

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Виготовлення конструкційних елементів трансмісійних механізмів автомобілів з неметалевих матеріалів

Рівень вищої освіти                      бакалавр  
Галузь знань                                13 «Механічна інженерія»  
Спеціальність                              132 «Матеріалознавство»  
Освітня програма «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

Шифр КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ

Виконав студент 4-го курсу  
група МТВА 21-1  
Шифр



Підпис

Іван ПАЛАМАРЧУК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник д.т.н., проф.  
Науковий ступінь, звання



Підпис

Павло КАПЛУН  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

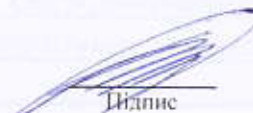
Нормоконтролер



Підпис

Олег БАБАК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:  
Завідувач кафедри ТАМ  
Назва



Підпис

Олександр ДИХА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Дата 9.06.2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури

Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Галузь знань 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність – 132 «Матеріалознавство»

Рівень вищої освіти – Перший бакалаврський

Освітньо-професійна програма – «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри ТАМ

проф., д.т.н. Диха О.В.

9 06 2025 року

**ЗАВДАННЯ**  
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Паламарчука Івана Володимировича

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи «Виготовлення конструкційних елементів трансмісійних механізмів автомобілів з неметалевих матеріалів»

керівник роботи Каплун Павло Віталійович д.т.н., професор

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджено наказом ректора університету від 7 лютого 2025р. № 23 (Д14)

2. Строк подання студентом роботи на кафедру 10 червня 2025 року

3. Вихідні дані до роботи Матеріали переддипломної практики; робочі креслення досліджуваних деталей; нормативно – технологічна документація конструкційних елементів трансмісійних механізмів автомобілів; вимоги з охорони праці і безпеки роботи при виконанні робіт з виготовлення неметалевих матеріалів; техніко – економічні показники роботи.

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)  
1. Аналіз вихідних даних та відомих неметалевих матеріалів; 2 Обґрунтування вибору матеріалів та технологічного процесу виготовлення конструкційних елементів трансмісійних механізмів автомобілів; 3. Обґрунтування конструктивного рішення і способу виготовлення; 4. Оцінка економічної ефективності. 5. Безпека та екологічність технологічного процесу.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

Графічна частина роботи представлена у вигляді презентації на слайдах

6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання \_----

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строки виконання	Примітка
1	<i>Літературний огляд</i>	<i>20.05.2025</i>	
2	<i>Технологічний розділ</i>	<i>25.05. 2025</i>	
3	<i>Конструкторський розділ</i>	<i>30.05. 2025</i>	
4	<i>Оформлення розрахунково-пояснювальної записки</i>	<i>2.06. 2025</i>	
5	<i>Оформлення презентації кваліфікаційної роботи</i>	<i>5.06. 2025</i>	
6	<i>Нормоконтроль кваліфікаційної роботи</i>	<i>9.06. 2025</i>	
7	<i>Підписання розділів. Затвердження дати захисту</i>	<i>10.06. 2025</i>	

Студент

Керівник роботи

  
 \_\_\_\_\_  
 Підпис

Іван ПАЛАМАРЧУК  
 Ім'я, прізвище  
Павло КАПЛУН  
 Ім'я, прізвище

## РЕФЕРАТ

У рамках випускної кваліфікаційної роботи бакалавра була розглянута можливість технологічного виготовлення конструкційних елементів трансмісійних механізмів автомобілів з неметалевих матеріалів.

Кваліфікаційна робота бакалавра (КРБ) складається із п'яти розділів.

У вступі була обгрунтована доцільність зростання використання неметалевих матеріалів при виготовленні конструкційних елементів авто.

В першому розділі доведено, що застосування неметалевих матеріалів у трансмісійних механізмах переважно у вузлах із помірними навантаженнями, де критичними є маса, шум або корозійна стійкість є сучасним трендом.

У другому розділі присвяченому адитивному виробництву полімерних елементів обгрунтований вибір методу й обладнання для 3D-друку, дана характеристика неметалевих матеріалів, що використовуються в цій технології.

Третій розділ присвячений вибору оптимальній технології за якою можна проводити виробництво елементів трансмісійних механізмів автомобілів з неметалевих матеріалів, розроблені її етапи.

У економічному й розділі охорони праці та техніки безпеки надані рекомендації з впровадження стартап-проекту що базується на цій технології 3D-друку, а також запропоновані заходи безпеки при проведенні таких робіт.

Випускна кваліфікаційна робота складається з 67 сторінок, і містить у собі 17 ілюстрації, 23 джерела, 10 таблиць, 1 додаток.

Ключові слова: АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, 3D-ДРУК, 3D-ПРИНТЕР, НЕМЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ, СТАРТАП-ПРОЕКТ.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	5
1 ЗАГАЛЬНИЙ РОЗДІЛ .....	7
1.1 Мета та завдання дослідження.....	7
1.2 Об'єкт і предмет дослідження .....	8
1.3 Трансмісійні механізми автомобілів.....	9
1.4 Вимоги до матеріалів трансмісійних елементів.....	10
1.5 Неметалеві матеріали у машинобудуванні.....	12
1.6 Досвід застосування у трансмісіях сучасних автомобілів.....	15
2 АДИТИВНЕ ВИРОБНИЦТВО ПОЛІМЕРНИХ ЕЛЕМЕНТІВ .....	20
2.1 Фізико-механічні властивості перспективних неметалевих матеріалів	20
2.2 Критерії вибору матеріалів для шестерень, підшипників, муфт.....	21
2.3 Оцінка довговічності та зносостійкості полімерних деталей.....	24
2.4 Екологічні та економічні впровадження неметалевих матеріалів.....	25
2.5 3D-друк. Технології 3D друку.....	27
2.6 Еволюція застосування полімерних матеріалів .....	29
2.7 Методи оцінки зносу полімерів і композитів.....	35
3 РОЗКРИТТЯ МЕТОДІВ АДИТИВНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ .....	38
3.1 Лазерна фотополімеризація смол .....	38
3.2 FDM – друк .....	40
3.3 MJM (Multi-JetModeling) технологія .....	42
3.4 Селективне лазерне спікання.....	44
3.5 Матеріали для 3D друку .....	48
3.6 Етапи організації 3D друку .....	51
4 ЕКОНОМІЧНИЙ РОЗДІЛ.....	55
5 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ .....	61
ВИСНОВОК.....	64
СПИСОК ВИКОРИСТОВУВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	65
ДОДАТКИ.....	67

