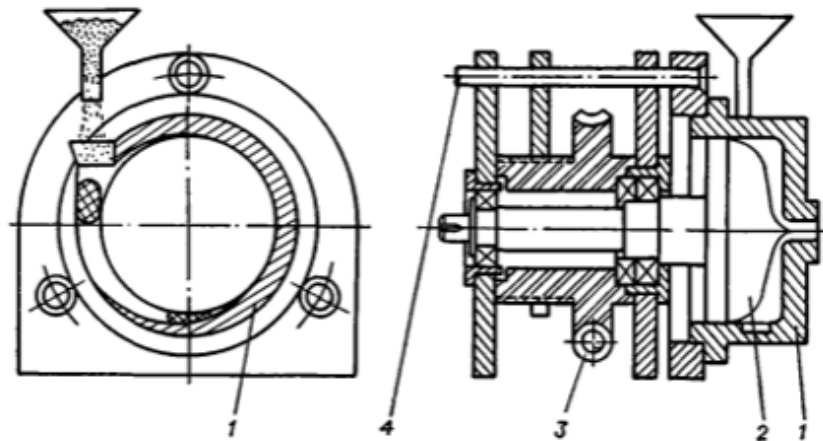


Рис. 1.21 – Схема дискового екструдера: 1 - корпус; 2 - диск; 3 - черв'ячна передача; 4 – напрямні

Ефективність використання дискових екструдерів значно знижується через їхню високу чутливість до точності дозування, небажаного підвищення температури розплаву, недостатню продуктивність і низький тиск розплаву на виході. Під час завантаження полімеру в робочу камеру без спеціальних пристроїв на периферії диска відбувається часткове плавлення матеріалу, яке спричиняє залипання патрубків бункера, що призводить до нестійкої і малопродуктивної роботи машини. Цей недолік усувається встановленням на конічній частині диска і корпусу спеціальних штирів для розбивання грудок матеріалу, лопатей для захоплення полімеру, що переробляється, використанням попередньої кільцевої пластикації, виготовленням корончастого диска і кулачкового корпусу. Небажаного підвищення температури розплаву можна уникнути шляхом створення екструдерів зі складеним ротором, в якому можлива зміна окружних швидкостей окремих ділянок торцевих поверхонь. Прагнення збільшити продуктивність дискових екструдерів, знизити осьове навантаження на напольгиві підшипники

робочого органу призвело до створення багатозахідних машин такого типу. Наприклад, відомі екструдери з послідовно розташованими зонами, які мають гладкий диск або нарізку на диску (корпусі), один, два або три робочі органи [2].

1.2 Адитивні способи виготовлення запасних частин із полімерних і композиційних матеріалів

На відміну від традиційних технологій, вартість виготовлення одного виробу адитивним методом не залежить від обсягу партії, однак, зараз залишається на досить високому рівні. На перетині кривих вартості виготовлення виробів традиційними й адитивними методами залежно від обсягу партії виникає точка беззбитковості, лівіше за яку лежить сфера рентабельності використання адитивних технологій, яка наразі відповідає доволі малому обсягу партії і тяжіє до одиничного виробництва (рис. 1.22).

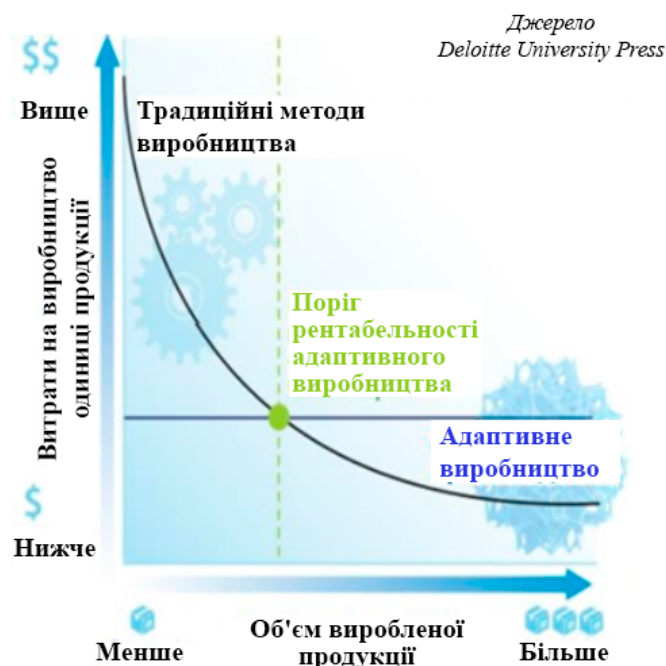


Рис. 1.22 – Схема зміни вартості виготовлення деталей методами адитивних технологій залежно від обсягу партії

У майбутньому з розвитком технології, здешевленням використовуваного устаткування і матеріалів ця точка зсуватиметься вправо

в бік збільшення обсягу партії, у зв'язку з чим експерти пророкують можливість повної відмови від використання традиційних технологій.

Іншим моментом, що зумовлює використання адитивних технологій замість традиційних, є складність конструкції виробу, що виготовляється. У разі адитивних технологій вартість виготовлення одиниці продукції не залежить від складності її форми: 3D-принтер однаково успішно впорається як із завданням виготовлення деталі з набору простих геометричних форм, так і з виготовленням складної деталі, і вартість одиниці продукції від цього не зміниться. Навпаки, при використанні традиційних технологій при ускладненні конструкції вартість її виробництва починає помітно збільшуватися, оскільки знижується її технологічність. На кривих залежності вартості виготовлення одиниці продукції від її складності для адитивного і традиційного виробництва також є якась точка перетину, що визначає рентабельність використання адитивних технологій для випадків, коли конструктору необхідна саме висока за складністю деталь (рис. 1.23).



Рис. 1.23 – Схема зміни вартості виготовлення деталей методами адитивного виробництва залежно від складності виробів

Зараз існує велика кількість методів і матеріалів для 3D-друку. Серед наявних технологій 3D-друку полімерними матеріалами найбільшого поширення на сьогодні набули технології FDM, SLA і SLS.

1.2.1 Моделювання методом пошарового наплавлення

Технологія FDM (англ. Fused Deposition Modeling - моделювання методом пошарового наплавлення) - це метод 3D-друку, за якого виріб формують пошарово з розплавленого пластику, що видавлюється через сопло принтера (рис. 1.24). Товщина шару, що наплавляється, лежить у діапазоні від 0,1 до 1,0 мм, ширина шару становить від 0,2 мм до 2,0 мм. Завдяки широкому розмаїттю використовуваних матеріалів, а також відносній простоті застосовуваного обладнання, дана технологія на сьогоднішній момент є лідером сегмента.

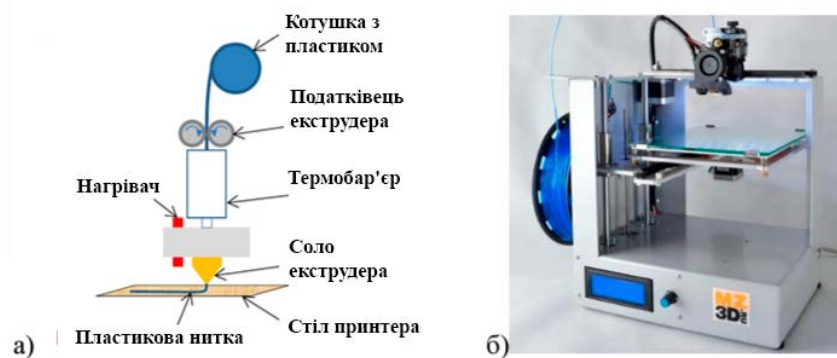


Рис. 1.24 – Схема процесу виготовлення моделей методом FDM-друку (а) і зовнішній вигляд використовуваного обладнання (б)

Як матеріали друку можуть використовуватися майже будь-які термопластичні полімери, проте найкраще для друку підходять пластики з низькою температурою переходу у в'язко-текучий стан, високою адгезією до шарів один одного, а також низькою усадкою.

Оскільки основним критерієм вибору матеріалу для технології FDM-друку є його термопластична природа, існує також можливість використання для друку полімерних композиційних матеріалів на основі термопластів. Найбільшого поширення зараз набули композити для 3D-друку, армовані короткими вуглецевими або скляними волокнами. Міцність таких виробів приблизно в 1,5 раза вища, ніж міцність ненаповнених полімерів [19]. Однак при використанні таких матеріалів підвищується знос обладнання через абразивну дію волокон на деталі принтера, що подають матеріал.

Вельми істотного приросту міцності, який можна порівняти з міцністю металів, можна досягти при використанні в процесі друку для армування безперервних волокон [10], [11]. Існує два принципово різних підходи для 3D-друку матеріалами з безперервним волокном. Перший полягає у використанні попередньо виготовленої композитної нитки для друку, у серцевині якої розташовується зміцнювальна нитка, оточена термопластичним полімером (ABS-пластик, нейлон та ін.).

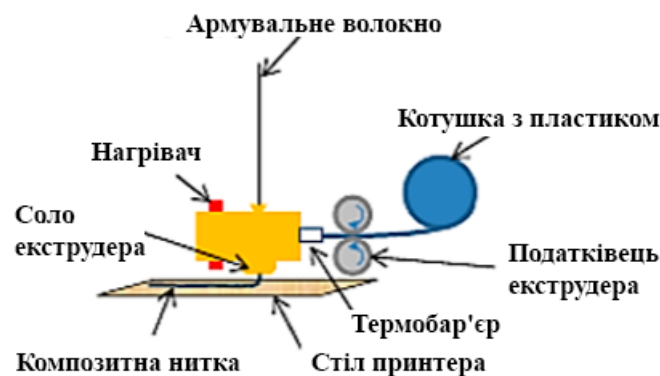


Рис. 1.25 – Принципова схема 3D-друку виробів із безперервним вуглецевим волокном

Така нитка може використовуватися на звичайному обладнанні для 3D-друку без його модифікації. Однак, існують великі технологічні труднощі створення подібних матеріалів з огляду на високу в'язкість розплавів термопластичних полімерів і, відповідно, утруднену змочуваність волокна цими розплавами, що призводить до наявності порожнеч і несучільностей в об'ємі матеріалу та погіршення механічних властивостей вироблених з нього деталей. Крім того, подібна композитна нитка через високу жорсткість у процесі друку подається і укладається в складні форми важко, у зв'язку з чим виготовлення дрібних або складних за формою деталей обмежене.

Принципово інший підхід до 3D-друку безперервним волокном запропонувала компанія Anizoprint (рис. 1.25). У разі використання їхньої технології армувальне волокно і матричний матеріал подаються окремо з двох різних екструдерів і укладаються за формою деталі по черзі [22].

Для успішної реалізації цієї технології армувальне вуглецеве волокно має бути попередньо підготовлене, а саме просякнуте термореактивним полімером для усунення порожнин і поліпшення адгезії до шарів матричного матеріалу. Процес друку вимагає використання спеціального 3D-принтера, а також спеціального програмного забезпечення для поділу моделі деталі перед друком на шари (слайсера). Наразі розроблене і випущене обладнання та армувальний матеріал для 3D-друку даним методом дуже дорогі.

1.2.2 Лазерна стереолітографія

Технологія SLA (від англ. stereolithography - стереолітографія) являє собою метод 3D-друку, що ґрунтується на пошаровому затвердінні рідкого полімеру під впливом випромінювання лазера або проектора (рис. 1.26). Для цього методу застосовують фотополімери - речовину, що змінює властивості під впливом ультрафіолетового випромінювання [30].

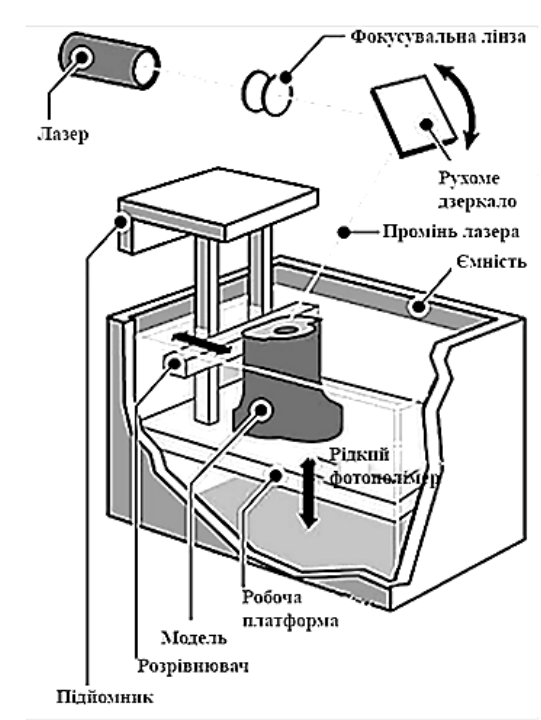


Рис. 1.26 - Схема процесу виготовлення моделей методом SLA-друку

Головною перевагою цього методу порівняно з попереднім є можливість отримання більш гладкої поверхні виробів і виготовлення більш

високоточних, тонкостінних і дрібнорозмірних виробів, оскільки товщина за використання цієї технології набагато менша та становить від 0,05 мм до 0,13 мм [34]. Основними недоліками є висока вартість фотополімерних смол, а також їхня крихкість, що обмежує діапазон можливих застосувань.

1.2.3 Селективне лазерне спікання

Технологія SLS (англ. Selective Laser Sintering - селективне лазерне спікання) являє собою метод 3D-друку, що ґрунтується на пошаровому спіканні порошкових матеріалів під дією лазерного випромінювання (рис. 1.27).

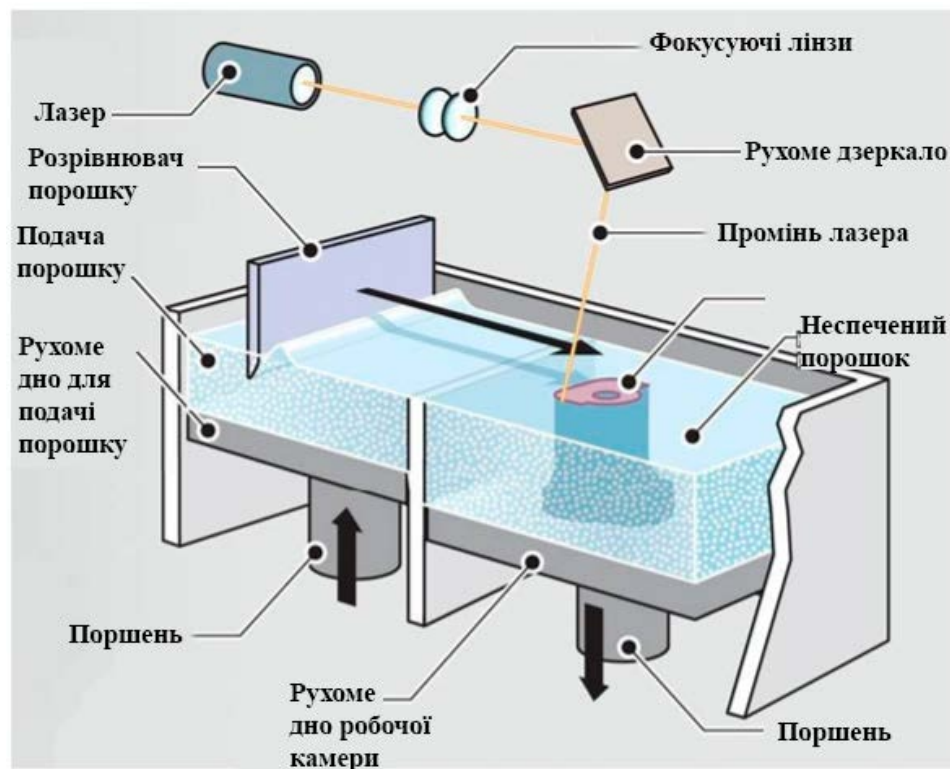


Рис. 1.27 – Схема процесу виготовлення моделей методом SLS-друку

Перевагами цього методу є відсутність необхідності створення підтримок у процесі друку, що зумовлює можливість виготовлення складніших форм, а також вищі механічні властивості виробів завдяки створенню міцніших, порівняно з технологією FDM, зв'язків між частинками пластику. На відміну від технології SLA, під час використання SLS-друку

застосовують термопластичні полімери, що мають високу міцність і не схильні до крихкого руйнування. Мінімальна товщина шару для цієї технології становить 0,075 мм, що також обумовлює високу якість поверхні [35]. Основними недоліками цього методу є висока вартість матеріалів друку і застосовуваних принтерів, а також створення шкідливих факторів праці під час виробництва виробів через роботу з летючими порошковими матеріалами.

1.3 Аналіз випадків застосування 3D-друку для виготовлення запасних частин різних машин

Тенденція розвитку технологій адитивного виробництва з кожним роком набирає темп і набуває дедалі більшого поширення в різних галузях промисловості [36], [37]. Зокрема, великі перспективи застосування адитивних технологій лежать у царині їхнього використання під час виробництва та технічного сервісу сільськогосподарської техніки [38], для відновлення працездатності механізмів методом заміни зношених деталей на нові, виготовлені методами 3D-друку [10]. Найбільшого поширення зараз набула адитивна технологія FDM-друку [17].

За кордоном використання 3D-друку для виготовлення запасних частин машин набуло досить широкого поширення. BuyAnyPart, англійський постачальник запасних частин, оголосив у 2018 р. про створення сервісу із заміни деталей сільськогосподарської техніки та обладнання, вироблених методами 3D-друку [9]. CNH Industrial, світовий лідер з виробництва та продажу сільськогосподарського та будівельного обладнання, вантажних автомобілів і автобусів, також пропонує послуги з 3D-друку деталей, що підлягають заміні, зазначаючи, що застосування цієї технології дає змогу значно економити час і матеріали в умовах термінового виготовлення невеликих партій деталей [11].

Робота нідерландських учених [12] присвячена методам оптимізації стратегій технічного обслуговування та ремонту за рахунок застосування адитивних технологій. Авторами представлено стандартний метод і метод, орієнтований на потреби кінцевого користувача. Робиться висновок про доцільність застосування адитивних технологій у процесі технічного обслуговування та ремонту, оскільки їхнє застосування дає змогу значно заощаджувати час завдяки відсутності необхідності очікування тривалої доставки деталей від постачальника, а також завдяки можливості оптимізації конструкції замінюваної деталі - з'єднання кількох замінюваних деталей в одну, що зрештою призводить до виключення непотрібних етапів збирання.

Застосування запропонованих стратегій проілюстровано на прикладі ремонту верстата для виробництва відкидних дисків. Одним із головних завдань було відновлення працездатності пневматичного циліндра, який використовується для складування готових дисків у накопичувач. Необхідно було замінити зношене коромисло механізму (рис. 1.28). 3D-файли пневматичного циліндра і коромисла, які є стандартними деталями, було отримано з веб-сайту постачальника.

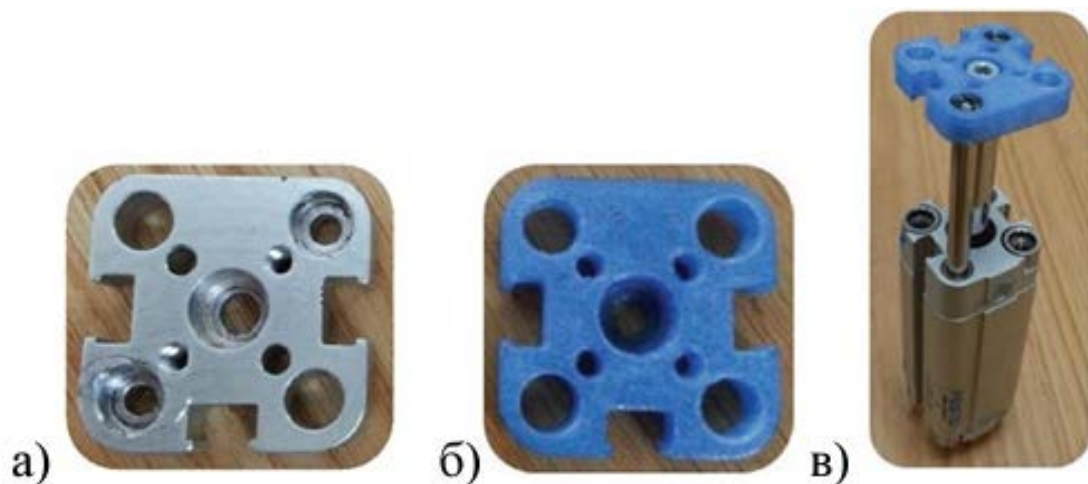


Рис. 1.28 – Заміна коромисла пневматичного циліндра верстата для виробництва відкидних дисків: а - оригінальна деталь коромисла, алюміній; б - деталь коромисла, виготовлена на 3D-принтері з PLA пластику; в - пневматичний циліндр у зборі

Коромисло було роздруковано з PLA пластику на 3D-принтері Ultimaker з товщиною сопла 2,85 мм, температурою екструзії 210°C, зі швидкістю друку 50 мм/с; товщина шару становила 20 мкм.

Найчастіше компанії, що займаються 3D-друком стикаються із завданнями заміни зношених зубчастих коліс різних механізмів автомобілів: шестерні модуля стоянкового гальма автомобіля "LAND ROVER" (рис. 1.29б), зубчастого колеса склоочисника автомобіля "Mazda" (рис. 1.29в) та ін.