<b>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</b>				
Змн	Арк.	№ докум.	Підпис	Дат
Розроб.		Паламарчук		
Перевір.		Каплун		
Реценз.				
Н. Контр.		Бабак		
Затверд.		Диха		
<i>Виготовлення конструкційних елементів трансмісійних механізмів автомобілів з неметалевих матеріалів</i>			Літ.	Арк.
				4
			Акрюшів 67	
ХНУ група МТВА 21-1				

## ВСТУП

У сучасному автомобілебудуванні спостерігається стійка тенденція до зменшення маси транспортних засобів, підвищення їх енергоефективності, надійності та зниження рівня шкідливих викидів. Одним із напрямів досягнення цих цілей є впровадження новітніх конструкційних матеріалів, серед яких все більшу роль відіграють **неметалеві матеріали** – полімери, полімерні композиції, кераміка та інші функціональні сполуки. Застосування таких матеріалів дозволяє зменшити масу елементів трансмісії, знизити втрати на тертя, підвищити корозійну стійкість та зменшити витрати на обробку й виготовлення деталей.

Зокрема, у трансмісійних механізмах автомобілів, що піддаються інтенсивним навантаженням і працюють в умовах тертя та вібрацій, використання неметалевих матеріалів відкриває нові технологічні перспективи. У багатьох провідних автомобільних концермах полімерні шестерні, муфти, втулки, підшипники ковзання та інші деталі трансмісії вже використовуються у серійному виробництві. Такі елементи забезпечують задовільні показники міцності, зносостійкості та довговічності при істотно меншій масі та вартості, ніж традиційні металеві аналоги.

Однак, широке впровадження неметалевих матеріалів потребує комплексного аналізу їхніх фізико-механічних характеристик, технологічних особливостей виготовлення, а також дослідження реальних умов їхньої експлуатації. Особливу увагу слід приділяти вибору матеріалів, які здатні витримувати контактні навантаження та перепади температур, зберігаючи при цьому форму та функціональні властивості протягом тривалого терміну служби.

Таким чином, дослідження, спрямоване на вивчення можливостей виготовлення конструкційних елементів трансмісійних механізмів з

					<i>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</i>	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

неметалевих матеріалів, є актуальним як у теоретичному, так і у прикладному аспектах. Воно сприятиме підвищенню технологічного рівня вітчизняного машинобудування, зменшенню енергоспоживання автомобілів та розширенню асортименту матеріалів, що використовуються в сучасних транспортних засобах.

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1. Загальний розділ

## 1.1. Мета та завдання дослідження

Метою даної роботи є наукове обґрунтування, розробка та аналіз можливостей виготовлення конструкційних елементів трансмісійних механізмів автомобілів із неметалевих матеріалів, з урахуванням їх фізико-механічних властивостей, технологічної доцільності, експлуатаційної ефективності та економічної доцільності застосування в сучасному машинобудуванні.

Досягнення поставленої мети передбачає вирішення низки конкретних завдань, серед яких:

- Проаналізувати сучасний стан застосування неметалевих матеріалів у трансмісійних системах автомобілів, зокрема у вузлах тертя, передачі обертального моменту та з'єднувальних елементах.
- Охарактеризувати основні типи неметалевих матеріалів, що можуть бути використані для виготовлення трансмісійних деталей (полімери, армовані композити, технічні кераміки тощо), а також визначити їх переваги та обмеження порівняно з традиційними металами.
- Встановити вимоги до механічних, термічних і триботехнічних властивостей матеріалів, які необхідно враховувати при конструюванні та експлуатації трансмісійних елементів.
- Розробити технологічну схему виготовлення окремого конструкційного елемента трансмісії з неметалевого матеріалу (наприклад, шестерні або втулки), із урахуванням вибору матеріалу, способу формування, механічної обробки та контролю якості.
- Провести експериментальне дослідження властивостей вибраного матеріалу, зокрема на міцність, зносостійкість та стабільність геометричних параметрів після навантаження.

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Здійснити порівняльний аналіз ефективності використання неметалевих і металевих елементів за критеріями маси, ресурсу роботи, вартості виробництва та впливу на навколишнє середовище.
- Надати рекомендації щодо практичного застосування результатів дослідження у серійному виробництві та визначити напрями подальших досліджень і вдосконалення технологій виготовлення неметалевих деталей трансмісії.

## 1.2. Об'єкт і предмет дослідження

Об'єктом дослідження є трансмісійні механізми автомобілів, зокрема їх конструкційні елементи, що забезпечують передачу крутного моменту від двигуна до коліс транспортного засобу. До таких елементів належать шестерні, підшипники ковзання, муфти, вали, втулки, корпуси редукторів та інші складові, що функціонують у режимі динамічного навантаження та тертя [1].

Предметом дослідження виступають неметалеві матеріали, які можуть бути використані для виготовлення конструкційних елементів трансмісій, а також технології їх обробки, формування та оцінки експлуатаційної придатності. Особливу увагу зосереджено на полімерних композиціях, армованих пластиках, триботехнічних композитах та технічній кераміці, які демонструють високі показники зносостійкості, міцності та термостабільності.

Дослідження охоплює такі ключові аспекти:

- аналіз фізико-механічних та трибологічних характеристик неметалевих матеріалів;
- вивчення поведінки цих матеріалів в умовах експлуатаційних навантажень у трансмісії;
- розробку та оптимізацію технологічних процесів виготовлення окремих деталей трансмісій з полімерів і композитів;

					<i>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</i>	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- експериментальне тестування зразків для оцінки зносостійкості, міцності та надійності в умовах, наближених до реальних.

Таким чином, робота спрямована на дослідження матеріалознавчих і технологічних аспектів використання неметалевих матеріалів у трансмісійних системах автомобільної техніки з метою підвищення ефективності, ресурсу роботи та зменшення маси вузлів.

### 1.3. Трансмісійні механізми автомобілів

Трансмісія автомобіля є одним із ключових функціональних вузлів, який забезпечує передавання крутного моменту від двигуна до провідних коліс, адаптуючи його до дорожніх умов, режиму руху та навантаження. Вона виконує низку важливих функцій: регулювання швидкості руху, зміна напрямку обертання коліс, компенсація нерівномірностей у роботі двигуна, розподіл моменту між осями (в повнопривідних авто) та забезпечення оптимального режиму роботи силового агрегату. Без надійної та ефективної трансмісії неможливе повноцінне функціонування автомобіля [2].

У загальному вигляді трансмісія складається з таких основних елементів: зчеплення, коробка передач, проміжні передачі, карданні й шарнірні вали, головна передача, диференціал, піввісі. Конструкція трансмісії залежить від типу автомобіля (легковий, вантажний, повнопривідний тощо) та розташування двигуна.

За принципом передавання крутного моменту розрізняють трансмісії:

- Механічна трансмісія (МТ) – забезпечує зміну передач за допомогою зубчастих механізмів. Найпоширеніша в бюджетних автомобілях через простоту конструкції та високу надійність.
- Автоматична трансмісія (АТ) – змінює передаточне число автоматично без участі водія. Містить планетарні передачі, гідротрансформатор і систему керування.

					<b>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</b>	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Варіаторна трансмісія (CVT) – забезпечує безступеневу зміну передаточного числа, що дозволяє досягти плавного прискорення та оптимальної роботи двигуна.
- Роботизована трансмісія (АМТ) – поєднує принципи механічної трансмісії та електронного керування, автоматизуючи процес перемикання передач.

Кожен елемент трансмісії піддається значним навантаженням, тертю, ударам та вібраціям. Традиційно більшість деталей трансмісії виготовлялися з металів (сталь, чавун, алюмінієві сплави), проте сучасні виклики автомобілебудування стимулюють пошук альтернативних, легших та технологічніших матеріалів – зокрема, неметалевих, що можуть ефективно замінити метали в низці конструкційних рішень.

Таким чином, детальне розуміння будови та функцій трансмісійних механізмів є необхідною умовою для обґрунтованого вибору матеріалів і конструкторських підходів при створенні їх компонентів, у тому числі із застосуванням неметалевих матеріалів.

#### 1.4. Вимоги до матеріалів трансмісійних елементів

Конструкційні елементи трансмісійних механізмів автомобіля піддаються значним механічним, термічним і триботехнічним навантаженням, що висуває жорсткі вимоги до матеріалів, з яких вони виготовляються. Ці матеріали мають забезпечувати надійність, довговічність, безпечну та ефективну роботу системи передач крутного моменту в умовах інтенсивної експлуатації [3].

До основних вимог належать:

- Зносостійкість. Трансмісійні елементи працюють у умовах постійного тертя. Матеріали повинні чинити опір абразивному та адгезійному зносу, особливо при недостатньому або змінному змащенні.

					<i>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</i>	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Механічна міцність. Матеріали мають витримувати динамічні та ударні навантаження без втрати геометричної форми, тріщиноутворення чи руйнування. Наприклад, шестерні чи підшипникові втулки повинні витримувати контактні напруги в зоні зчеплення зубців.
- Твердість поверхні. Більшість деталей, що контактують під тиском, потребують високої поверхневої твердості, аби уникнути піттингу, задирів або пластичної деформації. Для цього часто застосовуються поверхнева обробка або зміцнення матеріалів.
- Теплова стабільність. Трансмісія зазнає локального нагрівання через тертя, особливо в зоні зубчастих зачеплень. Матеріал не повинен втрачати своїх властивостей при підвищених температурах.
- Малий коефіцієнт тертя. Це особливо актуально для ковзних з'єднань і підшипників. Використання матеріалів із низьким коефіцієнтом тертя зменшує витрати енергії та нагрівання.
- Корозійна стійкість. Елементи трансмісії можуть контактувати з агресивним середовищем (волога, дорожні реагенти, мастила), тому матеріали мають бути хімічно інертними або захищеними.
- Маса та густина матеріалу. Легкі матеріали дозволяють знизити загальну масу автомобіля, що сприяє економії палива. Ця вимога зумовлює інтерес до полімерів та композитів як альтернативи традиційним металам.
- Технологічність. Матеріали мають бути придатними до масового виробництва – легко оброблятися, формуватися, зварюватися чи литись. Для неметалів важливим є також можливість формування складної геометрії за мінімальних витрат.
- Сумісність із іншими матеріалами. Часто деталі трансмісії працюють у парі з іншими (наприклад, пластикова шестерня з металевою). Матеріали повинні бути сумісними за показниками твердості, тертя та теплового розширення.