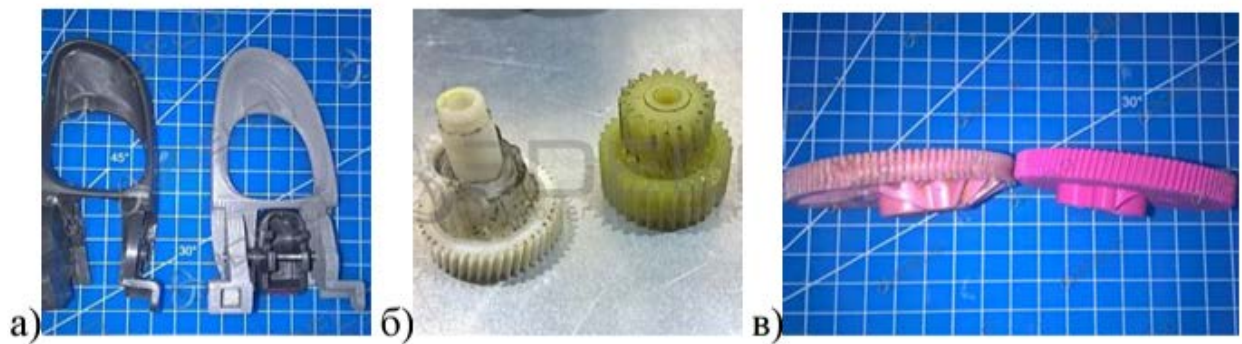


Рис. 1.29 – Приклади виготовлення методом FDM-друку деатлів автомобілів замість зношених архангельською компанією 3Delo: а - ручка дверей автомобіля "KIA" Shuma; б - шестерня модуля стоянкового гальма автомобіля "LAND ROVER"; в - зубчасте колесо двірника автомобіля "Mazda"

У роботі [14] автором описується відновлення вал-шестерні зубчато-ремінної передачі садового тримера методом, що ґрунтується на механічній обробці з постановкою додаткової ремонтної деталі (ДРД). Основною ідеєю застосування FDM-технології під час ремонту методом ДРД є створення електронної моделі пошкодженої ділянки деталі, її друк і подальший монтаж на механічно оброблену поверхню [16]. У даному випадку ДРД був зубчастий вінець, надрукований на FDM 3D-принтері Magnum Creative 2 Pro з ABS пластику зі швидкістю друку 45 мм/с, товщиною шару 0,05 мм і при

температурі екструдера 235°C. Пошкоджена деталь і відновлена вал-шестерня наведені на рис. 1.30.

На підставі проведеного огляду можна зробити висновок, що застосування технології 3D-друку методом FDM наразі знайшло доволі широке застосування в практиці ремонту машин і обладнання. Однак можна також зробити висновок, що за кордоном упровадження цієї технології в процесі ремонту набуло набагато більшого розвитку, ніж зараз в Україні: кілька великих іноземних компаній, що спеціалізуються на виробництві та обслуговуванні техніки, вже впровадили практику 3D-друку у свої виробничі процеси, тоді як в Україні це явище має розрізнений характер і залишається прерогативою невеликих приватних компаній.

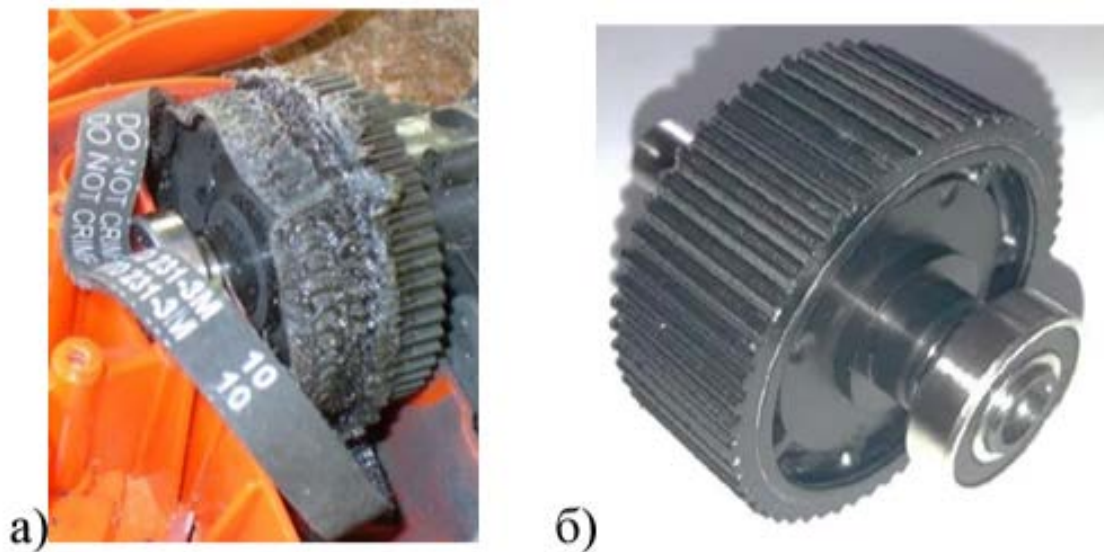


Рис. 1.30 – Відновлення вал-шестерні зубчасто-ремінної передачі садового тримера: а - пошкоджена поверхня зубів; б - вал-шестерня, відновлена із застосуванням ДРД

Номенклатура деталей, можливих для виготовлення методом FDM-технології, доволі широка та охоплює майже все розмаїття полімерних деталей, які використовуються в конструкція різних машин і обладнання. Використання цієї технології дає змогу значно скоротити час і вартість

ремонтних робіт, а також частково позбутися залежності від сервісних служб і термінів постачання запасних частин.

Серед факторів, що стримують поширення адитивних технологій у виробництві та ремонті техніки, можна виокремити високі вимоги, що висуваються до деталей за характеристиками міцності або іншими функціональними характеристиками, які не завжди здатні забезпечити деталі, надруковані на 3D-принтері. З огляду на технологічні особливості цієї технології, деталі, виготовлені методом 3D-друку, демонструють властивості міцності гірші, ніж деталі з аналогічних матеріалів, вироблені за допомогою традиційних технологій. Цей факт пов'язаний з пошаровим укладанням пластику в процесі друку, що призводить до поганої адгезії між шарами та в результаті до вираженої анізотропії властивостей деталі, за якої максимальна міцність спостерігається вздовж шару пластику, а впоперек, в напрямку укладання, в рази менша. Крім того, найчастіше для 3D-друку не є можливим використовувати пластики з високими механічними властивостями, що знайшли широке застосування в практиці виготовлення полімерних деталей, з огляду на те, що на перше місце під час вибору матеріалу для друку лежать його технологічні властивості та можливість перероблюваності даним методом.

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ СПОСОБУ ВИГОТОВЛЕННЯ ЗАПАСНИХ ЧАСТИН ЗА ДОПОМОГОЮ 3D-ДРУКУ З ВАКУУМНИМ ПРОСОЧЕННЯМ

2.1 Обґрунтування вибору матеріалів і технологічних параметрів виготовлення 3D-друкованих каркасів

2.1.1 Огляд матеріалів, що застосовуються при 3D-друку за технологією FDM

У загальному випадку для 3D-друку методом пошарового наплавлення підходить будь-який термопластичний полімер, тобто такий полімер, який під час нагрівання не руйнується, а переходить у в'язко-плинний стан, а під час охолодження повертається в початковий стан без втрати властивостей. Однак на практиці далеко не будь-який матеріал виявляється технологічним і придатним для виконання 3D-друку. Найпоширеніші матеріали для FDM-друку та їхні властивості наведено в табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Властивості матеріалів для FDM-друку

	Технологічні властивості				Експлуатаційні властивості		
	Темп. екструзії, °C	Темп. стола, °C	Міжшарова адгезія	Усадка, %	Темп. експлуатації, °C	Межа міцності, МПа	Віднос. Подовження, %
PLA	190-230	20-60	хороша	ні	-20...+40	25	3,8
ABS	210-245	90-120	середня	до 0,8	-40...+80	35	6
PETG	215-245	20-80	дуже висока	ні	-40...+70	36	50
SBS	220-240	70-90	низька	0,2	-80...+65	34	250
Flex	220-240	90-110	хороша	0,35-0,8	-100...+100	18	600
Nylon	235-260	100-120	висока	1	-30...+120	70	300
PC	270-310	90-110	висока	3	-40...+120	57	4,8

PLA (полілактид) являє собою біорозкладний пластик на основі молочної кислоти, вироблений з натуральних продуктів, таких як цукрова тростина, кукурудза, картопляний крохмаль, целюлоза. Цей матеріал є одним із найпоширеніших під час FDM-друку, оскільки не має усадки і не потребує використання підігрівального столу та термостатованої камери.

ABS (акрилонітрилбутадієнстирол) є ударостійким пластиком, також вельми поширеним у FDM-друку. Він має досить високу міцність, але водночас простий у друці, що робить його актуальним для технічних застосувань. Цей матеріал є одним з найбільш недорогих, що також обумовлює популярність його використання. Недоліками цього матеріалу є його погана стійкість до впливу ультрафіолету, а також висока усадка і необхідність використання під час друку термостатованої камери.

PETG (поліетилентерефталат-гліколь) є ударостійким пластиком, що володіє також високою міжшаровою адгезією. Також великою перевагою цього матеріалу є відсутність усадки і стійкість до ультрафіолету. На відміну від ABS, для друку цим пластиком не потрібна закрита камера, що також забезпечило його високу популярність на ринку. До недоліків цього матеріалу можна віднести відносно високу температуру друку і високу плинність матеріалу, через що можливі дефекти друку при неправильному налаштуванні параметрів друку.

SBS (стирол-бутадієн-стирол) має малу усадку, високу міцність і хорошу адгезію до столу. До недоліків цього матеріалу належить слабка міжшарова адгезія і відносно висока температура друку.

Flex (поліуретан) являє собою м'який гумоподібний матеріал, який використовується в тих випадках, коли необхідна гнучкість і еластичність готових виробів. Має масло- і бензостійкість, широкий температурний діапазон застосування. До недоліків застосування належить складність друку; найчастіше для використання цього матеріалу потрібне застосування екструдера спеціальної конструкції.

Nylon (нейлон - синтетичний матеріал із сімейства поліамідів) є матеріалом, що має високу стійкість до стирання, у зв'язку з чим основною сферою застосування є виготовлення вузлів, які терться, кінематичних пар (зубчасті колеса, втулки тощо). Однак при цьому має дуже високу усадку,

необхідність закритої камери для друку і неможливість друку великих виробів.

PC (полікарбонат) являє собою один з найміцніших матеріалів для 3D-друку в ряду стандартних. Стійкий до фізичного і теплового впливу, витримує великі температури до 110°C. Однак у 3D-друку його застосовують рідко через високу температуру друку, високу усадку, а також гігроскопічність.

За результатами порівняльного аналізу матеріалів, що використовуються для FDM-друку, доцільним для виготовлення каркасів запасних частин є вибір як матеріалу 3D-друку пластиків PLA і ABS, що вирізняються високою технологічністю друку, хорошими механічними характеристиками і відносно низькою ціною.

2.1.2 Аналіз технологічних факторів 3D-друку за технологією FDM

Параметри друку, пов'язані з технологічними властивостями матеріалу. До параметрів цієї групи можна віднести температуру екструдера, температуру столу та/або камери і режим охолодження. Ці параметри пов'язані тільки з поведінкою конкретного виду пластику в процесі друку і залежать від його фізичних властивостей, як-от температура переходу у в'язко-текучий стан, швидкість затвердіння, рівень адгезії тощо. Вибір цих параметрів багато в чому пов'язаний з конструктивними особливостями принтера, використовуваного для друку: наявністю або відсутністю термостатованої камери, розташуванням і потужністю нагрівачів, охолоджувальних вентиляторів. У зв'язку з цим виробники принтерів і матеріалів часто надають стандартний набір параметрів друку для кожного пластику, що гарантують найкращий результат, однак на практиці не завжди за стандартних параметрів вдається досягти найкращого рівня властивостей друкованої деталі. У будь-якому використовуваному слайсері завжди є можливість користувальницького налаштування перерахованих параметрів,

комплекс яких в кінцевому підсумку впливатиме на структуру матеріалу і властивості деталі.

Найважливіший параметр у цій групі - це температура, до якої розігрівається матеріал у процесі друку. Задається цей параметр температурою екструдера (сопла). Обрана температура має бути вищою за температурний інтервал переходу полімеру у в'язко-плинний стан, але нижчою за температуру, за якої матеріал починає деградувати і втрачати свої властивості. Зазвичай температуру друку задають на 5-10 °C вище верхнього інтервалу температур переходу полімеру у в'язко-плинний стан, але іноді її доводиться підвищувати для досягнення кращої адгезії між шарами і зниження в'язкості полімеру, який екструдують. На малюнку 2.1 показано залежність сили адгезії шарів пластику під час 3D-друку залежно від температури екструдера (235, 250 і 260 оC) [78]. Видно, що сила адгезії має явну тенденцію до збільшення.

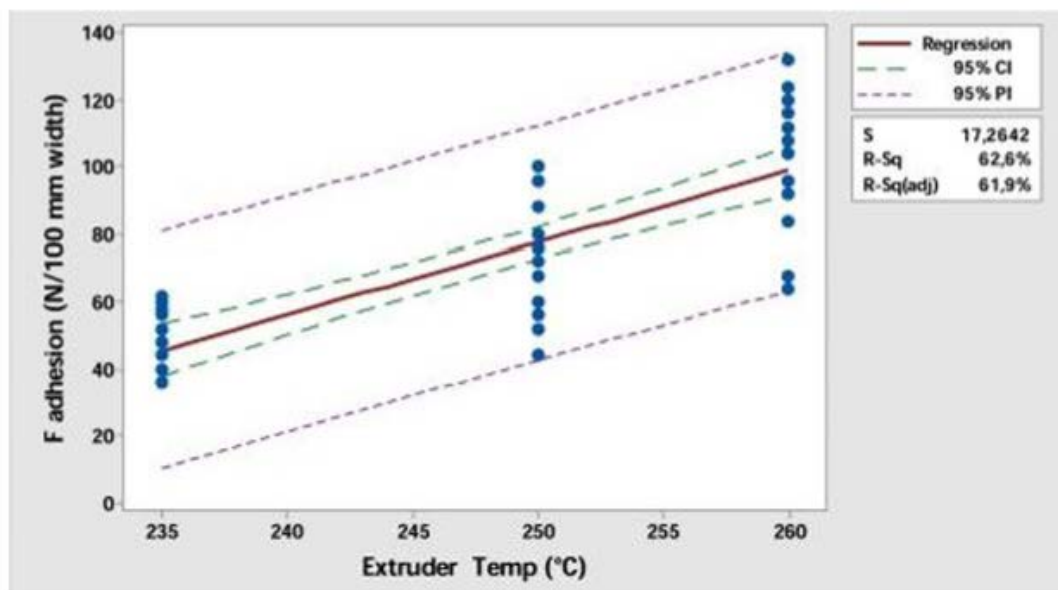


Рис. 2.1 – Залежність сили адгезії шарів пластику під час 3D-друку від температури екструдера

Наступний за важливістю параметр - це температура столу і/або камери принтера залежно від його конструктивних особливостей. Температура в камері в процесі друку впливатиме на швидкість охолодження пластику, що зрештою позначиться на усадці деталі, рівні міжшарової адгезії, а також

структурі матеріалу, що особливо важливо для кристалічних полімерів. Ця температура має бути нижчою за температуру розм'якшення матеріалу, інакше деталь не триматиме форму і почне "плисти", але водночас вона має бути досить високою, щоб нижні шари не встигали охолоджуватися в процесі друку. Якщо нижній шар пластику, над яким триває побудова, матиме низьку температуру, це призведе до поганої адгезії між даним шаром і верхнім шаром друку, що, зрештою, призведе до розшаровування деталі. У зв'язку з цим цей параметр прагнуть максимізувати і задають на 5-10 °С нижче температури розм'якшення матеріалу.

Як було описано вище, для поліпшення адгезії шарів пластику і зниження в'язкості температурні параметри прагнуть максимізувати, проте на практиці це спричиняє проблему з локальними перегріваннями деталі в процесі друку, через які відбуваються деформації (рис. 2.2). У представленому прикладі для друку кута соплу принтера доводиться трохи довше бути над одним і тим самим місцем деталі, ніж під час друку по прямій лінії. Таким чином, раз за разом сопло деталі сильніше нагріває одне й те саме місце деталі, що в підсумку призводить до температурної деформації та зіпсованої деталі.

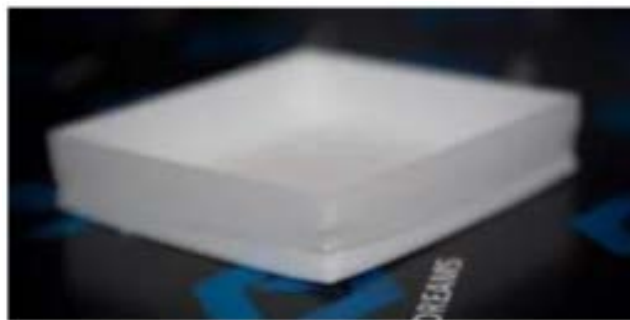


Рис. 2.2 – Деформація 3D-моделі через перегрів на кутах

Щоб уникнути появи цього виду дефектів, але водночас зберегти високу температуру сопла і камери, важливі для хорошої течії матеріалу в процесі екструзії та адгезії, можна використовувати локальне або об'ємне охолодження за допомогою вбудованих вентиляторів. У принтерах лінійки

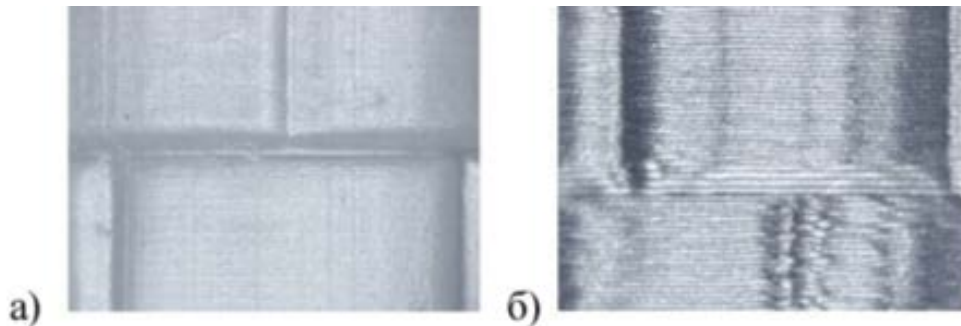
Designer від виробника Picasso 3D і слайсері Polygon X, який поставляється спільно з ними, функція обдування задається за допомогою коефіцієнта обдування, що регулює потужність об'ємного повітряного потоку.

Геометричні параметри друку. До параметрів цієї групи належать висота шару, ширина ліній, кількість зовнішніх периметрів, вид і відсоток внутрішнього заповнення. На відміну від попередніх параметрів, для яких існує оптимальне співвідношення для досягнення найкращої якості друку, їх можна регулювати в широкому діапазоні, що призводитиме до формування різних властивостей надрукованої деталі.

Завдання висоти та ширини шару друку безпосередньо залежать від обраного для друку діаметра сопла, відповідно для вибору цих параметрів попередньо слід визначитися з його значенням. Діаметр обраного сопла не може перевищувати діаметр філамента, використовуваного для друку. Стандартний найбільш застосовний діаметр філамента для 3Ддруку становить 1,75 мм, розміри застосовуваних сопел коливаються в діапазоні від 0,1 до 1,2 мм. За великих діаметрів сопла спостерігається низька точність і якість друку, що виражається в поганому заповненні об'єму деталі матеріалом і появою пустот, а також у високій шорсткості поверхні [7]. Отже, діаметр сопла прагнуть мінімізувати, однак, чим менше сопло, що використовується, тим менша продуктивність друку і більший час, необхідний для виготовлення деталі. На основі практичного досвіду 3Д-друку вдалося встановити, що оптимальне співвідношення між якістю та швидкістю друку можна досягти при використанні сопел діаметром 0,3 або 0,4 мм.

Висоту шару під час друку рекомендують вибирати приблизно в 2-4 рази меншу за обраний діаметр сопла [8], відповідно за діаметра сопла 0,4 мм рекомендований діапазон становить від 0,1 до 0,2 мм. Обрана висота шару в кінцевому підсумку впливає на якість деталі (рис. 2.3), а також впливає на властивості міцності (рис. 2.4): чим менша висота обраного шару, тим

міцнішою виявляється надрукована деталь [21]. Таким чином, висоту шару друку прагнуть мінімізувати в тому разі, якщо вирішальним фактором під час завдання друку не є продуктивність, оскільки за меншої висоти шару швидкість побудови деталі значно зменшується. є є продуктивність, оскільки за умови меншої висоти шару друку.