					<i>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

Отже, вибір матеріалу для виготовлення того чи іншого трансмісійного елемента потребує всебічного аналізу. Неметалеві матеріали повинні відповідати більшості зазначених вимог, щоб мати змогу ефективно замінити металеві аналоги без втрати якості й ресурсу деталі. У наступних розділах буде детально проаналізовано, які полімери та композити здатні задовольнити ці критерії в конкретних умовах експлуатації трансмісії.

### 1.5. Неметалеві матеріали у машинобудуванні

У сучасному машинобудуванні неметалеві матеріали поступово займають важливе місце, особливо в тих галузях, де актуальним є зменшення маси конструкцій, зниження витрат, підвищення корозійної стійкості й зниження шуму та вібрацій. До таких матеріалів належать термопласти, реактопласти, армовані композити та технічна кераміка, кожен з яких має унікальні властивості, що дозволяють їм ефективно працювати в умовах, традиційно зарезервованих за металами [4].

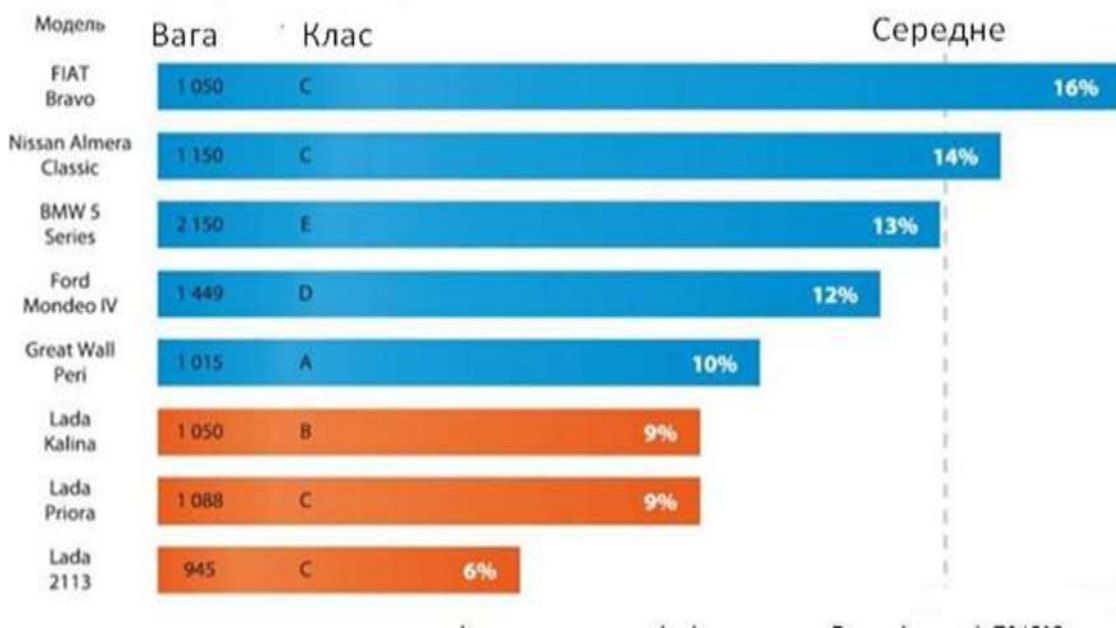


Рис. 1 – Ваговий зміст полімерів у автомобілях різних виробників

Полімери, особливо технічні термопласти: поліамід, поліацеталь, поліетеркетон тощо широко застосовуються у виготовленні шестерень,

втулок, корпусів редукторів. Вони характеризуються низькою густиною, добрими антифрикційними властивостями, стійкістю до корозії та хімічних реагентів. Деякі з них мають властивість до самозмащування, що дозволяє зменшити або повністю виключити використання мастильних матеріалів.



Рис. 2 – Структура застосованих полімерних матеріалів від загальної маси автомобіля (в частках)

Полімерні композиційні матеріали (ПКМ), до складу яких входять армувальні волокна (скляні, вуглецеві, арамідні) та матриці на основі термореактивних або термопластичних смол, забезпечують значно вищі міцнісні характеристики порівняно з чистими полімерними матеріалами. Завдяки високому співвідношенню міцності до маси ПКМ активно застосовуються у конструкційних деталях трансмісії – особливо там, де потрібна висока жорсткість при мінімальній вазі [5].

Керамічні матеріали, зокрема оксидна, карбідна та нітридна кераміка, володіють унікальними властивостями: надзвичайна твердість, термостійкість, хімічна інертність та зносостійкість. У трансмісійних механізмах автомобілів керамічні підшипники або вставки знаходять застосування в умовах високих швидкостей і температур, де метали або полімери працюють менш ефективно [6].



Використання неметалевих матеріалів дозволяє конструкторам значно розширити можливості при проектуванні трансмісійних систем, створювати легші, дешевші та технологічно вигідніші конструкції, знижуючи при цьому рівень шуму та енергоспоживання. Однак правильний вибір неметалевого матеріалу повинен базуватись на ретельному аналізі умов експлуатації, сумісності з іншими елементами та довготривалих характеристик зношування.

#### 1.6. Досвід застосування у трансмісіях сучасних автомобілів

Сучасна автомобільна промисловість дедалі активніше впроваджує неметалеві матеріали у конструкцію трансмісій, що зумовлено прагненням до зменшення маси транспортного засобу, підвищення ефективності, зниження витрат на виготовлення та покращення триботехнічних характеристик. Застосування полімерів і композитів у трансмісійних механізмах не є новим, проте в останні десятиліття їхній спектр використання значно розширився завдяки вдосконаленню властивостей і технологій їх виробництва [7].

Одним із перших прикладів успішного впровадження неметалевих матеріалів у трансмісію стали полімерні шестерні. У приводах допоміжних механізмів або вторинних вузлів трансмісії (тахогенератори, електроприводи, масляні насоси) вже з 1980-х років використовують шестерні з поліаміду, поліацеталю або армованих полімерів. Такі деталі демонструють добру зносостійкість і тишу роботи при значному зниженні маси.

Автомобілі BMW, Audi, Mercedes-Benz та інші преміальні бренди використовують пластикові компоненти у конструкції коробок передач, таких як опори, втулки, ущільнення, а також шестерні з армованих полімерів у системах старт-стоп. Наприклад, у трансмісії BMW Steptronic застосовуються полімерні елементи, що зменшують масу на 10–15% у порівнянні з традиційними компонентами.

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

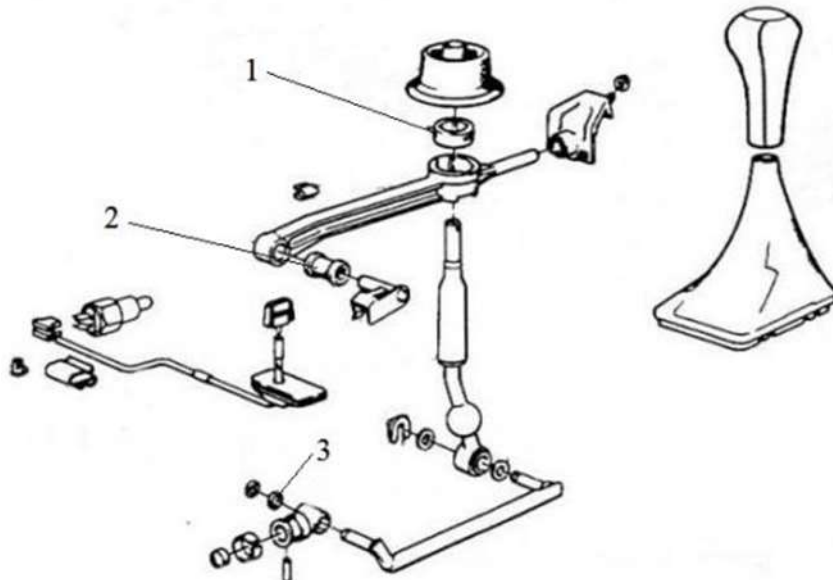


Рис. 4 – Полімерні елементи трансмісії BMW, втулки: 1 –кріплення шарніра; кріплення тяги: 2 – важіль; 3 – обойма перемикання коробки передач

У японських та корейських автомобілях (Toyota, Honda, Hyundai) полімерні матеріали широко застосовуються у варіаторних (CVT) трансмісіях, де певні елементи, що працюють безпосередньо не в зоні високих навантажень, виконані з термостійких композитів.

Компанія DuPont розробила спеціалізовані полімерні матеріали для шестерень і муфт трансмісій, зокрема Zytel® HTN, Delrin®, Vespel®, що демонструють чудову термостійкість, низький коефіцієнт тертя та тривалий термін служби в умовах динамічних навантажень.

За умови правильного проектування та підбору матеріалу полімерні та композитні деталі можуть ефективно функціонувати навіть у таких відповідальних вузлах, як трансмісія. Вони забезпечують значну економію маси, зменшення шумів, стійкість до корозії й мають добру змащувальну сумісність. Водночас для деталей, які працюють при високих навантаженнях і в умовах граничного тертя, використання неметалів потребує особливої обережності та ретельного випробування.

Реальний досвід провідних виробників доводить ефективність використання неметалевих матеріалів у трансмісіях, але потребує виваженого підходу, урахування граничних режимів та глибокої інженерної оцінки.

### 1.7. Переваги та недоліки неметалевих матеріалів

Застосування неметалевих матеріалів у конструкціях трансмісійних механізмів автомобілів обумовлюється прагненням виробників зменшити масу агрегатів, підвищити ефективність роботи вузлів та оптимізувати виробничі витрати. Проте при виборі між металами і неметалами слід чітко розуміти їхні переваги й обмеження, що визначають доцільність використання у конкретних конструкційних умовах.