а - висота шару 0,1 мм; б - висота шару 0,2 мм

Рис. 2.3 – Поверхня деталі, виготовленої за допомогою 3D-друку з різною заданою висотою шару

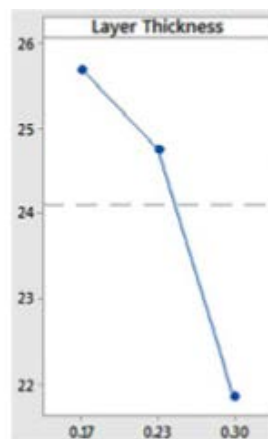


Рис. 2.4 – Залежності міцності 3D-друкованих зразків під час випробувань на розтягнення від висоти шару друку

Наступний важливий параметр – ширина лінії під час друку. Вибір ширини лінії, меншої за діаметр сопла, недоцільний, оскільки в цьому разі велика ймовірність утворення ненадрукованих ділянок. Зазвичай ширину шару варіюють у діапазоні величин від одного до двох діаметрів сопла, оскільки більшу кількість матеріалу через перетин сопла продавити не вдається. Показано, що під час збільшення ширини лінії від одного діаметра сопла (100 %) до двох діаметрів (200 %) міцність зразків зростає більш ніж

удвічі, так само, як і продуктивність друку (рис. 2.5) [11], тому цей параметр доцільно максимізувати.

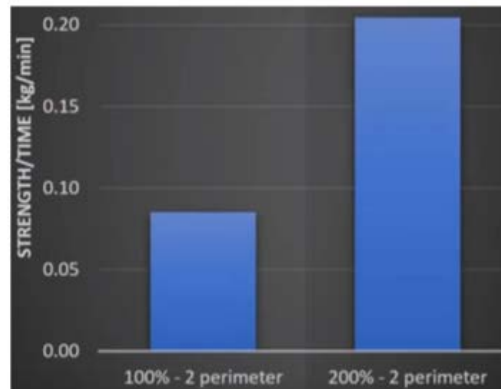


Рис. 2.5 – Питома міцність 3D-друкованих зразків залежно від обраної ширини лінії під час друку

Збільшення кількості зовнішніх периметрів призводить до підвищення міцності надрукованої деталі, проте в цьому випадку залежність не така сильна [12]. Зразки з товщиною стінки в чотири периметри під час випробувань показали незначне підвищення міцності порівняно зі зразками зі стінкою з двох периметрів (рис. 2.6). Отже, збільшувати товщину стінки деталі під час друку недоцільно і зазвичай під час друку обмежуються виставленням стінки в один або два периметри.

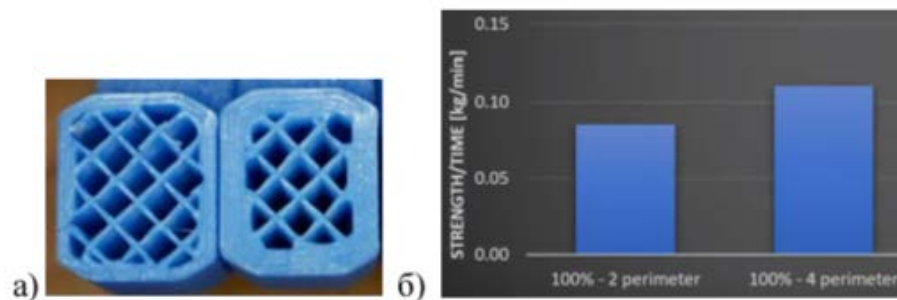


Рис. 2.6 – Зразки з товщиною стінки в два і чотири периметри (а) і питома міцність даних зразків (б)

Внутрішнє заповнення - це структура деталі всередині надрукованого контуру. Заповнення може бути виконано в різному вигляді; основні види показано на рис. 2.7. Вид заповнення суттєво впливає на міцнісні властивості надрукованої деталі [12]. Порівняння міцнісних властивостей зразків із представленими на цьому малюнку видами заповнень показано в табл. 2.2.

Як видно з таблиці, найбільшої міцності зразків в абсолютному значенні вдається досягти за використання лінійного заповнення, тоді як максимальну питому міцність демонструють зразки з шестикутним заповненням.

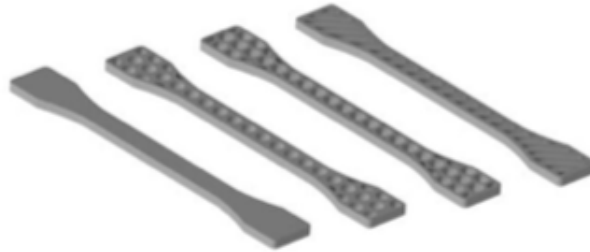


Рис. 2.7 – Основні види заповнення, що застосовуються під час 3D-друку, зліва направо: суцільне, кругле, шестикутне, лінійне

Таблиця 2.2 – Міцність 3D-друкованих зразків із різними видами заповнення (за рис. 2.7)

Вид заповнення	Межа міцності, МПа	Вага, г	Питома міцність, МПа/г
Суцільне	47,82	1,176	40,66
Кругле	34,30	0,760	45,13
Шестикутне	42,25	0,582	72,59
Лінійне	51,01	0,760	67,12

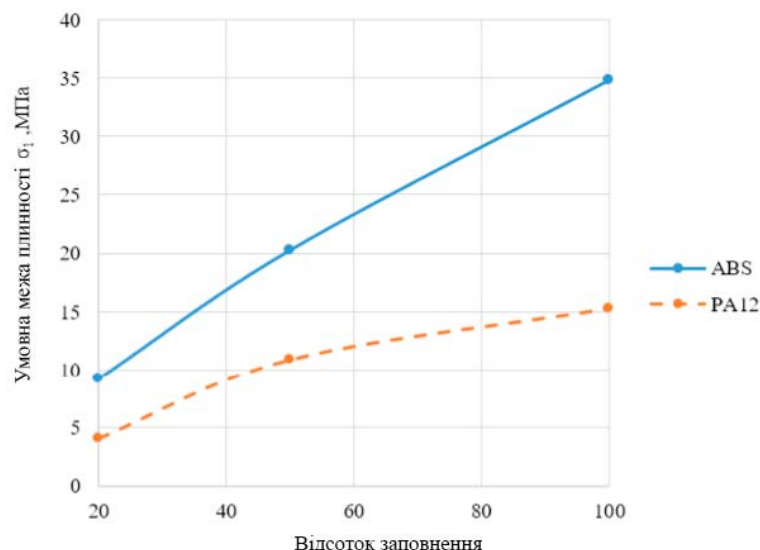


Рис. 2.8 – Залежність умовної межі плинності 3D-друкованих зразків із пластиків акрилонітрилбутадієнстирол (ABS) і поліамід-12 (PA12) від відсотка заповнення

Кожен із зазначених видів заповнення може бути виконаний із різним відсотком у межах від 0 (у цьому разі деталь буде порожнистою, надруковані тільки зовнішні стінки) до 100 (деталь повністю заповнена матеріалом - аналог лиття). Як показують дослідження, зі зростанням відсотка заповнення міцність зразків збільшується за законом, близьким до лінійного (рис. 2.8) [13].

На малюнку вище показано залежність міцності зразків із заповненням у вигляді сітки від відсотка заповнення для двох різних матеріалів друку. Як видно з графіка, збільшення відсотка внутрішнього заповнення від 20 до 100 призводить до збільшення міцності приблизно втричі.

2.2 Обґрунтування вибору просочувальних складів

Полімерні компаунди являють собою композиції, що складаються з основи і затверджувача. У вихідному стані компоненти являють собою рідкі субстанції: основа - полімер, олігомер або мономер, а затверджувач - спеціальна речовина, яка здійснює зшивання молекулярних ланцюгів основи та призводить до затвердіння [14]. Після з'єднання двох компонентів у відведених пропорціях суміш деякий час залишається в рідкому стані (від декількох хвилин до годин); цей час називається часом життя, або періодом желатинізації. Остаточне затвердіння настає в деяких випадках через добу і більше, а іноді тільки після нагрівання до невеликих температур (до 200 °С).

Для поліпшення властивостей компаундів до їхнього складу також вводять розчинники, пластифікатори та інші добавки.

Найпоширеніші епоксидні, поліефірні, поліуретанові та силіконові компаунди. Властивості деяких компаундів представлені в табл. 2.3. Оскільки для процесу просочення потрібен досить тривалий час, у цьому разі розглядаються тільки компаунди з великим часом життя. Компаунди на основі епоксидних і поліефірних смол дають змогу отримувати доволі тверді

та міцні матеріали, тоді як поліуретани та силікони з великим часом життя придатні тільки для створення м'яких, еластомерних матеріалів.

Таблиця 2.3 – Властивості деяких полімерних компаундів

	Час життя за 20 °С, хв	В'язкість, сПз	Межа міцності, МПа
Епоксидна смола ЕД20 + затверджувач Етал 45М	50-90	17000	70
Поліефірна смола LERPOL TIX 717	15-20	450	75
Поліуретан Силагерм 6070П	15-20	3000	10
Силікон Силагерм 7130	30-180	5000-15000	20

З огляду на хороші механічні характеристики і доступність далі детальніше буде розглянуто клас компаундів на основі епоксидних смол.

2.2.1 Епоксидні компаунди

Епоксидні компаунди можна назвати найпоширенішим і найбільш затребуваним класом реактопластів. Вони мають такий комплекс міцнісних, теплофізичних, діелектричних, адгезійних та інших показників, якого не має жоден інший клас. Цей комплекс властивостей у сукупності з технологічною зручністю та економічною вигодою зумовив широке застосування епоксидних олігомерів у промисловості, будівництві та сільському господарстві. Цей клас матеріалів містить великий перелік різних смол, що містять епоксидні (оксиранові) групи: циклоаліфатичні епоксидні смоли, епоксидні смоли на основі бісфенолу А, аміноепоксидні смоли, епоксидні смоли на основі ди- та поліфенолів, олігоуретанепоксиди та епоксидні смоли, які містять галогени. Найширшого поширення набули ЕСБА - епоксидіанові смоли, одержувані на основі бісфенолу А та епіхлоргідрину, реакцію взаємодії яких показано на рис. 2.9.

технологічного процесу затвердіння для більшості видів затверджувачів не означає, що вони однаково активні й утворюють ідентичні реактопласти. Ще одним не менш важливим показником для епоксидної смоли є значення молекулярно-масового розподілу. ЕСБА являють собою суміш полімергомолів з різними значеннями числа "n", тобто з різними значеннями молекулярної маси. У табл. 2.5 наведено значення фізико-хімічних властивостей полімергомолів залежно від ступеня полімеризації "n" [26].

Таблиця 2.5 – Властивості полімергомолів за різних значень "n"

Характеристика	Властивості полімергомолів при "n" рівному					
	0	1	2	3	4	5
Зовнішній вигляд	Кристалічна речовина	В'язка смолоподібна речовина		Тверда смолоподібна речовина		
Молекулярна маса, г/моль	340,4	624,7	909,1	1193	1478	1762
Вміст епоксидних груп	25,26	13,76	9,46	7,21	5,82	4,88
Вміст гідроксильних груп	0,00	2,72	3,74	4,27	4,60	4,82
Щільність, г/см ³ при 25 °С	1,160	1,181	1,190	1,196	1,200	1,204
В'язкість, Па*с при 25 °С	4,80	25,3	48,5	78,2	115,0	160,0
Теплоємність, Дж/(г·К)	2,29	2,28	2,28	2,28	2,28	2,28

Вибір технології затвердіння, що охоплює вибір затверджувача, каталізатора реакції, а також інтенсивності термообробки, є головним чинником, що визначає якість готової продукції з реактопластів. Епоксидні ж смоли мають найбільшу варіативність властивостей і структури. Вибір складу, молекулярної ваги олігомерів, класу і кількості затверджувача і каталізатора дає змогу в широких межах змінювати природу ланок, частоту

хімічних вузлів сітчастого полімеру тощо. На малюнку 2.10 наведено структурні формули основних видів затверджувачів, а в таблиці 2.6 - властивості епоксидних смол у разі використання різних видів затверджувачів [17].

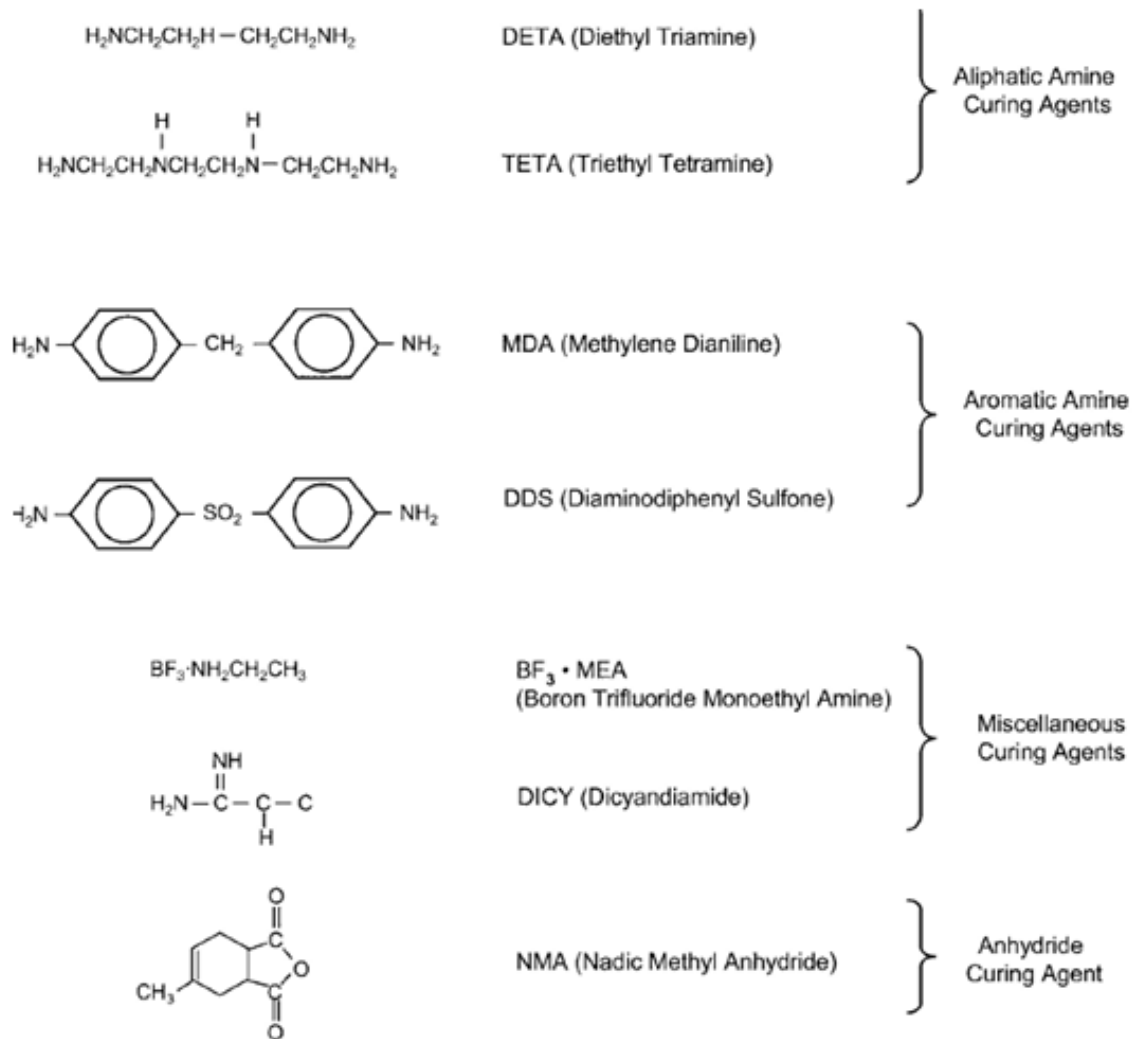


Рис. 2.10 – Структурні формули основних видів затверджувачів епоксидних смол

У роботі [17] автори досліджували вплив режимів затвердіння епоксидної системи, що складалася зі смоли ЕД-13 і триетаноламінтитанату, на структуру і властивості матеріалу (табл. 2.7).

Таблиця 2.6 – Механічні властивості епоксидної смоли Епон-828, затверділої різними затверджувачами за оптимальних умов

Затверджувачі	Кількість затверджувача, ваг.ч. на 100 ваг.ч. смоли	Режим затвердіння, год/°С	Модуль пружності, кгс/мм ²	Відносне подовження, %	Теплостійкість, °С
Діетилентетрамін	12	2/100	290	6,3	115
м - фенілендіамін	14	2/80 + 2/150	340	5,1	110
Ангідрид тетрагідрофталевої кислоти + диметил-анілін	75+0,1	3/120 + 4/150	280	4,1	135

Таблиця 2.7 – Вплив температури затвердіння епоксидної смоли ЕД-13 на властивості виробів. Час затвердіння у всіх випадках 2 години

Температура затвердіння, °С	100	120	140	160
Модуль пружності, 10 ⁻³ кгс/см ²	58,0	55,0	55,0	54,8
Вільний об'єм, %	0,33	0,39	0,58	0,73
Разрушающее напряжение при растяжении, кгс/см ²	675	635	576	348

Як видно, зі зростанням температури затвердіння міцність матеріалу знижується, у зв'язку з чим можна дійти висновку, що переважним є вибір нижчих температурних режимів остаточної термообробки епоксидних смол.

У роботі [18] досліджували вплив різних видів затверджувачів і режимів затвердіння на ударну в'язкість на прикладі епоксидіанової смоли ЕД-20 (табл. 2.8).

Як видно з результатів дослідження, найкращих результатів за значенням ударної в'язкості вдалося досягти за використання у всіх випадках двоступеневого режиму затвердіння. Найбільше значення ударної в'язкості спостерігається при використанні як затверджувача триетаноламіну.

Таблиця 2.8 – Вплив видів затверджувачів і режимів затвердіння на ударну в'язкість олігомеру марки ЕД-20 [88].

Вид амінового затверджувача	Вміст аміну, %	Режими затвердіння		Ударна в'язкість, кДж/м ²	
		безперервний	двоступеневий	безперервний	двоступеневий
<i>o</i> -Фенілендіамін	15	80°C, 8 ч	60°C, 1,5 ч.; 120°C, 6 ч.	11,2	16,7
<i>m</i> -Фенілендіамін	15	80°C, 6 ч	60°C, 1 ч.; 100°C, 4 ч.	16,1	25,8
<i>p</i> -Фенилендиамин	15	80°C, 6 ч	60°C, 1,5 ч.; 100°C, 4 ч.	8,8	11,7
Діетиламін	25	80°C, 6 ч.	60°C, 3 ч.; 110°C, 6 ч.	13,2	16,3
Триетаноламін	15	120°C, 6 ч.	100°C, 2 ч.; 140°C, 6 ч.	21,8	32,2
Хінолін	45	120°C, 5 ч.	100°C, 1,5 ч.; 140°C, 4 ч.	5,7	8,7

2.3 Теоретичний аналіз процесів в'язкої течії полімерних компаундів під час здійснення просочення

2.3.1 Особливості в'язко-текучої поведінки полімерів

Реологія є розділом фізики, що вивчає деформаційні властивості та плинність речовини. Для полімерів вивчення їхніх реологічних властивостей є особливо важливим, оскільки перероблення полімерних матеріалів відбувається у в'язко-плинному стані, і при цьому вони демонструють досить складну поведінку. Основним предметом вивчення реології є в'язкість різних середовищ.

В'язкість є мірою внутрішнього тертя тіл і характеризує опір їхній течії, тобто переміщенню одного шару тіла відносно іншого під дією зовнішніх сил. Розглянемо рух рідини, у якій в'язкість проявляється як переміщення окремих плоских шарів рідини один відносно одного (рис. 2.11). Тоді шари, прилеглі до поверхні нерухомих стінок, матимуть швидкість руху меншу, ніж шари, що знаходяться в центрі, через явище внутрішнього тертя, тобто

швидкість руху шарів у цьому випадку буде функцією від відстані між стінками (X).

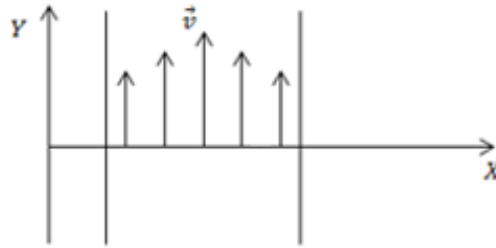


Рис. 2.11 – Схема руху шарів рідини між двома нерухомими стінками

У такому разі сила тертя між двома сусідніми шарами рідини, віднесена до одиниці площі, описується таким рівнянням:

$$\tau = \eta \frac{dv}{dx}, \quad (2.1)$$

де $\frac{dv}{dx} = \dot{\gamma}$ – градієнт швидкості рідини по осі X (між нерухомими стінками);

η – коефіцієнт внутрішнього тертя, що залежить від властивостей конкретної рідини, або по-іншому коефіцієнт динамічної в'язкості, який часто називають просто динамічною в'язкістю. Її розмірність у системі СІ - Па·с, у системі СГС - П (Пуаз). $1 \text{ Па} \cdot \text{с} = 10 \text{ П}$.