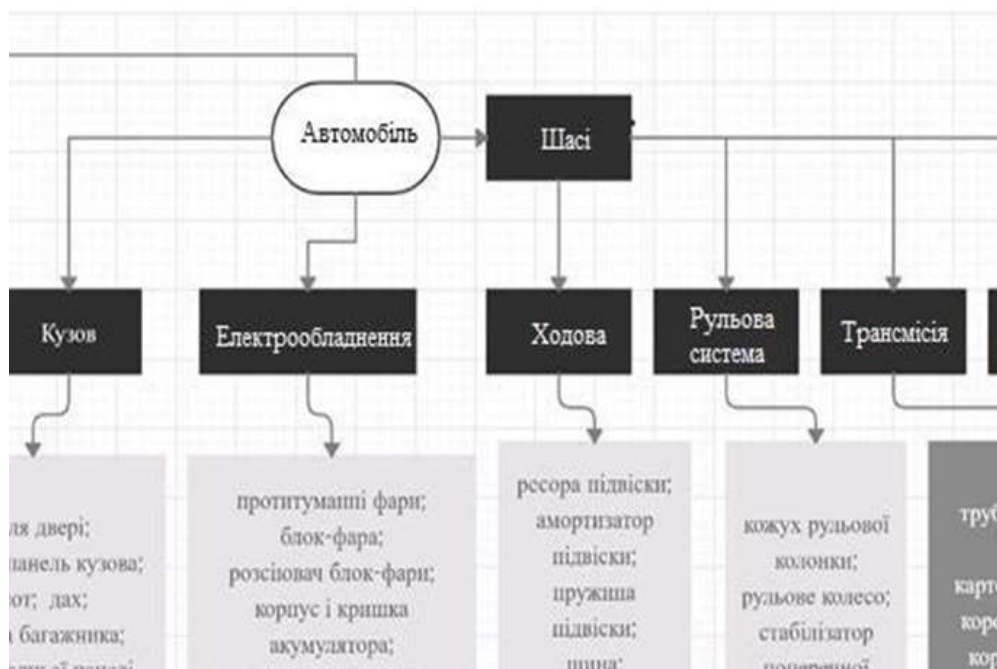


Рис. 5 – Блок-схема елементів автомобіля з полімерів

Переваги неметалевих матеріалів:

- Низька густина та легка вага. Більшість полімерів та композитів мають густину у 3–6 разів меншу, ніж у сталі чи бронзи. Це сприяє зниженню загальної маси транспортного засобу, а отже – покращенню паливної економічності та зменшенню викидів CO<sub>2</sub>.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ

Арк.

17

- Низький коефіцієнт тертя. Полімери здатні забезпечувати самозмащування або працювати у парах тертя без мастила, що важливо для безшумної роботи й довговічності трансмісійних вузлів.
- Хімічна стійкість. Неметали не схильні до корозії в умовах контакту з оливами, солями, водою чи хімічними реагентами, що забезпечує стабільність їх властивостей у складному експлуатаційному середовищі.
- Технологічність. Багато полімерів легко піддаються формуванню методом лиття під тиском, екструзії або пресування, що дозволяє виготовляти складні геометричні форми без подальшої механічної обробки.
- Низький рівень шуму та вібрацій. Деталі з полімерів мають добрі демпфувальні властивості, що дозволяє зменшити рівень шуму в трансмісії – важливий показник комфорту.

Недоліки неметалевих матеріалів:

- Обмежена механічна міцність. У порівнянні з металами більшість неметалів поступаються в межах міцності, жорсткості та зносостійкості, що обмежує їх використання в сильно навантажених вузлах.
- Чутливість до температур. Більшість полімерів мають значне зниження міцності при підвищених температурах, що обмежує їх застосування в зонах нагріву або термічного навантаження.
- Старіння та деградація. З часом полімери можуть втрачати свої властивості через вплив ультрафіолету, кисню, термоокиснення, вологи або механічної втоми.
- Низька теплова провідність. Це може призводити до локального перегріву деталей, що працюють у режимі тертя, за відсутності ефективного тепловідведення.

					<i>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</i>	Арк.
						18
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



## 2. Адитивне виробництво полімерних елементів автомобілів

### 2.1. Фізико-механічні властивості перспективних неметалевих матеріалів

Підбір неметалевих матеріалів для виготовлення конструкційних елементів трансмісій автомобілів вимагає врахування комплексу фізико-механічних характеристик, які забезпечують довговічність, працездатність та безпечну експлуатацію вузлів у динамічному навантаженні. У цьому контексті найбільш перспективними вважаються високоміцні полімери, армовані полімерні композити, а також технічна кераміка, які здатні частково або повністю замінити традиційні метали в окремих конструкціях трансмісій.

Полімери, такі як поліамід (РА), поліацеталь (РОМ), поліетерэфіретон (РЕЕК), відзначаються низькою густиною (1,2–1,4 г/см<sup>3</sup>), що зменшує масу деталі у 2–6 разів у порівнянні зі сталевими аналогами. Їхня міцність на розтяг (50–140 МПа) та твердість (по Шору D – 80–95) є цілком достатніми для роботи в умовах помірних механічних навантажень. Окремі модифіковані полімери можуть працювати при температурах до 200–250 °С без значного зниження характеристик.

Композити на основі полімерних матриць, армовані скляними, вуглецевими або арамідними волокнами, демонструють ще вищі показники міцності та жорсткості. Наприклад, композит на основі РЕЕК з вуглецевим волокном може мати модуль пружності понад 18 ГПа, межу міцності – понад 250 МПа, зносостійкість у десятки разів вищу за неармовані полімери. Це дозволяє використовувати їх у високонавантажених деталях – шестернях, втулках, елементах муфт.

Технічна кераміка, особливо на основі нітриду кремнію (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>) або оксиду алюмінію (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), володіє унікальним поєднанням властивостей: надвисока твердість (до 1500 НV), термостійкість (понад 1000 °С), зносостійкість і хімічна інертність. Водночас крихкість керамічних

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

матеріалів вимагає обмеженого використання – переважно в умовах високошвидкісного обертання при мінімальних ударних навантаженнях (наприклад, у підшипниках або втулках високоточних механізмів).

Таблиця 2.1. Коефіцієнти тертя між антифрикційними матеріалами та сталлю в сухих умовах

№	Матеріал (антифрикційний)	Коефіцієнт тертя по сталі (сухе тертя)	Джерело
1	Політетрафторетилен (PTFE)	0.04–0.10	<a href="#">eMachineShop</a> , <a href="#">Wikipedia</a>
2	Графіт	0.10–0.21	<a href="#">Engineering Toolbox</a> , <a href="#">Physics Factbook</a>
3	Дисульфід молібдену (MoS <sub>2</sub> )	0.05–0.15	<a href="#">ScienceDirect</a> , <a href="#">Wikipedia</a>
4	Бронза	0.08–0.16	<a href="#">Roy Mech</a> , <a href="#">National Bronze</a>
5	Нейлон (РА6)	0.30–0.40	<a href="#">Schneider &amp; Company</a> , <a href="#">TeachEngineering</a>

Завдяки такому спектру характеристик неметалеві матеріали знаходять усе ширше застосування в трансмісіях, проте їх використання потребує інженерного обґрунтування: розрахунків на міцність, аналізу умов роботи, вибору методу виготовлення та забезпечення стійкості до старіння й зносу. Таким чином, фізико-механічні властивості неметалів є вирішальним фактором при прийнятті конструкційних рішень у напрямі заміни традиційних металевих деталей трансмісії.

## 2.2. Критерії вибору матеріалів для шестерень, підшипників, муфт та інших елементів

Вибір неметалевих матеріалів для виготовлення конструкційних елементів трансмісійних механізмів автомобілів вимагає системного підходу, який передбачає оцінку комплексу експлуатаційних, технологічних та економічних параметрів. Залежно від типу елемента трансмісії (шестерня, муфта, втулка, підшипник тощо), умови його роботи висувають специфічні вимоги до матеріалу.

**Для шестерень трансмісій основними критеріями вибору є:**

					<b>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</b>	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Висока зносостійкість – матеріал повинен ефективно працювати в умовах тертя, абразивного впливу і циклічного навантаження;
- Механічна міцність і жорсткість – шестерня передає крутний момент, тому важливо, щоб матеріал не деформувався та не руйнувався;
- Висока точність формування зубців – полімери повинні зберігати форму під навантаженням, зокрема в умовах нагрівання;
- Сумісність з мастильними матеріалами або самозмащуваність – особливо для тихохідних передач;
- Низький рівень шуму – полімерні шестерні суттєво знижують шумовий фон, що є перевагою у легкових авто.

Для підшипників ковзання і втулок важливими є:

- Низький коефіцієнт тертя – для зменшення втрат енергії;
- Стійкість до задирання – забезпечується використанням композитів з твердими змащувальними компонентами (графіт, PTFE);
- Хімічна та термічна стабільність – особливо в умовах контакту з трансмісійними рідинами;
- Стійкість до деформацій при тривалих статичних і динамічних навантаженнях.

Для муфт та елементів з'єднання визначальними є:

- Висока ударна в'язкість і амортизаційна здатність – для пом'якшення передавання імпульсних навантажень;
- Температурна стабільність – важлива для збереження геометричних розмірів при перегріві;
- Стійкість до циклічного навантаження – що забезпечує тривалий ресурс роботи.

Загальні критерії для всіх типів деталей також включають:

- Технологічність – можливість лиття, формування складної геометрії, мінімальна потреба в механічній обробці;

					<b>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

- Маса – легкі матеріали дозволяють зменшити інерційні навантаження;
- Вартість матеріалу та виготовлення – для серійного виробництва економічні аспекти відіграють ключову роль.

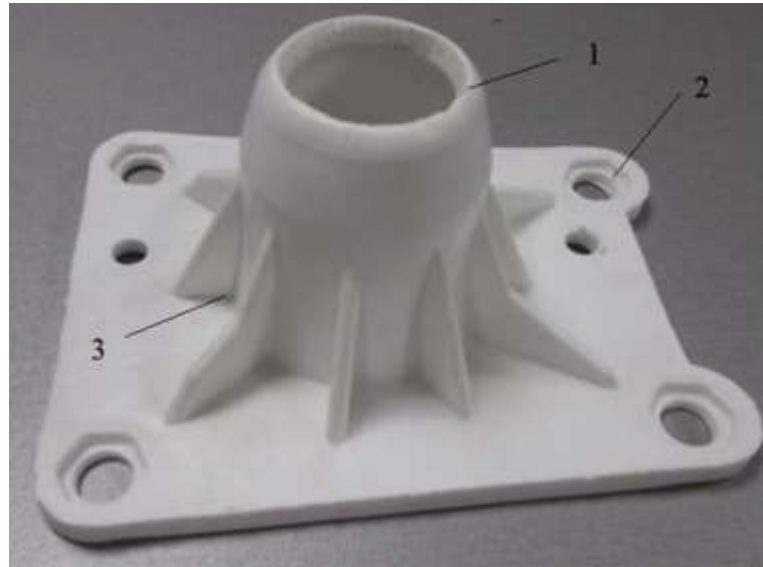


Рис. 6 – Місця зломів корпусу куліси: 1 – від важеля перемикання передач; 2 – від кріплення (4 місця); 3 – від кутових сил прикладених до важеля перемикання передач.