Крім динамічної в'язкості, часто вживається величина кінематичної в'язкості:

$$\nu = \frac{\eta}{\rho}, \quad (2.2)$$

де η – динамічна в'язкість, Па·с, або П;

ρ – густина рідини, $\text{кг}/\text{м}^3$, або $\text{г}/\text{см}^3$.

Таким чином, розмірність кінематичної в'язкості в системі СІ становить $\text{м}^2/\text{с}$, а в системі СГС прийнято спеціальне позначення - Ст (Стокс). $1 \text{ м}^2/\text{с} = 10^4 \text{ Ст}$.

Залежності напруги зсуву τ від швидкості зсуву називають кривими течії (рис. 2.12а), а в'язкості від швидкості зсуву - кривими в'язкості (рис. 2.13). Криві течії також можуть бути побудовані в координатах, коли за

віссю абсцис відкладають значення швидкості зсуву, а за віссю ординат - напругу зсуву (рис. 2.12б). Реальні рідини залежно від поведінки під навантаженням поділяються на ньютонівські та неньютонівські. У ньютонівських рідинах в'язкість не залежить від прикладеного навантаження, тоді як у неньютонівських залежить. Неньютонівські рідини поділяються на псевдопластичні, для яких в'язкість зі збільшенням навантаження падає, і дилатантні, для яких навпаки, зростає [19].

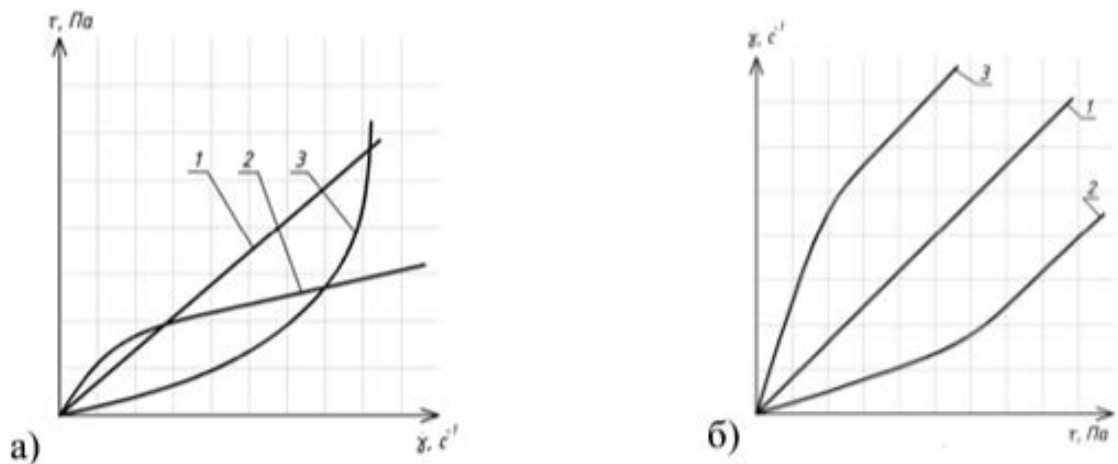


Рис. 2.12 – Типові реологічні криві: а - реологічні криві в координатах напруга зсуву-швидкість зсуву; б - реологічні криві в координатах швидкість зсуву-напруга зсуву; 1 - ньютонівські рідини; 2 - псевдопластичні рідини; 3 - дилатантні рідини

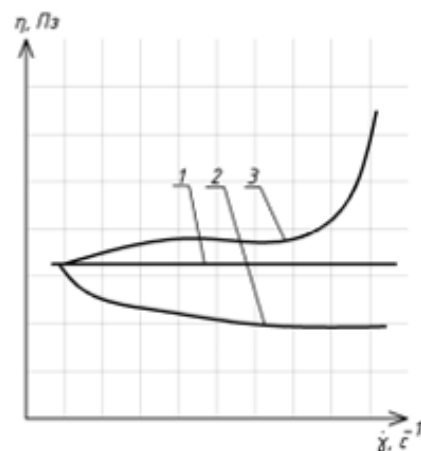


Рис. 2.13 – Типові криві в'язкості: 1 - ньютонівські рідини; 2 - псевдопластичні рідини; 3 - дилатантні рідини

Розчини і розплави полімеру мають аномалію в'язкості, тобто вони не підкоряються ньютонівським законам течії і виявляють характер псевдопластичних або дилатантних неньютонівських рідин. Загальна залежність напруги зсуву від швидкості зсуву для таких рідин виражається у вигляді степеневі функції, відомої як рівняння Освальда-Вейля [19]:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma}^n, \quad (2.3)$$

де n – коефіцієнт, що характеризує цю систему: за $n = 1$ рідина є ньютонівською і рівняння (2.3) збігається з рівнянням (2.1); за $n > 1$ рідина є дилатантною, за $n < 1$ – псевдопластичною.

Для олігомерних термореактивних компаундів епоксидного класу, як правило, індекс течії n відрізняється від одиниці. Неньютонівська поведінка цих рідин особливо помітна в процесах просочення компонента. Оцінка рівня змочуваності проводиться через аналіз крайового кута змочування, який залежить від поверхневого натягу на межах розділу фаз. Умову розтікання краплі по твердій поверхні описує рівняння Юнга [40]:

$$\sigma_{ТГ} = \sigma_{ТР} + \sigma_{ЖГ} \cdot \cos \theta, \quad (2.4)$$

де $\sigma_{ТГ}$ – поверхневий натяг на межі розділу тверде тіло-газ;

$\sigma_{ТР}$ – поверхневий натяг на межі розділу тверде тіло-рідина;

σ – поверхневий натяг на межі розділу рідина-газ;

θ – крайовий кут змочування рідким компонентом твердого.

Схему визначення кута змочування представлено на рис. 2.14.



$$a - \theta > 90^\circ; \quad a - \theta < 90^\circ$$

Рис. 2.14 – Схема до визначення крайового кута змочування

З рівняння (2.4) знаходять значення крайового кута змочування:

$$\cos \theta = \frac{\sigma_{\text{ТГ}} - \sigma_{\text{ТР}}}{\sigma_{\text{ЖГ}}} \quad (2.5)$$

За кутів $\theta < 90^\circ$ поверхні змочуються обмежено, за кутів $\theta > 90^\circ$ не змочуються. Під час розтікання рідкого полімеру поверхнею твердого крайові кути і форма поверхонь змочування змінюється складним чином (рис. 2.15).

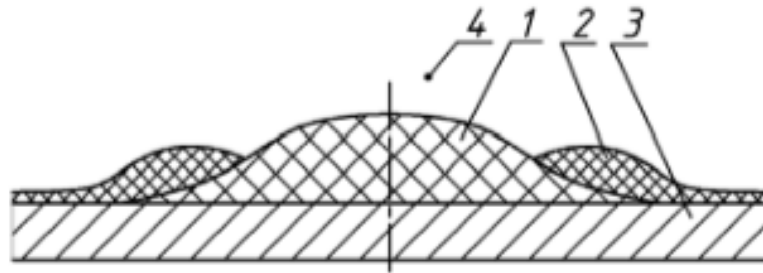


Рис. 2.15 – Процес розтікання рідкої фази: 1 - крапля рідкого полімеру; 2 - нижній шар краплі рідкого полімеру; 3 - поверхня твердого змочуваного тіла; 4 - зовнішнє середовище (повітря)

Нижній шар краплі рідкого полімеру заввишки 10^{-5} мкм витягується з краплі під дією сил молекулярного тяжіння з боку поверхні твердого тіла. Далі починає переміщатися другий шар, висота якого 0,1...10 мкм. При досягненні рівноваги між цими двома шарами перший шар зникає. Цю стадію процесу розтікання називають первинним розтіканням. Коефіцієнт розтікання - це робота, необхідна для розриву рідини і створення двох нових поверхонь, і він дорівнює різниці робіт адгезії W_A і когезії W_K [31]:

$$S_p = W_A - W_K \quad (2.6)$$

Робота адгезії являє собою роботу, яку необхідно затратити для розриву міжфазного поверхневого шару. У цьому випадку енергія витрачається на утворення двох поверхонь розділу, рівних за величиною, але різних за властивостями. У системі рідина-газ робота адгезії може бути обчислена за рівнянням Дюпре таким чином:

$$W_A = \sigma_{\text{ЖГ}} + \sigma_{\text{ТГ}} - \sigma_{\text{ТР}} \quad (2.7)$$

Роботу когезії визначають як роботу розриву однорідної гомогенної фази з утворенням двох нових поверхонь розділу цієї фази з її власною парою (газом). Робота когезії дорівнює оборотній роботі розриву стовпчика рідини з одиничною площею перерізу і визначається таким чином:

$$W_K = 2\sigma_{ЖГ} \quad (2.8)$$

2.4 Розроблення методики розрахунку максимально можливої товщини деталі під час вакуумного просочення 3D-друкованого каркаса

Процеси просочування олігомерними компаундами твердих каркасів багато в чому аналогічні процесам руху рідини в капілярах. Загальний випадок деформації рідини під час течії описується диференціальними рівняннями Нав'є-Стокса, які складають основу механіки рідин і газу [33]. У векторній формі воно подається в такому вигляді:

$$\rho \frac{d\vec{v}}{dt} = -\rho g - \text{grad}P + \mu \Delta \vec{v} \quad (2.9)$$

де ρ – густина рідини;

$\frac{d\vec{v}}{dt}$ – швидкість зміни рідини в точці;

g – прискорення вільного падіння;

P – прикладений тиск;

μ – коефіцієнт динамічної в'язкості;

Δ – оператор Лапласа.

У роботі [32] для випадку просочення волокнистих наповнювачів олігомерними зв'язувальними загальний вигляд рівняння (2.9) пропонують звести до одного звичайного диференціального рівняння щодо єдиної компоненти швидкості рідини v :

$$\eta v'' + P = 0 \quad (2.10)$$

де η – динамічна в'язкість рідини;

P – перепад тиску на довжині ділянки просочення, що має розмірність Па/м.

Однак, якщо враховувати в моделі процесу просочення наявність якоїсь пористої структури, що перешкоджає просоченню (такої, як 3D-друкований каркас), то до рівняння (2.10) справедливо ввести якийсь коефіцієнт, що описує цей опір [31]:

$$\eta v'' - \frac{\eta}{\eta_m^2} v + P = 0, \quad (2.11)$$

де $\frac{\eta}{\eta_m^2} v$ – перепад тиску, зумовлений силами опору руху рідини через пористий каркас;

η_m – неklasичний фізичний параметр, що має розмірність довжини.

Неважко переконатися в тому, що (2.10) є граничним випадком (2.11) за $\eta_m \rightarrow \infty$. З іншого боку, якщо розглядати досить широкі канали течії, для яких величиною $\eta_m^2 v''$ можна знехтувати порівняно зі швидкістю течії v , співвідношення (2.11) набуває вигляду закону Дарсі [30]:

$$\eta v = KP, \quad (2.12)$$

де $K = \eta_m^2$ – коефіцієнт проникності в законі Дарсі;

v – швидкість просочення. Узагальнення рівняння Нав'є-Стокса і закону Дарсі називають рівнянням Нав'є-Стокса-Дарсі. Закон Дарсі описує фільтрацію рідин і газів у пористому середовищі. Коефіцієнт проникності для випадку просочення пористих структур може бути розрахований за такою формулою [32]:

$$K = \frac{\Pi \cdot \eta \cdot x^2}{2\Delta P \tau}, \quad (2.13)$$

де Π – пористість просочуваного каркаса;

η – в'язкість просочувального середовища;

x – характеристичний розмір перерізу деталі, що просочується;

ΔP – перепад тиску;

τ – час просочування.

Швидкість просочення в цьому разі можна розрахувати згідно з [35] таким чином:

$$v = \frac{\Delta P h^2}{3\eta}, \quad (2.14)$$

де h – відстань між шарами просочуваного каркаса.

Аналізуючи отримані рівняння, можна зробити висновок, що під час просочення найбільший вплив на результат чинять реологічні параметри процесу. До їх числа належить градієнт створюваного під час просочення тиску, в'язкість просочувального складу, а також величина проникності компонента, що просочується.

У розглянутому варіанті просочення 3D-друкованих каркасів проникність буде задаватися товщиною стінки деталі, а також відсотком внутрішнього заповнення, оскільки надруковані стінки будуть перешкодою для течії компаунда. Швидкість подачі сполучного в цьому разі визначається різницею тисків у порожнинах зразка, з яких виходить повітря під час відкачування тиску з камери, і зовнішнім атмосферним тиском, який подається назад у камеру після відкачування. На практиці встановити реальний тиск усередині порожнин і відповідно різницю тисків у процесі просочення не видається можливим; побічно рівень розрядження усередині зразків можна охарактеризувати за тривалістю проведення просочення (витримки зразків у компаунді при зниженому тиску): що більший цей проміжок часу, то більша розрядженість створюється усередині зразків.

На основі отриманих аналітичних залежностей можна розрахувати максимально можливу товщину 3D-друкованого каркаса, просочуваного наскрізь епоксидним компаундом під час вакуумного просочення. В'язкість епоксидного компаунда на основі смоли ЕД-20, згідно з літературними даними, лежить у діапазоні 12-25 Па·с. Прийmemo для розрахунків середнє значення $\eta = 18,5$ Па·с. Максимально можливий градієнт тиску, створюваний під час вакуумного просочення, дорівнює 1 атмосфері, тобто $\Delta P = 10^5$ Па. Відстань між шарами каркаса, що просочується, дорівнюватиме товщині шару під час друку і становить $h = 0,2$ мм. Тоді за формулою (2.14) отримуємо таке значення швидкості просочення:

$$v = \frac{10^5 \cdot 0,2^2}{3 \cdot 18,5} = 72 \text{ мм}^2/\text{с} \quad (2.15)$$

Якщо виразити з формули (2.12) коефіцієнт проникності і підставити відомі значення в'язкості, швидкості просочення і перепаду тиску, то можна обчислити значення цього коефіцієнта:

$$K = \frac{\eta v}{P} = \frac{18,5 \cdot 72}{10^5} = 0,01332 \text{ мм}^2/\text{с} \quad (2.16)$$

Значення максимально можливої товщини каркаса під час просочення, яке нас цікавить, можна знайти з виразу (2.13). З урахуванням обчисленого відомого коефіцієнта проникності K для розрахунків нам необхідно також задатись пористістю каркаса і часом просочування. У разі, якщо каркас являє собою 3D-друковану структуру із заповненням 33 %, її пористість приблизно дорівнюватиме 67 %, тобто $\Pi = 0,67$. Час просочування приймемо 30 хв, тобто $\tau = 1800$ с. Тоді переріз деталі, що просочується, можна виразити таким чином:

$$x = \sqrt{\frac{K \cdot 2 \Delta P \cdot \tau}{\Pi \cdot \eta}} = \sqrt{\frac{0,01332 \cdot 2 \cdot 10^5 \cdot 1800}{0,67 \cdot 18,5}} = 622 \text{ мм} \quad (2.17)$$

Таким чином, у разі використання епоксидної смоли ЕД-20 як просочувального складу і 3D-друкованого каркаса із заповненням 33 % максимальна товщина деталі, яку можна буде просочити у вакуумній камері за таких умов, становить 622 мм.

Середні за елементарним об'ємом V напруження і деформації розраховуються таким чином [93]:

$$\overline{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \sigma_{ij}(x_1, x_2, x_3) dV, \quad (2.18)$$

$$\overline{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon_{ij}(x_1, x_2, x_3) dV, \quad (2.19)$$

де σ_{ij} – тензор напружень;

ε_{ij} – тензор деформацій.

Для представленого об'єму V закон Гука буде виражатися як

$$\overline{\sigma}_{ij} = C_{ijkl} \times \varepsilon_{kl}, \quad (2.20)$$

де C_{ijkl} – тензор ефективних (еквівалентних) модулів пружності.

Для визначення середніх $\overline{\sigma_{ij}}$ і $\overline{\varepsilon_{ij}}$ за формулами (2.18) і (2.19) потрібно знати розподіл полів напружень і деформацій в об'ємі V . На практиці використовують формули для ефективних характеристик, одержувані на основі рівняння адитивності або правила сумішей. За припущення, що деформації по всьому об'єму V односпрямованого композиту постійні, з (2.18) випливає, що й ефективний модуль постійний [33]. Тоді модуль пружності композиційного матеріалу можна обчислити з такого співвідношення:

$$E_{KM} = E_M V_M K_M + E_H V_H K_H, \quad (2.21)$$

де E_M і E_H – модулі пружності матриці та наповнювача відповідно;

V_M і V_H – об'ємні частки матриці та наповнювача;

K_M – коефіцієнт умов роботи матриці, що враховує її пористість, особливості навантажування та ін.;

K_H – коефіцієнт умов роботи наповнювача, що враховує його орієнтацію, дисперсію міцності тощо.

Правило сумішей, розглянуте вище, застосовується також для визначення межі міцності при розтягуванні композиційного матеріалу. Відповідно до цього правила

$$\sigma_{KM} = \sigma_M V_M K_M + \sigma_H V_H K_H, \quad (2.22)$$

де σ_M і σ_H – межа міцності матриці та наповнювача відповідно.

РОЗДІЛ 3 ПРОГРАМА І МЕТОДИКИ ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

3.1 Розробка програми та методики досліджень просочуваності 3D-друкованих каркасів залежно від геометрії каркаса

На першому етапі експериментальних досліджень вирішено оцінити якість просочуваності 3D-друкованих каркасів полімерними компаундами за різних умов просочення. Як було встановлено в попередньому розділі, на процес просочення полімерних каркасів компаундом впливає проникність каркаса і градієнт тисків, виражений у часі витримки зразків у компаунді в умовах розрядження. Для проведення експериментальних досліджень вирішено варіювати час просочення таким чином: 10, 20 і 30 хв. Проникність каркаса змінюватиметься залежно від товщини стінки та відсотка внутрішнього заповнення.

Проникність можна охарактеризувати кількістю пор у зразку, що залишилися після просочення. Просочуваність вирішено оцінювати як величину, обернено пропорційну кількості виявлених пор. Для визначення залежності проникності каркасів від факторів їхньої геометрії використовується D-оптимальний план експерименту. У цьому разі рівняння регресії для двофакторного експерименту матиме такий вигляд:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (3.1)$$

де x_1 – кодоване значення товщини стінки каркаса;

x_2 – кодоване значення відсотка заповнення каркаса;

y – просочуваність (величина, обернено пропорційна кількості пор у зразку);

b_n - експериментальні коефіцієнти рівняння регресії.

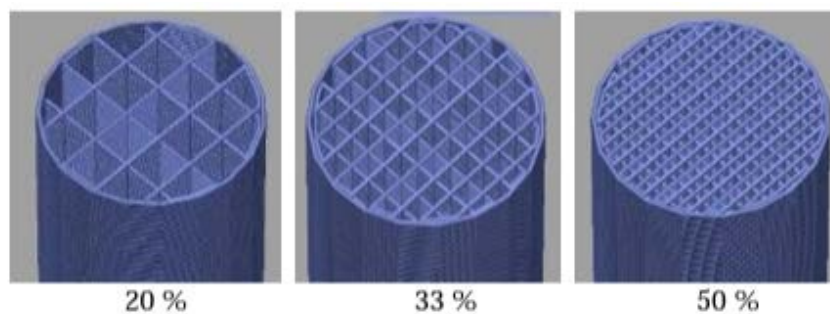
Рівні та фактичні значення факторів варіювання планованого експерименту наведено в таблиці 3.1. Для кожного варіанта варіювання факторів планується виготовити по три зразки для підвищення достовірності

результатів. На рис. 3.1 показано переріз 3D-моделей зразків із різною геометрією.

Таблиця 3.1 – Фактори варіювання експерименту з оцінки просочуваності полімерних каркасів компаундами

Фактори		Уровні варьирования		
Натуральний вигляд	Кодований вигляд	-1	0	-1
Товщина стінки, кількість ниток	x_1	0	1	2
Заповнення, %	x_2	20	33	50

Варіанти зразків з однією зовнішньою стінкою:



Варіанти зразків із двома зовнішніми стінками:

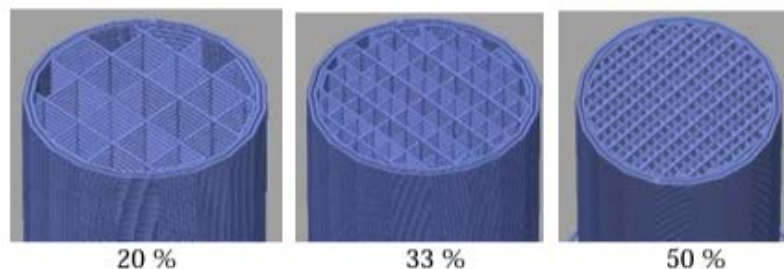


Рис. 3.1 – Перерізи 3D-моделей зразків, що просочуються

Зразки для просочення являтимуть собою циліндри діаметром 15 мм і висотою 40 мм. Для дослідження кількості пор у зразках вирішено застосовувати руйнівний метод перерізів. Його суть полягає в тому, щоб розрізати деталь або досліджуваний зразок у кількох перерізах і візуально визначити наявність пір в отриманих перерізах у якісному або кількісному вираженні. Важливими аспектами методу є обране місце розташування перерізів і спосіб підрахунку пор.

Під час дослідження просочуваності каркасів різної геометрії компаундами циліндричні зразки розрізали на ручному відрізному верстаті "Labotom-3 Struerus" (рис. 3.2) у кількох перерізах відповідно до схеми, представленої на рис. 3.3.



Рис. 3.2 – Ручний відрізний верстат "Labotom-3 Struerus"



Рис. 3.3 – Схема розрізання просочених зразків

В отриманих перерізах проводили підрахунок кількості пір у штуках у межах усієї партії зразків (по три зразки з кожним набором факторів варіювання). Просочуваність оцінювали як величину, обернену частоті появи пор. Крім чисельного значення просочуваності, отриману величину можна також оцінити якісно. Для цього розроблено таку методику оцінювання: 0-0,5 - незадовільна просочуваність; 0,6-0,7 - задовільна просочуваність; 0,8-0,9 - хороша просочуваність; $>0,9$ - відмінна просочуваність.

3.2 Програма досліджень механічних властивостей композитів

На другому етапі експериментальних досліджень будуть оцінюватися механічні властивості композиту (межа міцності та ударна в'язкість). Зразки являтимуть собою стандартні зразки для випробувань на розтягнення і випробувань на ударну в'язкість за стандартизованими методиками (рис. 3.4).

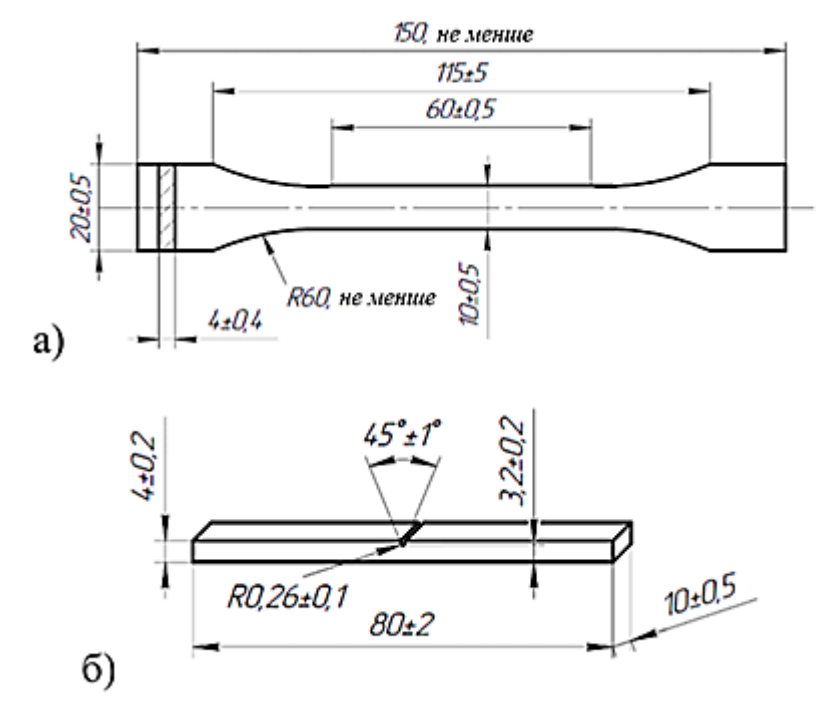


Рис. 3.4 – Зразки для дослідження механічних властивостей композиційного матеріалу: а - випробування на розтягнення; б - випробування на ударну в'язкість

3.2.1 Розробка плану експерименту з дослідження впливу внутрішньої геометрії каркасів на механічні властивості композиту

Факторами варіювання в цьому експерименті виступатимуть співвідношення між кількістю пластику та епоксидної смоли в об'ємі зразка (рис. 3.5), а також напрямок орієнтації укладання шарів пластику під час друку відносно навантаження, що прикладається в процесі випробувань (рис. 3.6). Для кожного набору факторів буде виготовлено і випробувано по три зразки. У табл. 3.2 міститься маркування випробовуваних зразків.

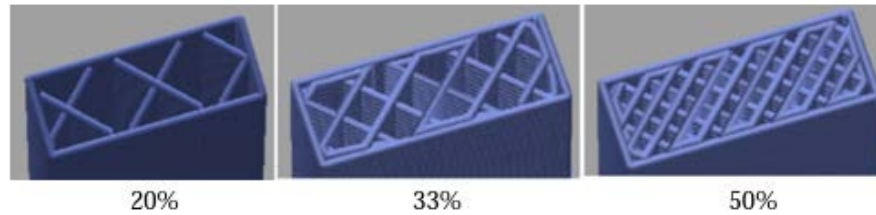


Рис. 3.5 – Відсоток заповнення зразків під час друку PLA пластиком

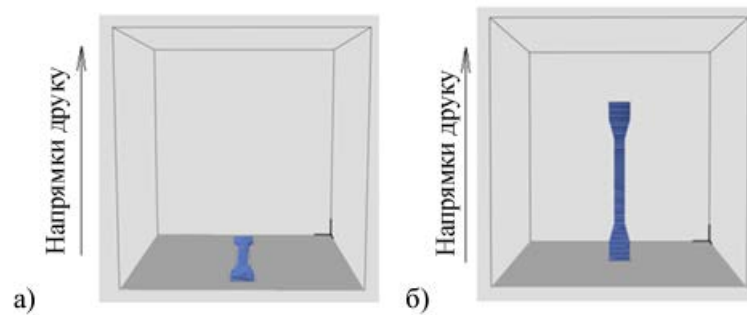



Рис. 3.6 – Орієнтація зразків у процесі друку: а - шари орієнтовані вздовж осі зразка (і вздовж напрямку докладання навантаження під час випробувань); б - шари орієнтовані впоперек осі зразка (і напрямку навантаження)

Таблиця 3.2 – Зразки полімерного композиційного матеріалу для випробувань механічних властивостей

Номери зразків		Відсоток заповнення під час 3D-друку		
		20	33	50
Напрямок укладання шарів пластику під час друку щодо осі зразка	Уздовж 	1.1-1.3 (3 шт.)	2.1-2.3 (3 шт.)	2.1-2.3 (3 шт.)
	Поперек 	4.1-4.3 (3 шт.)	5.1-5.3 (3 шт.)	6.1-6.3 (3 шт.)

Внутрішня геометрія зразків, а в подальшому і рівень демонстрованих механічних властивостей, визначається не тільки відсотком заповнення пластиком в кожному шарі друку (в даному дослідженні обраним на рівнях 20, 33 і 50 %), а й характером укладання шарів пластику один на одного.

Залежно від виставлених параметрів друку (температура, швидкість подачі та ін.), нитки пластику між шарами під час друку можуть склеюватися або залишатися висіти в натягнутому стані одна над одною (рис. 3.7). Залежно від характеру укладання шарів формуються різні контури порожнеч усередині каркаса, що заповнюються надалі компаундом.

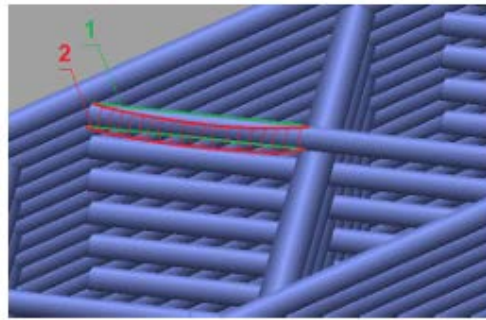


Рисунок 3.7 - Внутрішня геометрія друківаних зразків між шарами: 1 - теоретичний контур нитки: після охолодження може таким і залишитися, нитки продовжать висіти одна на одній; 2 - практичний контур нитки: у процесі друку нитка просіла і приклеїлася до попереднього шару

Під час підготовки цього експерименту було висловлено припущення, що рівень міцнісних властивостей композиту має бути вищим у випадку, відповідному застиганню пластику відповідно до теоретичного контуру 1 (без просідання і склеювання шарів один з одним). Параметри друку були підібрані з дотримання саме цієї умови і наведені в табл. 3.3.

Таблиця 3.4 - Параметри друку зразків на 3D-принтері

Температура сопла, °С	215
Коефіцієнт обдування, %	100
Коефіцієнт подачі пластику, %	98
Висота шару, мм	0,2
Ширина лінії периметров/заповнення, мм	0,34/0,34
Швидкість друку периметрів/заповнення, мм/с:	
- для зразків типу "вздовж"	60/30
- для зразків типу "поперек"	60/20

Зразки для дослідження будуть виготовлятися на 3D-принтері Picaso Designer X Pro з полілактиду (PLA-пластик). Просочення планується проводити в епоксидному клеї марки ЕДП, що складається з епоксидної смоли ЕД-20 і затверджувача ПЕПА, за допомогою вакуумної камери за кімнатної температури.

3.2.2 Розроблення плану експерименту з дослідження впливу хімічного складу компаунда та режиму затвердіння на механічні властивості композиту

Каркас зразків планують надрукувати на 3D-принтері PICASO 3D Designer X PRO з ABS-пластику (англ. acrylonitrile butadiene styrene - сополімер акрилонітрилу, бутадієну і стиролу) за режимом, представленим у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Параметри друку зразків на 3D-принтері

Температура сопла, °C	230
Коефіцієнт обдування, %	0
Коефіцієнт подачі пластику, %	98
Висота шару, мм	0,2
Ширина лінії периметров/заповнення, мм	0,34/0,34
Швидкість друку периметрів/заповнення, мм/с: - для зразків типу "вздовж" - для зразків типу "поперек"	60/30 60/20

Друк планується виконувати із заповненням 33 % у вигляді простої сітки з кутом у перехрестях 90° (рисунок 3.8а) і варіювати напрямок укладання шарів у процесі друку: уздовж осі зразків і поперек осі зразків (рис. 3.8б).

Після друку зразки планується піддати просоченню в компаунді на основі епоксидно-діанової смоли марки ЕД-20 із вмістом епоксидних груп від 20,0 % до 22,4 % за допомогою вакуумної камери. Будуть використані два види затверджувачів: триетилентетрамін (ТЕТА) і поліетиленполіамін (ПЕПА). Обидва являють собою первинні аліфатичні аміни для холодного затвердіння епоксидних смол за кімнатної температури. Їхні властивості та очікувані властивості затверділої композиції наведені відповідно в таблицях

3.6 і 3.7. Змішування має проводитися в пропорції 1 частина затверджувача до 10 частин основи за масою за допомогою автоматичної мішалки. Перед просоченням компоненти окремо і компаунд у суміші піддаються дегазації.

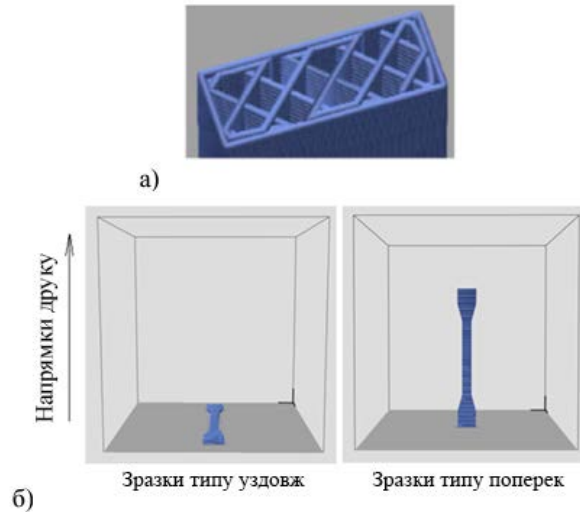


Рисунок 3.8 - Параметри роздрукування каркасів на 3D-принтері: а - внутрішнє заповнення, 33 %; б - напрямок укладання шарів у процесі друку

Таблиця 3.6 – Властивості затверджувачів

Затверджувач	Колір	Молекулярна маса, г/моль	Щільність, г/см ³	Динамічна в'язкість, мПа·с	Час желатенизації
ПЕПА	від світло-жовтого до темно-бурого	230-250	1,017	250	25 мин при 20-25 °С
ТЕТА	безбарвний	146	0,980	14	

Таблиця 3.7 – Очікувані властивості затверділої композиції на основі смоли ЕД-20

Затверджувач	Руйнівне напруження при розтягуванні, МПа	Відносне подовження, %	Ударна в'язкість без надрізу, кгс·см/см ²
ПЕПА	50	2	11
ТЕТА	146	3	20

Після просочення зразки планується затверджувати за двома різними режимами: одноступеневий - при кімнатній температурі протягом 5 діб, двоступеневий – 24 години при кімнатній температурі, потім 5 годин при 90 °С. Додатково для порівняння властивостей будуть виготовлені зразки з чистої смоли з аналогічними режимами затвердіння, а також зразки з чистого ABS пластику із заповненням 100 %. Зразки зі смоли будуть відливатися у відкриту силіконову форму, показану на малюнку 3.9. У кожній партії має бути по три зразки. У табл. 3.8 зведено загальні відомості про експериментальні зразки, заплановані до виготовлення на цьому етапі досліджень.



Рис. 3.9 – Силіконова форма для відливання зразків із чистої смоли

Таблиця 3.8 – Відомості про експериментальні зразки

Параметри 3D-друку	Параметри просочення			
	ЕД – 20 + ТЕТА, $T_{\text{кімн}}$	ЕД-20 + ПЕПА, $T_{\text{кімн}}$	ЕД-20 + ТЕТА, $T_{\text{повищ}}$	ЕД-20 + ТЕТА, $T_{\text{повищ}}$
Заповнення 100 %, шари вздовж	Просочення не виконувалося 3 шт. - розтягнення, 3 шт. - удар			
Заповнення 100 %, шари поперек	Просочення не виконувалося 3 шт. - розтягнення, 3 шт. - удар			
Заповнення 33 %, шари вздовж	3 шт. - розт., 3 шт. - удар	3 шт. - розт., 3 шт. - удар	3 шт. - розт., 3 шт. - удар	3 шт. - розт., 3 шт. - удар
Заповнення 33 %, шари поперек	3 шт. - розт., 3 шт. - удар	3 шт. - розт., 3 шт. - удар	3 шт. - розт., 3 шт. - удар	3 шт. - розт., 3 шт. - удар
Без 3D-друкованого каркаса	3 шт. - розт., 3 шт. - удар	3 шт. - розт., 3 шт. - удар	3 шт. - розт., 3 шт. - удар	3 шт. - розт., 3 шт. - удар
	3 шт. - розт., 3 шт. - удар	3 шт. - розт., 3 шт. - удар	3 шт. - розт., 3 шт. - удар	3 шт. - розт., 3 шт. - удар

3.3 Методики випробувань

3.3.1 Визначення пористості з використанням методу гідростатичного зважування

Метод гідростатичного зважування призначений для визначення густини матеріалів. Пористість у цьому випадку можна оцінити шляхом порівняння теоретичної ідеальної густини зразків із реальною, отриманою методом гідростатичного зважування. Цей метод належить до неруйнівних методів дослідження, тому може бути використаний для визначення рівня пористості зразків, призначених для подальших руйнівних випробувань на міцність.

Теоретична густина зразків визначається таким чином:

$$\rho_{\text{теор}} = \rho_{PLA} \cdot V_{PLA} + \rho_{ED-20} \cdot V_{ED-20} \quad (3.2)$$

де $\rho_{3D} = 1,24 \text{ г/см}^3$ - щільність матеріалу друкованого каркаса;

$\rho_{ED-20} = 1,21 \text{ г/см}^3$ - щільність застиглої смоли;

V_{PLA} , V_{ED-20} - об'ємні частки складових частин матеріалу,
 $V_{PLA} + V_{ED-20} = 1$.

Обсяг витраченого для друку пластику ρ_{3D} для кожного випадку заповнення визначали за допомогою слайсера для 3D-друку Polygon X. Об'єм епоксидної смоли для кожного випадку заповнення розраховували як різницю між об'ємом пластику, необхідного для друку зразка із заповненням 100%, і об'ємом пластику, витраченого на друк каркаса певного заповнення.

Реальну густину зразків оцінювали згідно методом гідростатичного зважування. Суть методу полягає в порівнянні маси зразка, виміряної на повітрі, з масою зразка, виміряною під час занурення в робочу рідину відомої густини. У цій роботі застосовувалася дистильована вода. Масу визначали з дискретністю вимірювань 0,0001 г за допомогою ваг A&D GR-200. Густина зразка обчислюють таким чином:

$$\rho_{\text{розр}} = \frac{m_{\text{в}}}{m_{\text{ж}}} \rho_{\text{ж}} \quad (3.3)$$

де m_b – маса зразка на повітрі;

$m_{ж}$ – маса зразка в робочій рідині;

$\rho_{ж} = 1 \text{ г/см}^3$ – густина робочої рідини (дистильованої води).

Пористість зразків розраховується за такою формулою:

$$\Pi = \frac{(\rho_{\text{теор}} - \rho_{\text{розр}})}{\rho_{\text{теор}}} \cdot 100\% \quad (3.4)$$

3.3.2 Методика випробувань на розтягнення

Випробування матеріалів на одновісне статичне розтягнення - один із найпоширеніших видів механічних випробувань (рисунок 3.10).

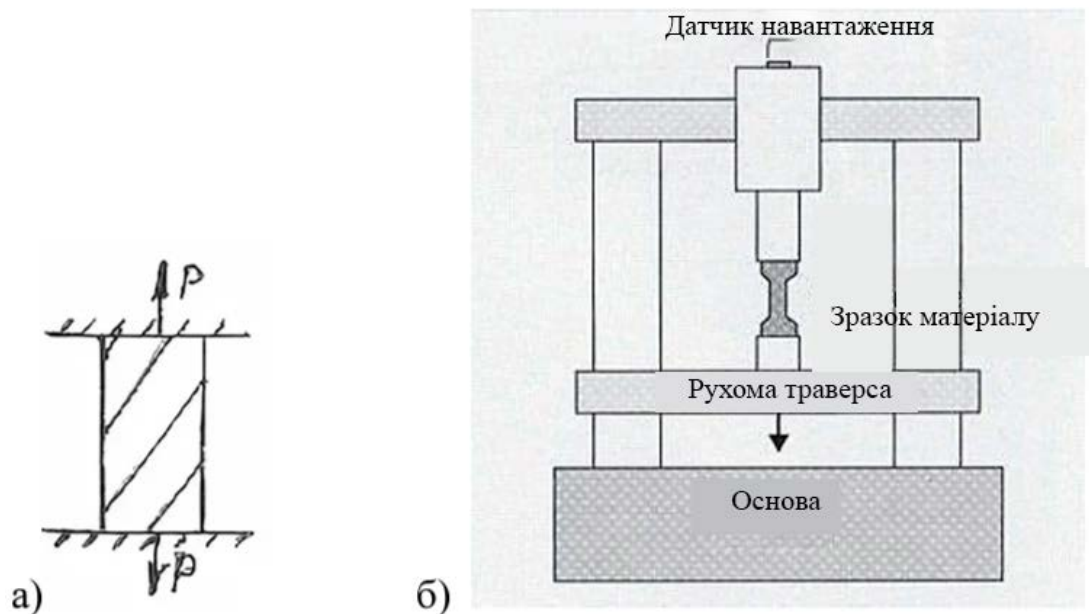


Рис. 3.10 – Випробування матеріалів на одновісне статичне розтягнення: а - схема прикладання навантаження; б - схема випробувальної машини

Спеціальний пристрій, так званий діаграмний апарат, у процесі навантажування зразка накреслює в певному масштабі криву в координатах напруга-деформація, яка називається діаграмою розтягування і має вигляд, що залежить від властивостей матеріалу (рис. 3.11).

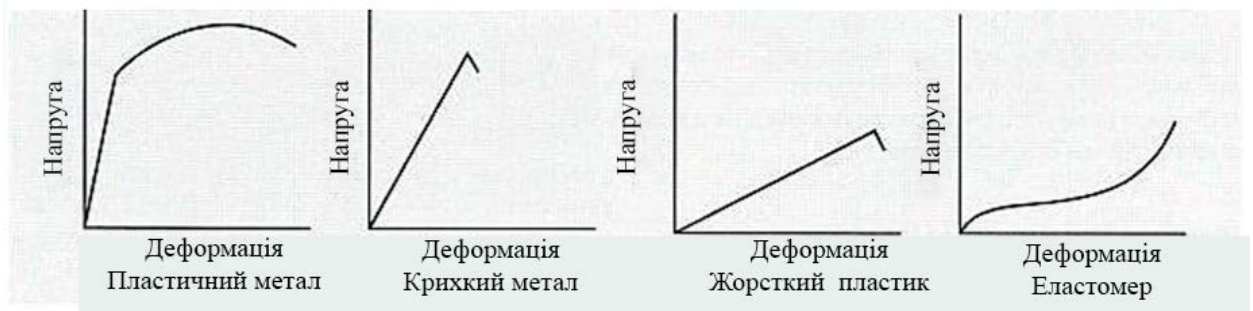


Рис. 3.11 – Вигляд кривих напруга-деформація для матеріалів різного типу

Аналізуючи дані, отримані з діаграми розтягування (рисунок 3.12), для матеріалів визначають такі основні міцнісні характеристики: межа плинності σ_T – напруга, за якої зразок деформується без помітного збільшення навантаження, що розтягується (тільки для пластичних матеріалів); межа міцності, або тимчасовий опір σ_B – напруга за максимального навантаження, що передує руйнуванню зразка.

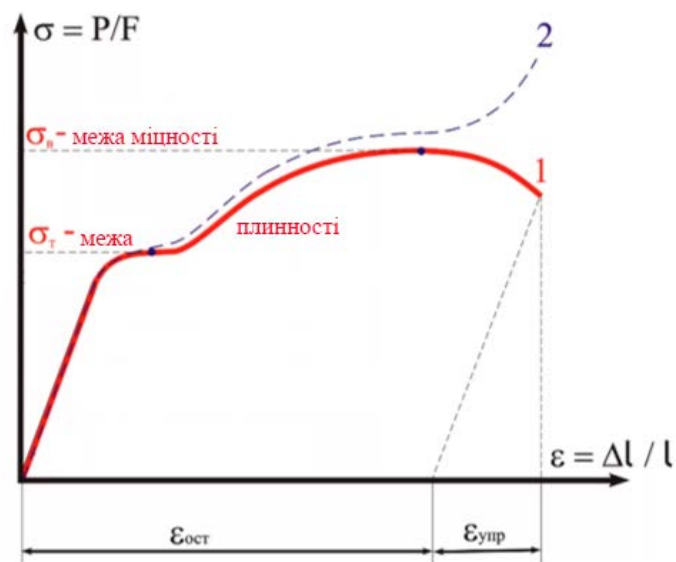


Рис. 3.12 – Діаграма розтягування пластичного матеріалу й основні характеристики міцності, що знімаються з неї

Були обрані зразки типу 2, описані раніше в підрозділі 3.1. Випробування проводилися на електромеханічній розривній машині TIME WDW-50E з механічними клиновими захопленнями (рис. 3.13). Керування

машиною, запис і опрацювання результатів здійснювалося за допомогою комп'ютера з використанням спеціального програмного забезпечення.



Рис. 3.13 – Розривна машина TIME WDW-50E

Швидкість навантаження зразків обирали відповідно до вимоги ДСТУ таким чином, щоб випробування тривало щонайменше 1 хв і становило для зразків типу "вздовж" 2 мм/сек, для зразків типу "впоперек" 1 мм/сек.

3.3.3 Методика випробувань на ударну в'язкість

Випробування матеріалів в умовах ударного навантаження (рис. 3.14) дають змогу отримати оцінку опору матеріалу миттєвому застосуванню навантаження та оцінити ступінь опору матеріалу раптовому руйнуванню. Характеристики матеріалів, одержувані за результатами випробувань в умовах ударного навантаження, дають змогу судити про ступінь надійності матеріалів.

Метод визначення ударної в'язкості за «Шарпі». За цього методу випробувань стандартний зразок у вигляді бруска з надрізом (концентратором напружень) встановлюють на опорах стійок випробувального приладу (маятничового копра) так, щоб удар маятника припадав проти надрізу. Маятник за допомогою спеціальної рукоятки піднімають на певну висоту у верхнє вихідне положення. Під час падіння

маятник ударяє по зразку, руйнує його і піднімається в кінцеве положення, яке слід зафіксувати. Знаючи кінцеве положення маятника, можна розрахувати роботу, яка була витрачена на руйнування зразка.

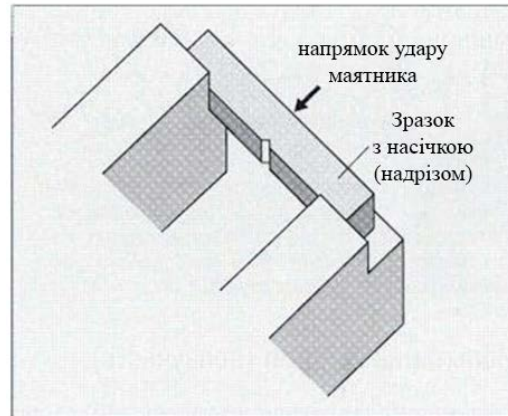


Рис. 3.14 - Схема випробувань матеріалів в умовах ударного навантаження

Ударна в'язкість зразка KC розраховується як відношення роботи K руйнування стандартного зразка до площі його поперечного перерізу F у місці надрізу:

$$KC = K/F, \text{ Дж/м}^2 \quad (3.5)$$



Рис. 3.15 – Маятниковий копер КМ-0,5

Для виготовлення образів було обрано зразок типу 2, надріз тип В. Випробування проводилися на маятниковому копрі КМ-0,5 (рис. 3.15).

РОЗДІЛ 4 РЕЗУЛЬТАТИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

4.1 Результати дослідження просочуваності 3D-друкованих каркасів різної геометрії компаундами

Просочуваність каркасів оцінювали на зразках у вигляді циліндрів із пластику PLA, що піддавалися просоченню в епоксидному клеї марки ЕДП. У зразках варіювали товщину стінки і відсоток внутрішнього заповнення, а також змінювали час витримки в компаунді (рис. 4.1).

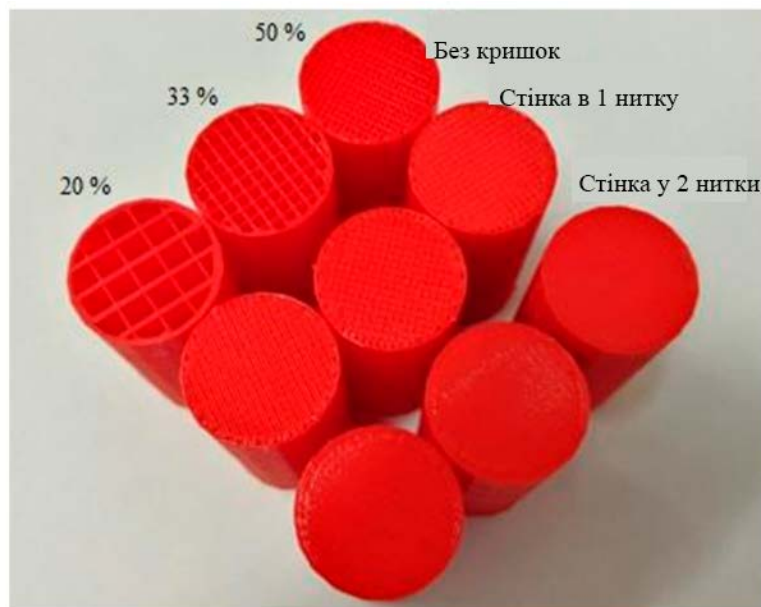


Рис. 4.1 – Партія зі зразків, у кожному з яких реалізовано один із варіантів варійованої геометрії

У результаті проведення першого експерименту з часом витримки 10 хв було встановлено, що зразки не встигли просочитися (рис. 4.2а). За результатами другого експерименту з часом витримки 20 хв якість просочення помітно покращилася, проте пори частково були присутні (рис. 4.2б). У результаті експерименту з витримкою в 30 хв всі зразки просочилися відмінно, пустот майже не спостерігалось (рис. 4.2в).

За часу просочення, що дорівнював 30 хв, зі зразків без кришок за всіх відсотків заповнення епоксидна смола витекла раніше, ніж почався процес затвердіння. Таким чином, поєднання в'язкості та швидкості затвердіння смоли виявилися недостатніми для того, щоб компаунд утримувався

всередині зразка без наявності зовнішньої стінки. В інших зразках (з одинарною і потовщеною стінкою) компаунд після затвердіння заповнив більшу частину внутрішнього об'єму.



Рис. 4.2 – Якість просочення зразків з різним часом витримки, час витримки зліва направо: 10 хв; 20 хв; 30 хв

Пори спостерігалися не у всіх зразках і за їх наявності становили малу частину від перерізу зразка. Типовий характер утворення пори представлений на рис. 4.3. При утворенні пори повторюють вигляд 3D-друкованої сітки і являють собою стовпчик. Її об'єм виявляється тим більшим, чим більший об'єм порожнини у вихідному 3D-друкованому каркасі. Таким чином, найбільші пори спостерігалися у зразках із заповненням 20 %, найменші - у зразках із заповненням 50 %. Також було відзначено, що пори утворюються тільки у верхній частині зразка, протилежній основі, на якій зразки стояли в процесі просочення.



Рис. 4.3 – Типовий характер утворення пори в зразку

Частота появи пор у перерізах зразків із різним відсотком заповнення та різною товщиною стінки представлена на рис. 4.4. Зі збільшенням відсотка

заповнення під час 3D-друку простежується явна тенденція до зменшення кількості пір, що спостерігається як у зразках зі стінкою в 1 нитку, так і в зразках зі стінкою в 2 нитки. Частота появи пор у зразках з одинарною стінкою трохи вища, ніж у зразків з подвоєною стінкою. Для розрахунку коефіцієнтів регресійної моделі залежності просочуваності від параметрів геометрії каркаса була підготовлена табл. 4.1.

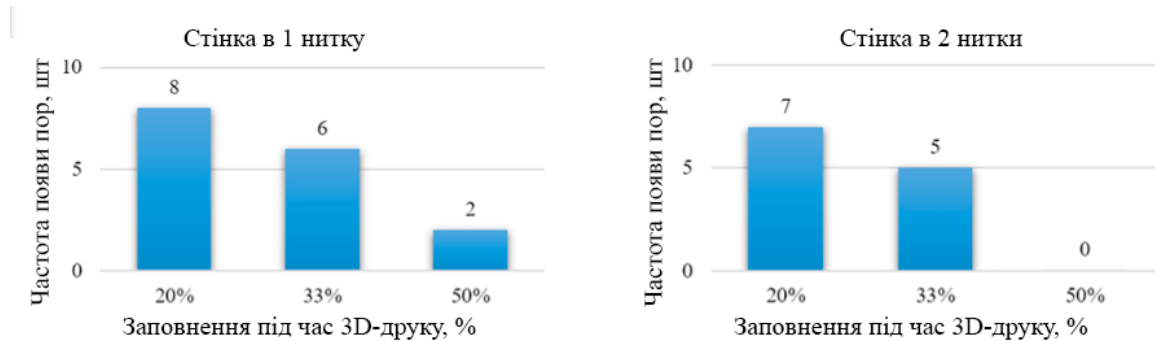


Рис. 4.4 – Частота появи пор у перерізах зразків

Таблиця 4.1 – Таблиця для розрахунку коефіцієнтів рівняння залежності просочуваності каркасів від параметрів їхньої геометрії

Точки плану	Фактори		Вихідний параметр	Розрахункові параметри для визначення коефіцієнтів				
	x_1	x_2		$y \cdot x_1$	$y \cdot x_2$	$y \cdot x_1^2$	$y \cdot x_2^2$	$y \cdot x_1 \cdot x_2$
1	+1	+1	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000	1,000
2	+1	-1	0,143	0,143	-0,143	0,143	0,143	-0,143
3	-1	+1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
4	-1	-1	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
5	+1	0	0,200	0,200	0,000	0,200	0,000	0,000
6	-1	0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
7	0	+1	0,500	0,000	0,500	0,000	0,500	0,000
8	0	-1	0,125	0,000	-0,125	0,000	0,125	0,000
9	0	0	1,167	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
10	0	0	0,200	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
11	0	0	0,143	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
		Σ	2,477	1,343	1,232	1,343	1,768	0,857

Коефіцієнти рівняння регресії розраховуються за такими формулами:

$$b_0 = T_1 \cdot \sum_{n=1}^N y - T_2 \cdot \sum_{n=1}^N x_i^2 \cdot y, \quad (4.1)$$

$$b_{1,2} = T_3 \sum_{n=1}^N x_i \cdot y, \quad (4.2)$$

$$b_{11,22} = T_4 \cdot \sum_{n=1}^N x_i^2 \cdot y - T_5 \cdot \sum_{i=1}^k \sum_{n=1}^N x_i^2 \cdot y - T_2 \cdot \sum_{n=1}^N y, \quad (4.3)$$

$$b_{12} = T_6 \cdot \sum_{n=1}^N x_i \cdot x_j \cdot y, \quad (4.4)$$

де $T_1 = 0,2632$; $T_2 = 0,1579$; $T_3 = 0,1167$; $T_4 = 0,5$; $T_5 = 0,1033$; $T_6 = 0,25$ – параметри для визначення коефіцієнтів рівняння регресії;

x_i – фактори варіювання;

y – значення вихідного параметра;

$N = 11$ – кількість рядків у матриці планування експерименту;

$k = 2$ – кількість варійованих факторів.

Таким чином, значення коефіцієнтів рівняння регресії в нашому випадку дорівнюють

$$b_0 = 0,2632 \cdot 2,477 - 0,1579 \cdot (1,343 + 1,768) = 0,161;$$

$$b_1 = 0,1167 \cdot 1,343 = 0,157; \quad b_2 = 0,1167 \cdot 1,232 = 0,144;$$

$$b_{11} = 0,5 \cdot 1,768 - 0,1033 \cdot (1,343 + 1,768) - 0,1579 \cdot 2,477 = -0,041;$$

$$b_{22} = 0,5 \cdot 1,768 - 0,1033 \cdot (1,343 + 1,768) - 0,1579 \cdot 2,477 = 0,171;$$

$$b_{12} = 0,25 \cdot 0,857 = 0,214.$$

Далі необхідно перевірити значущість отриманих коефіцієнтів рівняння регресії. Для цього спочатку необхідно знайти середнє арифметичне значення вихідного параметра в нульових точках:

$$\bar{y}_0 = \frac{y_9 + y_{10} + y_{11}}{3}, \quad (4.5)$$

де y_9, y_{10}, y_{11} – значення вихідного параметра для 9, 10 і 11 рядків таблиці відповідно.

$$\bar{y}_0 = \frac{0,167 + 0,200 + 0,143}{3} = 0,170.$$

Далі необхідно знайти дисперсію відтворюваності вихідного параметра за такою формулою:

$$S_{\{Y_0\}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^{n_0} (y_{oi} - \bar{y}_0)^2}{n_0 - 1}, \quad (4.6)$$

де $n_0 = 3$ – кількість дослідів у нульовій точці;

y_{oi} – значення вихідного параметра в нульовій точці.

$$S_{\{Y_0\}}^2 = \frac{(0,167 - 0,170)^2 + (0,200 - 0,170)^2 + (0,143 - 0,170)^2}{3 - 1} = 0,000824.$$

Далі слід знайти середньоквадратичне відхилення вихідного параметра, яке дорівнює

$$S_{\{Y_0\}} = \sqrt{S_{\{Y_0\}}^2}, \quad (4.7)$$

$$S_{\{Y_0\}} = \sqrt{0,000824} = 0,028703.$$

Тоді середньоквадратична помилка при визначенні коефіцієнтів рівняння регресії знаходиться за такими формулами:

$$S_{\{b_0\}} = T_{12} \cdot S_{\{Y_0\}}, \quad (4.8)$$

$$S_{\{b_i\}} = T_{13} \cdot S_{\{Y_0\}}, \quad (4.9)$$

$$S_{\{b_{ii}\}} = T_{14} \cdot S_{\{Y_0\}}, \quad (4.10)$$

$$S_{\{b_{ij}\}} = T_{15} \cdot S_{\{Y_0\}}, \quad (4.11)$$

де $T_{12} = 0,513$; $T_{13} = 0,4083$; $T_{14} = 0,6282$; $T_{15} = 0,5$ – табличні коефіцієнти.

$$S_{\{b_0\}} = 0,513 \cdot 0,028703 = 0,014725,$$

$$S_{\{b_{1,2}\}} = 0,4083 \cdot 0,028703 = 0,01172,$$

$$S_{\{b_{11,22}\}} = 0,6282 \cdot 0,028703 = 0,18026,$$

$$S_{\{b_{12}\}} = 0,5 \cdot 0,028703 = 0,014352.$$

Розрахункові значення критерію Стьюдента для коефіцієнтів рівняння регресії визначають за такою формулою:

$$t_p\{b_i\} = \frac{b_i}{S_{\{b_i\}}}, \quad (4.12)$$

де b_i – коефіцієнт рівняння регресії;

$S_{\{b_i\}}$ – відповідне даному коефіцієнту значення середньоквадратичної помилки.

$$t_p\{b_0\} = \frac{0,161}{0,014725} = 10,92; t_p\{b_1\} = \frac{0,157}{0,01172} = 13,37; t_p\{b_2\} = \frac{0,144}{0,01172} = 12,77$$

$$t_p\{b_{11}\} = \frac{-0,041}{0,18026} = -2,28; t_p\{b_{22}\} = \frac{0,171}{0,18026} = 9,51; t_p\{b_{12}\} = \frac{0,214}{0,014352} = 14,93.$$

Табличне значення коефіцієнта Стьюдента за рівня значущості $\alpha = 0,05$ і числа ступенів свободи $f = 3 - 1 = 2$ становить $t_T = 4,3$. Отже, в

отриманому рівнянню регресії значущими є всі параметри, крім b_{11} . Але з огляду на те, що від самого початку було прийнято квадратичну модель, залишаємо в рівнянні всі коефіцієнти. Тоді отримане рівняння має такий вигляд:

$$y = 0,161 + 0,157 \cdot x_1 + 0,144 \cdot x_2 + 0,171 \cdot x_2^2 + 0,214 \cdot x_1 \cdot x_2. \quad (4.13)$$

Для перевірки адекватності отриманого рівняння регресії слід знайти суму квадратів відхилень розрахункових значень від результатів, отриманих в експерименті. Результати розрахунку подано в таблиці 4.2.

Таблиця 4.2. – Розрахункові значення для визначення адекватності рівняння регресії

Точки плану	Експеримент. Значення	Розрахункові значення	Відхилення розрахункового значення від експеримент.	Квадрат відхилення
1	1,000	0,803	-0,197	0,0039
2	0,500	0,431	-0,069	0,005
3	0,000	0,028	0,028	0,001
4	0,000	0,020	0,020	0,000
5	0,200	0,312	0,112	0,013
6	0,000	0,023	0,023	0,001
7	0,143	0,258	0,115	0,013
8	1,125	0,355	0,230	0,053
9	0,11	0,092	-0,019	0,000
10	0,100	0,092	-0,008	0,000
11	0,091	0,092	0,001	0,000
Σ				0,124

Дисперсія адекватності визначається таким чином:

$$S_{ад}^2 = \frac{\sum_{n=1}^N (y_n^{ек} - y_n^р)^2}{N - m - (n_0 - 1)}, \quad (4.14)$$

де $N = 11$ – кількість рядків у матриці планування експерименту;

$y_n^{ек}$ – експериментальне значення вихідного параметра в n -ій точці;

$y_n^р$ – розрахункове значення вихідного параметра в n -ій точці;

$m = 0$ – кількість незалежних коефіцієнтів у рівнянні регресії;

$n_0 = 3$ – кількість дослідів у нульовій точці.

$$S_{ад}^2 = \frac{0,124}{11 - 0 - (3 - 1)} = 0,138.$$

Оскільки виконується умова $S_{ад}^2 > S_{\{Y_0\}}$ ($0,138 > 0,000824$), то розрахункове значення критерію Фішера визначається за такою формулою:

$$F_p = \frac{S_{ад}^2}{S_{\{Y_0\}}}; \quad (4.15)$$

$$F_p = \frac{0,138}{0,000824} = 16,74. \quad (4.16)$$

Табличне значення критерію Фішера за рівня значущості $\alpha = 0,05$, $k_1 = 2$; $k_2 = 9$ становить $F_{табл} = 19,38$. Оскільки дотримується умова $F_p < F_{табл}$, то рівняння регресії адекватно описує досліджуваний процес. На малюнку 4.5 представлено поверхню відгуку регресійної моделі.

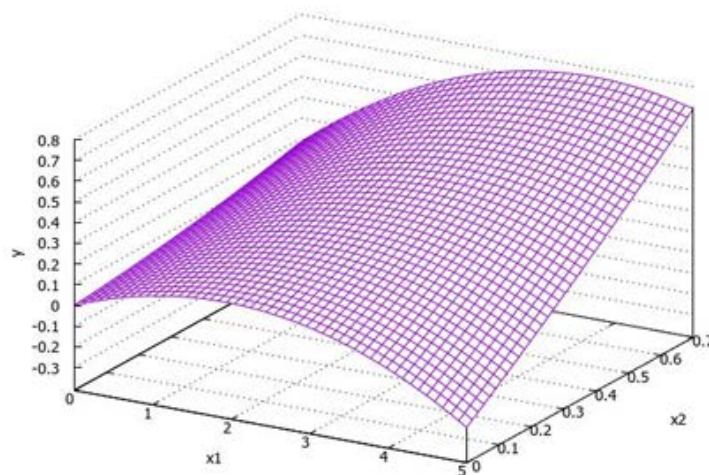


Рис.4.5 – Поверхня відгуку регресійної моделі просочуваності 3D-друкованого каркаса залежно від його геометричних параметрів

Максимальному значенню просочуваності каркаса відповідатиме максимум на отриманій поверхні. Щоб знайти екстремум, необхідно взяти окремі похідні від виразу 4.13, прирівняти їх до нуля і розв'язати отриману систему:

$$\frac{dy}{dx_1} = b_1 + 2 \cdot b_{11} \cdot x_1 + b_{12} \cdot x_2; \quad (4.16)$$

$$\frac{dy}{dx_2} = b_{21} + 2 \cdot b_{22} \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1; \quad (4.17)$$

$$\begin{cases} 0,157 - 0,082x_1 + 0,214x_2 = 0, \\ 0,144 + 0,342x_2 + 0,214x_1 = 0; \end{cases}$$

$$\begin{cases} x_1 = 1,809 \\ x_2 = 0,614. \end{cases}$$

Оскільки число стінок може бути тільки цілим числом, округляємо $x_1 = 2$. Заповнення також може бути вибрано тільки зі стандартного ряду, що відповідає варіантам заповнення слайсера. Найближче відповідне значення $x_2 = 0,5 = 50\%$.

4.2 Результати дослідження пористості зразків із різною геометрією 3D-друкованого каркаса для механічних випробувань

Пористість досліджували на просочених зразках, призначених для подальших випробувань на розтягнення та ударну в'язкість (рис. 4.6). Габаритні розміри зразків становлять 150x20x4 мм для зразків а), 80x10x10 мм для зразків б). Зразки були виготовлені із пластику PLA. Під час друку варіювався внутрішній відсоток заповнення (20, 33 і 50 %), а також напрямок укладання шарів - уздовж і поперек осі зразка. Подальше просочення здійснювалося в епоксидному клеї ЕДП. Витримка у вакуумі становила 30 хвилин. Після виконання просочення зразки витримували при кімнатній температурі протягом 24 год.



Рис. 4.6 – Форма зразків для дослідження пористості: а - зразки для подальших випробувань на розтягнення; б - зразки для подальших випробувань на ударну в'язкість

Пористість виготовлених зразків оцінювали методом гідростатичного зважування. Результати дослідження пористості зразків представлено на рис. 4.7. У кожній точці дано середнє значення пористості, розраховане для

групи з трьох зразків. Довірчий інтервал за результатами розрахунку склав від 0,29 до 0,34. Значення пористості в зразках, призначених для випробувань на розтягнення, змінюється в діапазоні від 17,5% до 18,5%, у зразках, призначених для випробувань на ударну в'язкість - від 17,1% до 18,5%.

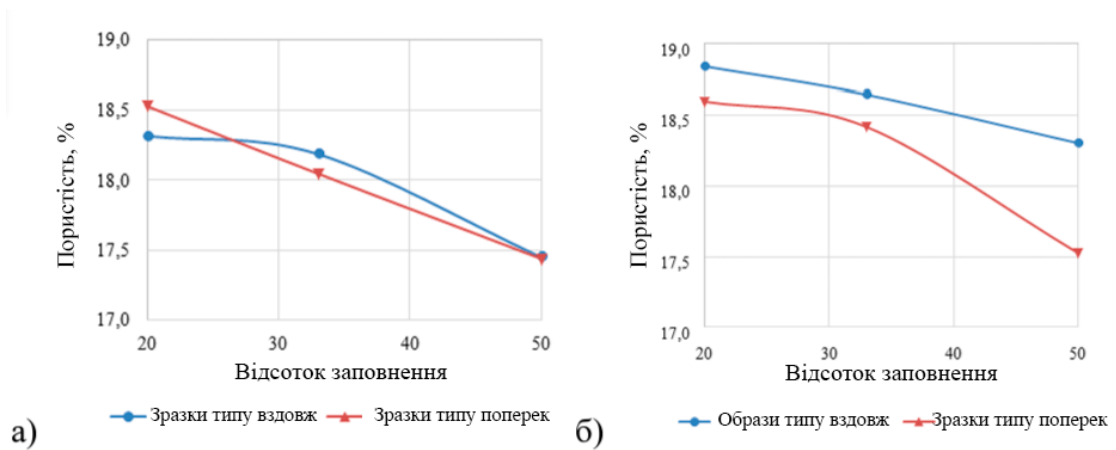


Рис. 4.7 – Пористість досліджуваних зразків

У всіх випадках значення пористості зменшується зі збільшенням відсотка заповнення зразків при 3D-друку. При цьому пористість зразків, призначених для випробувань на розтягнення, має дуже схожі значення в точках незалежно від розташування шарів відносно осі зразка, тоді як пористість зразків для випробувань на ударну в'язкість відрізняється: для зразків типу впоперек вона виявилася трохи вищою, ніж для зразків типу вздовж. Загалом рівень пористості зразків для випробувань на розтягнення дещо вищий за пористість зразків для випробувань на ударну в'язкість.

Подібний характер залежності пористості від відсотка заповнення, ймовірно, пов'язаний з тим, що за менш щільного заповнення каркаса зразка під час 3D-друку він гірше утримує смолу після просочення і вона частково витікає. Цей висновок підтверджує також той факт, що пори спостерігалися у верхній частині зразків, протилежній основі, на якій вони стояли в процесі просочення. Трохи більший рівень пористості в зразках для випробувань на розтягнення порівняно зі зразками для випробувань на удар можна пояснити

тим, що перші мають трохи більший об'єм порівняно з другими, а значить і ймовірність утворення повітряної бульбашки вища.

4.3 Результати дослідження залежності механічних властивостей композитів від складу просочувального компаунда та режиму затвердіння

4.3.1 Результати випробувань на розтягнення

Зразки з чистої епоксидної смоли з різними затверджувачами та режимами затвердіння після проведення випробувань представлено на рис. 4.8. Затвердіння за підвищеної температури призводить до потемніння смоли; також можна помітити, що зразки із затверджувачем ДЕТА прозоріші, ніж зразки із затверджувачем ПЕПА; останні мають жовтуватий відтінок, що повторює колір самого затверджувача. Вид зламу крихкий. Крихкий характер руйнування підтверджується також виглядом діаграми розтягування, на якій відсутній майданчик плинності (рис. 4.9). На рис. 4.10 представлено усереднені за результатами випробування партії з трьох зразків значення міцності чистої епоксидної смоли з різними затверджувачами і режимами затвердіння.



Рис. 4.8 – Зразки з чистої епоксидної смоли після випробувань на розтягнення: а - затверджувач ТЕТА, затвердіння за $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$; б - затверджувач ТЕТА, затвердіння за $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$; в - затверджувач ПЕПА, затвердіння за $T = 24\text{ }^{\circ}\text{C}$; г - затверджувач ПЕПА, затвердіння за $T = 90\text{ }^{\circ}\text{C}$

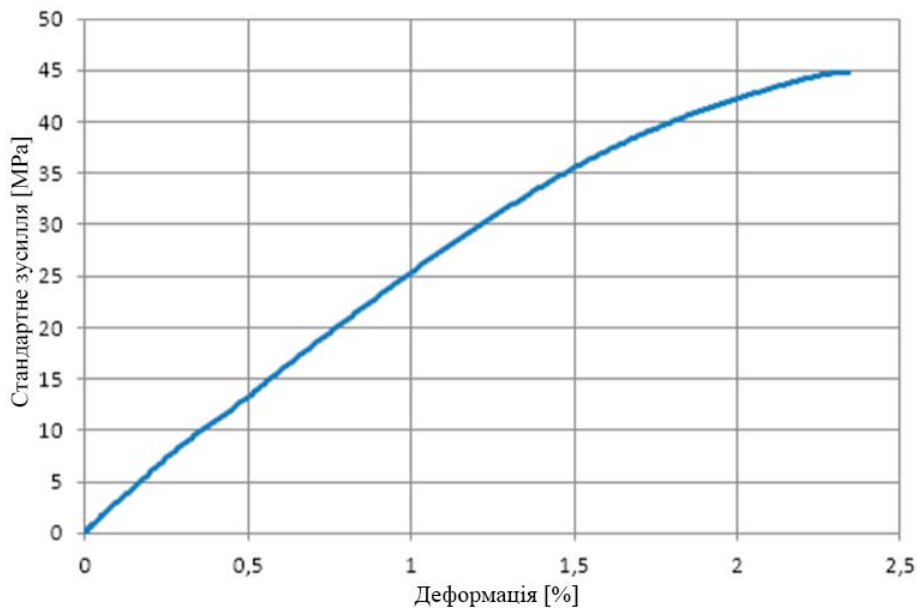


Рис. 4.9 – Типовий вигляд машинної діаграми розтягування зразків з епоксидної смоли

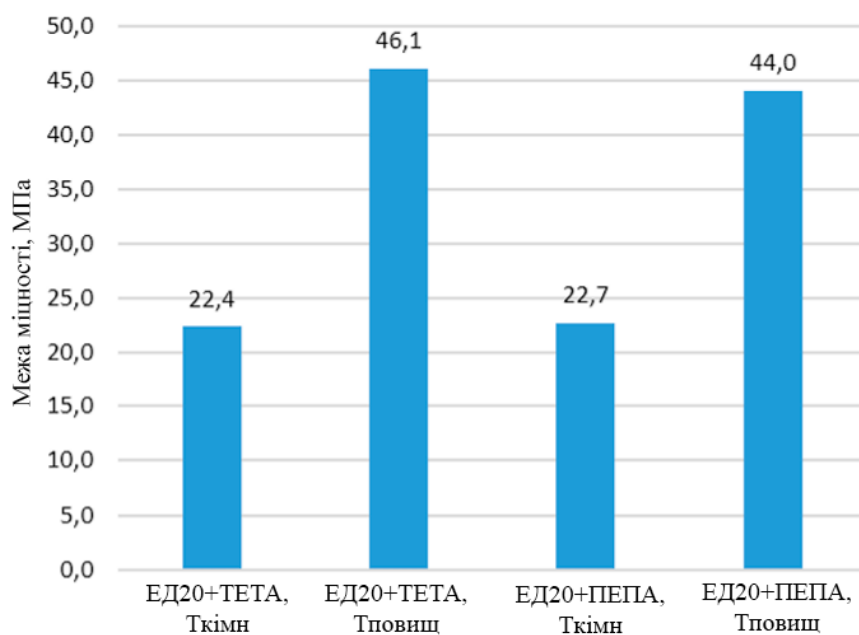


Рис. 4.10 – Результати випробувань на розтягнення зразків із чистої епоксидної смоли з різними затверджувачами та режимами затвердіння

Використання двоступеневого режиму затвердіння, що складається з витримки при кімнатній температурі протягом 24 годин і подальшої витримки при температурі 90 °С протягом 5 годин, призводить до значного

збільшення міцності порівняно з режимом затвердіння при кімнатній температурі протягом 5 діб. Зразки, затверділі за підвищеної температури, мають міцність удвічі вищу порівняно із затверділими за кімнатної температури за обох видів використовуваного затверджувача. При цьому від виду затверджувача міцність не залежить: в обох випадках максимальні показники міцності становили близько 45 МПа. Отримані значення міцності узгоджуються з очікуваними значеннями тільки для затверджувача ПЕПА. У разі ж затверджувача ТЕТА заявлена міцність удвічі вища за отриману під час реальних випробувань. Знижений показник міцності в даному випадку може бути пов'язаний з неправильно підібраною пропорцією між основою і затверджувачем, оскільки властивості епоксидних смол вельми чутливі до цього параметра.

Результати випробувань просочених 3D-друкованих зразків із заповненням 33 % і різним напрямком укладання шарів пластику в процесі друку представлено на рис. 4.11 і 4.12. Також на цих малюнках наведено значення міцності непросочених каркасів з аналогічною геометрією. Діаграма розтягування за виглядом відповідає діаграмі розтягування зразка з епоксидної смоли, руйнування зразків крихке.

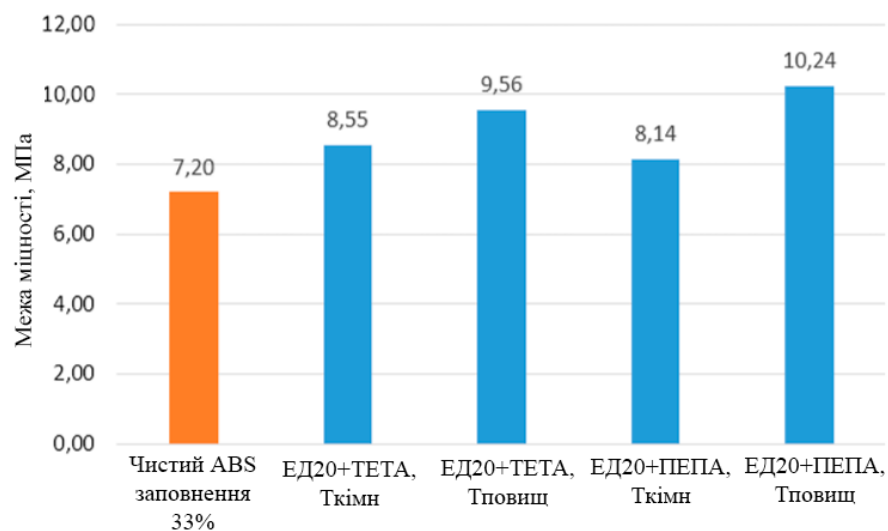


Рис. 4.11 – Результати випробувань на розтягнення просочених зразків з напрямком укладання шарів пластику вздовж осі зразка

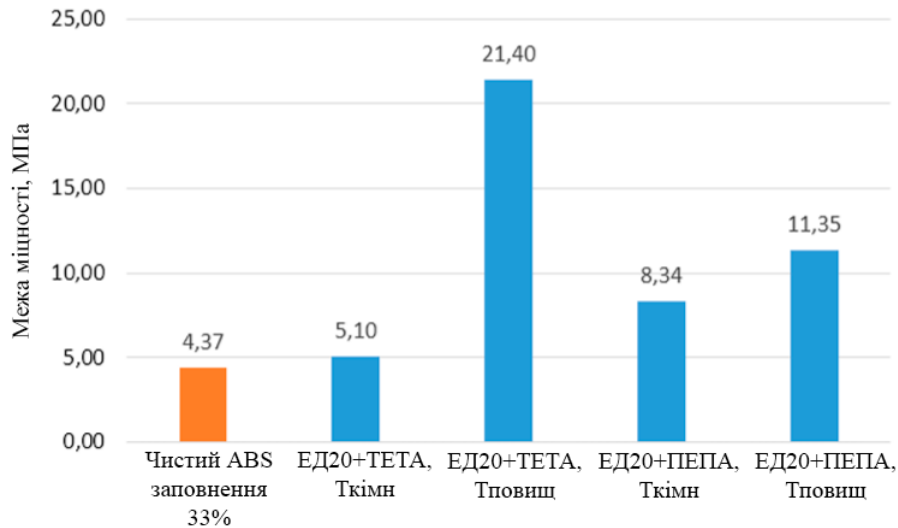


Рис. 4.12 – Результати випробувань на розтягнення просочених зразків з напрямком укладання шарів пластику всупереч осі зразка

Як видно на представлених вище малюнках, міцність просочених зразків порівняно з непросоченими підвищилася в усіх варіантах виконання просочення, однак приріст міцності не настільки значний, як очікувалося. Знаючи міцність чистої смоли і чистого 3D-друкованого каркаса, можна оцінити теоретичну міцність композиції за допомогою закону адитивності, розглянутого в другому розділі цієї роботи:

$$\sigma = V_{\text{кар}} \cdot \sigma_{\text{кар}} \cdot V_{\text{смоли}} \cdot \sigma_{\text{смоли}} \quad (4.18)$$

де $V_{\text{кар}}, V_{\text{смоли}}$ – об'ємні частки каркаса і смоли відповідно;

$\sigma_{\text{кар}}, \sigma_{\text{смоли}}$ – міцність каркаса і смоли відповідно.

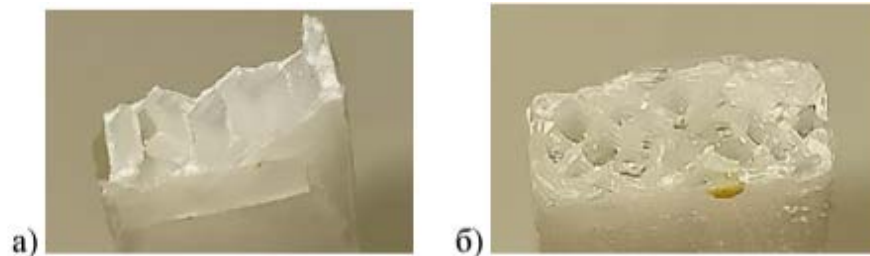
Приймаючи за міцність смоли отримане експериментально максимальне значення міцності (46,1 МПа, що відповідає використанню затверджувача ТЕТА та двоступеневого режиму затвердіння), за значення міцності каркаса - відповідні експериментальні значення міцності чистого ABS із заповненням 33 %, то значення міцності композиту на основі каркасів типу вздовж очікувано може становити:

$$\sigma_{\text{уздовж}} = 0,33 \cdot 7,20 + 0,67 \cdot 46,1 \approx 33,3 \text{ МПа,}$$

а міцність композиту на основі каркасів типу поперек

$$\sigma_{\text{поперек}} = 0,33 \cdot 4,37 + 0,67 \cdot 46,1 \approx 32,3 \text{ МПа.}$$

За результатами випробувань можна спостерігати, що найближчим до розрахункового значення виявився результат для партії зразків на основі каркаса типу впоперек із просоченням компаундом із затверджувачем ТЕТА і затвердінням за підвищеної температури (21,4 МПа). Решта просочених зразків продемонстрували набагато нижчу міцність. Для встановлення причини низької міцності зразки були додатково піддані візуальному огляду. Було встановлено, що в зламах переважної частини зразків відсутня смола (рис. 4.13). Таким чином, низькі властивості міцності зразків, мабуть, пов'язані з поганою якістю просочення досліджуваної партії матеріалів.



а - зразок типу вздовж; б - зразок типу впоперек

Рис. 4.13 – Зломи зразків, випробуваних на розтягнення

Загалом за результатами проведених випробувань на міцність просочених зразків можна відзначити, що, як і у випадку з чистою смолою, зразки, затверділі за двоступеневого режиму (24 години при кімнатній температурі, 5 годин при температурі 90 °С) демонструють вищі показники, хоча відмінності в цьому разі не такі значні, як у випадку з чистою смолою (зростання міцності за використання двоступеневого режиму затвердіння на просочених зразках становило переважно в середньому 23 %, тоді як на чистій смолі цей показник сягає 23 %, що на відміну від чистих смол). У серії зразків типу вздовж найбільша міцність спостерігалася в зразках, просочених компаундом на основі смоли ЕД-20 із затверджувачем ПЕПА з подальшим двоступінчастим режимом затвердіння за підвищеної температури - 10,24 МПа проти початкових 7,20 МПа, і хоча у відносному

виразі приріст доволі значний (близько 40 %), в абсолютному виразі зростання міцності доволі мале. У серії зразків типу впоперек найбільше значення міцності спостерігалось на зразках, просочених компаундом на основі смоли ЕД-20 із затверджувачем ТЕТА з подальшим двоступеневим режимом затвердіння за підвищеної температури - 4,37 МПа проти 21,40 МПа.

4.3.2 Результати випробувань на ударну в'язкість

Усереднені за результатами випробувань партії з трьох зразків значення ударної в'язкості чистої епоксидної смоли з різними затверджувачами і режимами затвердіння представлено на рис. 4.14.

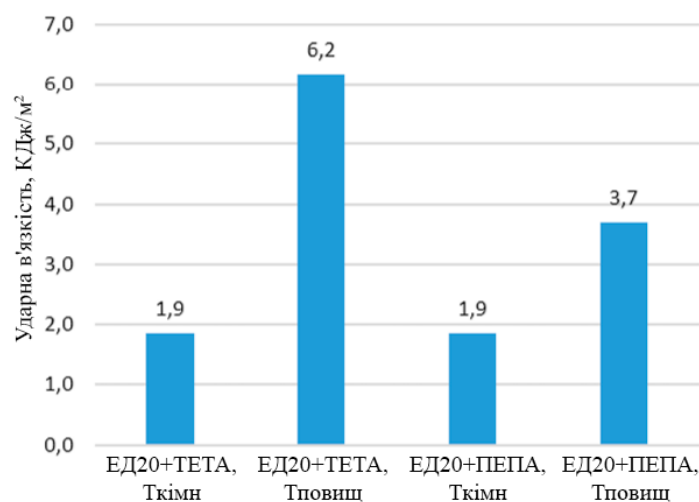


Рис. 4.14 - Результати випробувань на ударну в'язкість зразків із чистої епоксидної смоли з різними затверджувачами та режимами затвердіння

Характер залежності значення ударної в'язкості від вибору затверджувача і режиму затвердіння багато в чому повторює характер залежності міцності від тих самих параметрів: у разі використання двоступеневого режиму затвердіння (24 години за кімнатної температури, 5 годин за 90 °С) незалежно від вибору затверджувача значення ударної в'язкості більші, ніж у разі використання одноступеневого режиму (5 діб за кімнатної температури). Характер залежності ударної в'язкості від виду

затверджувача близький до очікуваного: ударна в'язкість зразків із затверджувачем ТЕТА виявилася майже вдвічі вищою, ніж зразків із затверджувачем ПЕПА. Абсолютні значення ударної в'язкості порівнювати в даному випадку один з одним не можна, тому що значення, наведені раніше, отримані на зразках без надрізу.

Результати випробувань просочених 3D-друкованих зразків із заповненням 33 % і різним напрямком укладання шарів пластику в процесі друку представлено на рис. 4.15 і 4.16. Також на цих малюнках наведено значення ударної в'язкості непросочених каркасів з аналогічною геометрією.

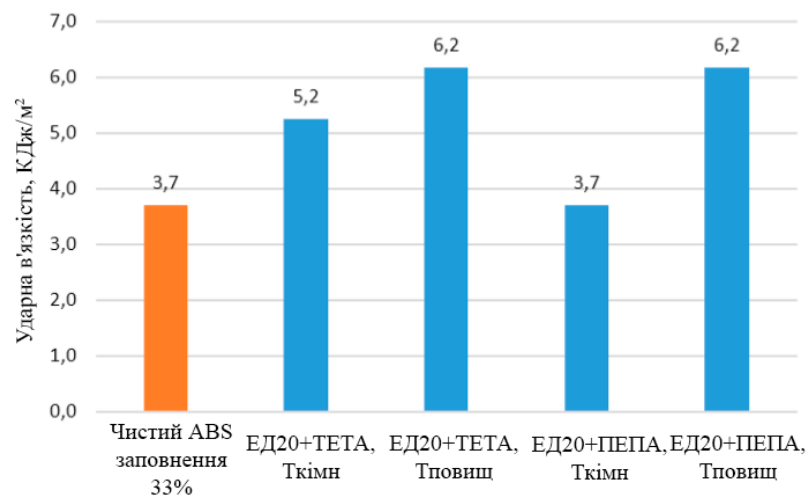


Рис. 4.15 – Результати випробувань на ударну в'язкість просочених зразків з напрямком укладання шарів пластику вздовж осі зразка

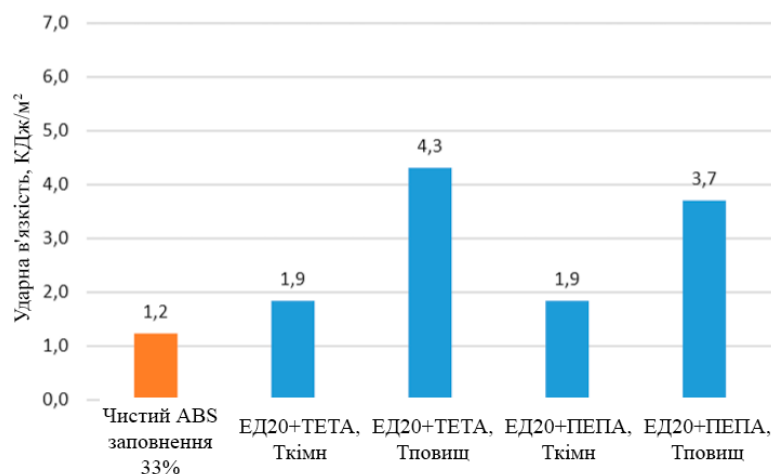


Рис. 4.16 – Результати випробувань на ударну в'язкість просочених зразків з напрямком укладання шарів пластику поперек осі зразка

Як видно на представлених вище малюнках, значення ударної в'язкості для всіх випадків просочення перевершили значення ударної в'язкості для непросочених зразків. Аналогічно до міцності, за формулою 4.18 можна оцінити очікуване значення ударної в'язкості композиції, підставляючи замість значень межі міцності відповідні значення ударної в'язкості зразків. Тоді для композиту на основі каркасів типу вздовж очікуване значення ударної в'язкості за використання смоли із затверджувачем ТЕТА та двоступеневим режимом затвердіння становитиме

$$KCU_{\text{вздовж}} = 0,33 \cdot 3,7 + 0,67 \cdot 6,2 \approx 5,4 \text{ кДж/м}^2,$$

а ударна в'язкість композиту на основі каркасів типу впоперек із тим самим видом смоли та режимом затвердіння

$$KCU_{\text{впоперек}} = 0,33 \cdot 1,2 + 0,67 \cdot 6,2 \approx 4,6 \text{ кДж/м}^2.$$

Отримані за результатами експерименту значення ударної в'язкості просочених зразків близькі до обчислених теоретичних очікуваних значень. Як і у випадку зі зразками для випробувань на розтягнення, злами зразків після випробувань на ударну в'язкість були піддані візуальному аналізу щодо наявності смоли в зламі. Аналіз показав, що приблизно 70 % усіх зразків мають у зламі смолу, з чим можна пов'язати близькість отриманого експериментального результату і теоретичного розрахункового. Зовнішній вигляд зламів наведено на рис. 4.17 і 4.18.

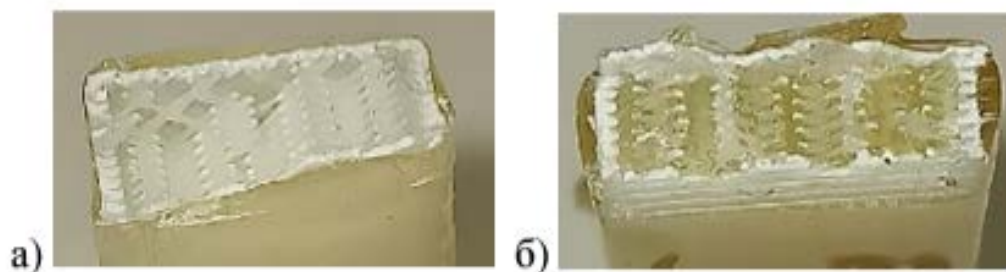


Рис. 4.17 – Злами зразків типу вздовж після випробувань на ударну в'язкість: а - порожній (у зламі немає смоли); б - заповнений (смола в зламі присутня)

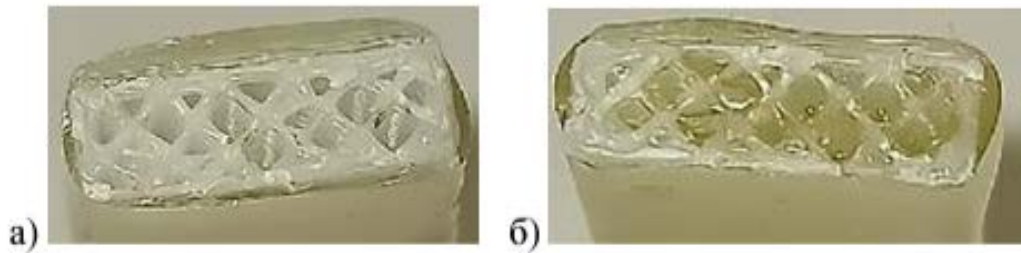


Рис. 4.18 – Зломи зразків типу поперек після випробувань на ударну в'язкість: а - порожній (у зламі немає смоли); б - заповнений (смола в зламі присутня)

Загалом характер залежності ударної в'язкості від виду затверджувача і режиму затвердіння схожий на такий для зразків із чистої смоли: найбільші значення ударної в'язкості спостерігаються під час використання двоступеневого режиму затвердіння, який складається з витримки зразка за кімнатної температури впродовж 24 годин і подальшого витримки при температурі 90оС впродовж 5 годин. Різниця в рівні властивостей залежно від вибору режиму затвердіння становить близько двох разів. Трохи вищі значення ударної в'язкості спостерігаються у разі використання як затверджувача ТЕТА.

ВИСНОВКИ

1. Розроблено спосіб виготовлення полімерних запасних частин для сільськогосподарської техніки, що передбачає на першому етапі 3D-друк каркаса деталі з термопластичного полімеру за допомогою технології FDM, а на другому етапі зміцнювальне вакуумне просочення отриманої конструкції в термореактивному полімері.

2. Розроблено методику розрахунку максимально можливої товщини деталі в умовах вакуумного просочення 3D-друкованого каркаса полімерними компаундами на основі використання рівняння Нав'є-Стокса-Дарсі, що описує процес просочення пористих структур. Розраховано максимально можливу товщину деталі в умовах вакуумного просочення 3D-друкованого каркаса із заповненням 33 % епоксидною смолою ЕД-20, яка склала 622 мм.

3. Розроблено методику експериментальної оцінки просочуваності 3D-друкованих каркасів. За значення просочуваності прийнято величину, обернену до частоти появи пір у перерізах партії експериментальних зразків циліндричної форми діаметром 15 мм і висотою 40 мм. Запроваджено таку шкалу оцінки просочуваності: 0-0,5 - незадовільна; 0,6-0,7 - задовільна; 0,8-0,9 - хороша; >0,9 - відмінна.

4. Розроблено математичну модель залежності просочуваності 3D-друкованого каркаса від товщини стінок і відсотка заповнення в результаті проведеного експерименту на основі D-оптимального плану. За допомогою цієї моделі виявлено параметри, що відповідають максимальному значенню просочуваності - число стінок 2 шт., заповнення 50 %.

Встановлено залежність міцності та ударної в'язкості композитів на основі 3D-друкованих каркасів від відсотка заповнення та напрямку укладання шарів пластику в процесі друку. Механічні властивості просочених зразків порівняно з непросоченими зростають утричі, коефіцієнт анізотропії знижується з 5,5 до 0,94. На основі критерію рівномірності для

виготовлення запасних частин сільськогосподарської техніки 3D-друком із вакуумним просоченням рекомендовано застосовувати заповнення під час друку 33 %.

5. Встановлено залежність міцності та ударної в'язкості композиту на основі 3D-друкованого каркаса із заповненням 33 % і напрямками укладання шарів пластику вздовж і впоперек осі зразка від складу просочувального компаунду - виду використовуваного для смоли ЕД-20 затверджувача, ТЕТ або ПЕПА, і режиму затвердіння, одноступеневого - за кімнатної температури впродовж 5 діб, або двоступеневого - за кімнатної температури впродовж 24 годин із подальшою додатковою витримкою за 90 °С впродовж 5 годин. Максимальних показників досягнуто за використання затверджувача ТЕТА та двоступеневого режиму затвердіння, у зв'язку з чим зазначені параметри рекомендовано для виготовлення запасних частин 3D-друком із вакуумним просоченням.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Adel M., Abdelaal O., Gad A. Polishing of fused deposition modeling products by hot air jet: evaluation of surface roughness. *Journal of Materials Processing Technology*. 2018. Vol. 251. P. 73-82.
2. Akhouri D., Banerjee D., Mishra S.B. A review report on the plating process of fused deposition modelling (FDM) built parts. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 26. P. 2140-2142.
3. Berretta S., Davies R., Shyng Y.T. Fused Deposition Modelling of high temperature polymers: Exploring CNT PEEK composites. *Polymer Testing*. 2017. Vol. 63. P. 251-262.
4. BuyAnyPart 3D prints spare parts for farming equipment [Електронний ресурс] – 3DPrintingIndustry. URL: <https://3dprintingindustry.com/news/buyanypart-3d-prints-spare-parts-for-farming-equipment-141100/> (дата звернення: 17.07.2023).
5. Caminero M.A., Chacón J.M., García I. Impact damage resistance of 3D printed continuous fibre reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling. *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 148. P. 93-103.
6. Carneiro O.S., Silva A.F., Gomes R. Fused deposition modeling with polypropylene. *Materials & Design*. 2015. Vol. 83. P. 768-776.
7. Chen L., Zhang X. Modification the surface quality and mechanical properties by laser polishing of Al/PLA part manufactured by fused deposition modeling. *Applied Surface Science*. 2019. Vol. 492. P. 765-775.
8. CNH Industrial to Produce Tractor and Bus Parts with 3D Printing [Електронний ресурс]. 3D print URL: <https://3dprint.com/237726/cnh-industrial-improve-production-capital-goods-3d-printing/> (дата звернення: 17.07.2023).
9. Dev S., Srivastava R. Experimental investigation and optimization of FDM process parameters for material and mechanical strength. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 26. P. 1995-1999.
10. Durgashyam K., Reddy I.M., Balakrishna A. Experimental investigation on mechanical properties of PETG material processed by fused deposition

modeling method. *Materials Today: Proceedings*. 2019. Vol. 18. P. 2052–2059.

11. Kaletnik H., Adamchuk V., Bulgakov V., Kyurchev V., Nadykto V. Main problems in the field of agricultural mechanization in Ukraine. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. №3 (95). С. 6-12.

12. Kumar N., Jain P.K., Tandon P. The effect of process parameters on tensile behavior of 3D printed flexible parts of ethylene vinyl acetate (EVA). *Journal of Manufacturing Processes*. 2018. Vol. 35. P. 317-326.

13. Kupchuk I., Kolisnyk M., Shtuts A., Paladii M. Development of the technological process of forming rings from sheet samples by stamping rollers and rotary hood. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov. Series I: Engineering Sciences*. 2021. Vol. 14 (63), № 2. P. 1-13. DOI: 10.31926/but.ens.2021.14.63.2.1

14. Kupchuk I., Kolisnyk M., Shtuts A., Paladii M., Didyk A. Experimental evaluation stress-strain state for billets during rolling stamping by rollers. *Colloquium-journal*. 2021. № 16 (103). P. 40-48. DOI: 10.24412/2520-6990-2021-16103-40-48

15. Matviichuk V. A., Haidamak O. L. Increasing of the durability of details working under repeatable-loads. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. №1 (96) С. 5-14.

16. Matvijchuk, V., Shtuts, A., Kolisnyk, M., Kupchuk, I., Derevenko, I. Investigation of the tubular and cylindrical billets stamping by rolling process with the use of computer simulation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*. 2022. Vol. 66, № 1. P. 51-58. DOI: 10.3311/PPme.18659

17. Matviychuk V., Kolisnyk M. Development of the combined technological process of blank stacks flanges formation by the method of stamping by rolling and rotary drawing. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. №1(100). P. 111-121.

18. Mohsen A. The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing. *Business Horizons*. 2017. Vol. 60, Is. 5. P. 677-688.

19. Ngo T.D., Kashani A., Imbalzano G. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018. Vol. 143. P. 172-196.
20. Puigoriol-Forcada J.M., Alsina A., Salazar A.G. Flexural fatigue properties of polycarbonate fused-deposition modelling specimens. *Materials & Design*. 2018. Vol. 155. P. 414-421.
21. Sanatgar R.H., Campagne C., Nierstrasz V. Investigation of the adhesion properties of direct 3D printing of polymers and nanocomposites on textiles: effect of FDM printing process parameters. *Applied Surface Science*. 2017. Vol. 403. P. 551-563.
22. Sivak R. Evaluation of metal plasticity and research of the mechanics of pressure treatment processes under complex loading. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. Kharkiv. 2017. № 6/7 (90). P. 34-41.
23. Spirin A., Borysiuk D., Truhanska O., Shvets L., Zelinsky V. Mathematical model of a wheeled tractor steering axle as an object of diagnostics. *TEKA. Commission of motorization and energetics in agriculture*. 2017. Vol. 17, № 1. P. 41-48.
24. Sree L. G., Matvijchuk V. A., Rubanenko O.O., Branitskyi Yu. Yu. Justification and development of methods building curves boundary deformation of metals. *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 38, Part 5. P. 3337-3344.
25. Stan F., Stanciu N.-V., Sandu I.-L. Effect of low and extreme-low temperature on mechanical properties of 3d-printed polyethylene terephthalate glycol. *The romanian journal of technical sciences*. 2019. Vol. 3. P. 21–41.
26. Thrimurthulu K., Pandey P.M., Venkata N. Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2004. Vol. 44. P. 585-594.
27. Valino A.D., Dizon J.R.C., Espera A.H. Advances in 3D printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites. *Progress in Polymer Science*. 2019. Vol. 98. Article ID 101162.
28. Wits W.W., Reyes G.J.R., Jauregui B.J.M. How additive manufacturing

enables more sustainable end-user maintenance, repair and overhaul (MRO) strategies. *Procedia CIRP*. 2016. № 40. P. 693-698

29. Yadav D., Chhabra D., Kumar R. Optimization of FDM 3D printing process parameters for multi-material using artificial neural network. *Materials Today: Proceedings*. 2020. Vol. 21. P. 1583-1591.

30. Агулов І. І., Вознюк Л.Ф., Левчій О.В. Довідник по технічному обслуговуванню сільськогосподарських машин. К. : Урожай, 1989. 252 с.

31. Бакум М.В., Нікітін С.П., Сергєєва А.В. Проектування сільськогосподарських машин: навч. посіб.; за ред. М. В. Бакума; Харк. держ. техн. ун-т с.-г. Х., 2003. – 336 с.

32. Бондаренко М. Г. Комплектування і використання машинно-тракторного парку в рослинництві: підруч. для студ. вузів / М. Г. Бондаренко, В. А. Демещук. К. : Вищ. шк., 1995. 237 с.

33. Власенко В.В. Розробка і технологія виробництва сільськогосподарських машин: зб. наук. пр. / В.В. Власенко, В. О. Кондратець, Ю. М. Коровайченко. К., 1994. 210 с.

34. Вознюк Л.Ф., Іщенко В.В., Михайлович Я.М. Технічне обслуговування і діагностування сільськогосподарських машин: навч. посіб. для мол. спец. К. : Урожай, 1994. 216 с.

35. Войтюк Д.Г., Яцун С.С., Довжик М.Я. Сільськогосподарські машини: основи теорії та розрахунку: навч. посіб.; за ред. Д. Г. Войтюка. Суми : Унів. кн., 2008. 543 с.

36. Гайдамак О. Л., Гунько І. В., Паладій М. С. Дослідження швидкості руху порошкових частинок холодного газодинамічного напилення. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. №2 (109). С. 115-123.

37. Гайдамак О. Л., Матвійчук В. А., Кучеренко Ю. В. Перспективи створення полімерних функціональних покриттів із застосуванням газодинамічного напилення. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2020. №2 (109) С. 105-112.

38. Гайдамак О.Л., Матвійчук В.А. Створення композиційних

електропровідних покриттів газодинамічним напиленням. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2021. №1 (100). С. 122-132.

39. Гевко Р.Б., Ткаченко І.Г., Павх І.І. *Машини сільськогосподарського виробництва: навч. посіб. для студ. вузів; М-во освіти і науки України, Терноп. акад. нар. госп-ва. Тернопіль, 2002. 251 с.*

40. ГСТУ 46.012-2000. *Техніка сільськогосподарська. Методи економічної оцінки техніки. – [Чинний від 2001.02.01] – К. : Мінагрополітики України, 2000. – III, 18 с. – (Галузевий стандарт України).*

41. Гунько І.В., Коваль Л.Г. Енергоощадні безконтактні методи діагностування показників технічного стану мобільної сільськогосподарської техніки. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2016. №3 (95). С. 89-93.

42. Довідник по регулюванню сільськогосподарських машин / В. І. Кочев, А. С. Кушнар'юв, В. Д. Роговий, П. П. Карпуша [та ін.]; за ред. В. І. Кочева. К. : Урожай, 1985. 312 с.

43. Заїка П. М. *Теорія сільськогосподарських машин: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Т. 1. Ч. 1. Машини та знаряддя для обробітку ґрунту. М-во освіти і науки України, М-во аграр. політики України, Харк. держ. техніч. ун-т с.-г. Харків: ОКО, 2001. 443 с.*

44. Іскович-Лотоцький Р.Д., Зелінська О.В., Веселовська Н.Р., Веселовський Я.П. Оцінювання ефективності функціонування технологічного комплексу з використанням системного підходу. *Техніка енергетика транспорт АПК*. 2017. №2(97). С. 109-114

45. Матвійчук В.А., Гайдамак О.Л., Колісник М.А. Підвищення службових характеристик поверхневого шару деталей шляхом застосування поверхневого пластичного деформування і газодинамічного напилення. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. №2 (97). С. 90-100.

46. Матвійчук В.А., Колісник М.А., Штуць А.А. Дослідження напружено-деформовного стану матеріалу заготовок при прямому витискуванні методом штампування обкочуванням. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. №3(102) С. 77-84.

47. Підвищення якості роботи сільськогосподарської техніки / М. С. Хоменко, Ю. Г. Вожик, В. Г. Герасимчик [та ін.]; за ред. М. С. Хоменка. К.: Урожай, 1987. 212 с.

48. Сивак І.О., Деревенько І.А., Островський А.Й. Практикум з механіки матеріалів і конструкцій. Навчальний посібник. Вінниця: ВНАУ, 2011. 144 с.

49. Сивак Р. І. Визначення кінематики деформації на основі сплайн-апроксимації. *Вібрації в техніці та технологіях*. 2020. №2 (97). С. 101-107.

50. Сивак Р.І., Деревенько І.А. Короткий курс теоретичної механіки. Вінниця: ТОВ «Вінницька міська друкарня», 2016. 200 с.

51. Солоня О. В., Купчук І.М. Практикум з теорії механізмів і машин: навч. посіб. Вінниця: ТОВ «Друк», 2020. 252 с.

52. Солоня О. В., Купчук І.М. Теорія механізмів і машин. Курсове проектування: навч. посіб. Вінниця: ВНАУ, 2019. 249 с.

53. Солоня О.В., Купчук І.М. Прикладна механіка. Методичні рекомендації для виконання практичних робіт. Вінниця: ВНАУ, 2017. 116 с.

54. Солоня О.В., Купчук І.М., Паламарчук В.І. Прикладна механіка. Методичні рекомендації для виконання курсового проекту. Вінниця: ВНАУ, 2017. 84 с.

55. Труханська О.О. Підвищення якості ремонту і технічного обслуговування сільськогосподарської техніки. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. 3 (102). С. 88-97.