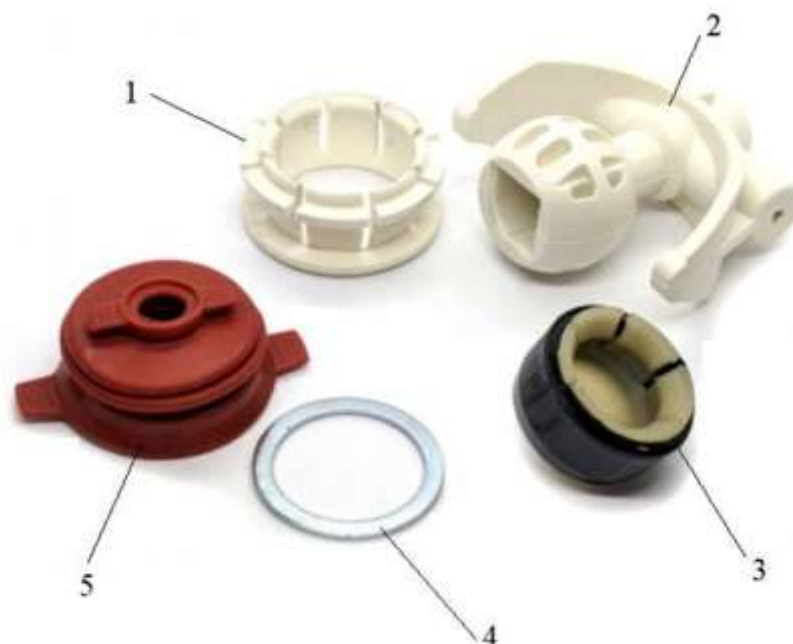


Рис. 7 – Рем-комплект кульової опори важеля перемикання передач AUDI VW Passat V 8: 1 – опора кульового пальця перемикача передач; 2 – кульовий палець перемикання передач; 3 – втулка тяги; 4 – кільце; 5 – пиловловлювач

					<b>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

Таким чином, вибір матеріалу завжди має ґрунтуватися на чітко визначених функціональних характеристиках деталі, умовах її роботи в складі трансмісії та економічній доцільності. Врахування цих критеріїв дозволяє досягти надійності, довговічності та ефективності при застосуванні неметалевих матеріалів у конструкціях автомобільної трансмісії.

### 2.3. Оцінка довговічності та зносостійкості полімерних і композитних деталей

Оцінка довговічності та зносостійкості є ключовим етапом при обґрунтуванні можливості застосування неметалевих матеріалів у трансмісійних механізмах автомобілів. Оскільки такі вузли працюють в умовах циклічних навантажень, тертя, температурних коливань та впливу мастильних середовищ, важливо визначити здатність полімерних і композитних деталей витримувати ці фактори без втрати працездатності протягом заданого ресурсу.

Довговічність полімерних деталей визначається сукупністю параметрів: механічною втомою, стійкістю до повзучості, термостабільністю та опором до старіння. Полімери, на відміну від металів, схильні до поступових змін структури під дією тривалого навантаження – явища, відомого як повзучість, що може призводити до втрати точності сполучень або зміни передаточних характеристик шестерень. Саме тому для деталей трансмісії, які працюють у тривалому навантаженому режимі, доцільніше застосовувати армовані композити з покращеною стабільністю форми.

Зносостійкість є одним із головних факторів, що обмежують ресурс роботи полімерних елементів у вузлах тертя. Вона залежить від структури полімеру, типу наповнювача, якості мастила та режиму навантаження. Зокрема, добавки на основі графіту, молібдену, PTFE або вуглецевого волокна значно знижують коефіцієнт тертя і уповільнюють абразивний та адгезійний знос. За результатами випробувань полімерних шестерень із

					<i>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		24

наповненням, зносостійкість таких матеріалів може бути у 5–10 разів вищою, ніж у чистих полімерів.

Методи оцінки зносостійкості включають як лабораторні випробування на триботехнічних стендах (типу «штифт–диск», «вал–втулка»), так і натурні експерименти в складі реальних вузлів трансмісії. Зокрема, визначають такі параметри: швидкість зношування ( $\text{мм}^3/\text{Н}\cdot\text{м}$ ), коефіцієнт тертя, глибину зношеної зони, а також зміну геометричних параметрів деталі після певного циклу навантаження.

Окремо враховується термостійкість при терті, тобто здатність матеріалу зберігати фізико-механічні властивості при локальному нагріванні. Так, РЕЕК-композити здатні функціонувати без деградації до температур 250–280 °С, що значно перевищує межі для більшості стандартних полімерів (100–150 °С).

На підставі результатів досліджень можна зробити висновок, що належний рівень довговічності та зносостійкості полімерних і композитних матеріалів забезпечується за умови правильного підбору рецептури, обробки поверхні та врахування умов навантаження. Завдяки цьому, неметалеві деталі можуть ефективно функціонувати у відповідальних вузлах трансмісій сучасних автомобілів, що підтверджується як експериментальними даними, так і практикою провідних автовиробників.

#### 2.4. Екологічні та економічні аспекти впровадження неметалевих матеріалів

Використання неметалевих матеріалів у конструкції трансмісій автомобілів має не лише інженерно-технічне значення, а й безпосередньо впливає на економічну ефективність виробництва та екологічну безпеку експлуатації транспортних засобів. У сучасних умовах глобальних викликів – зростання вартості енергоресурсів, боротьби з кліматичними змінами та

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		25

необхідності зменшення викидів вуглекислого газу – ці аспекти набувають особливої актуальності.

Економічні переваги впровадження неметалевих матеріалів пов'язані насамперед із:

- Зниженням маси деталей, що дозволяє зменшити витрати палива, покращити динамічні характеристики автомобіля та підвищити енергоефективність;
- Меншими витратами на виготовлення складних деталей завдяки можливості лиття під тиском, екструзії та іншим високоавтоматизованим методам переробки полімерів, що скорочує кількість механічної обробки;
- Скороченням виробничого циклу – завдяки швидкому формуванню деталей з полімерних мас та мінімізації кількості операцій;
- Зниженням експлуатаційних витрат, оскільки деякі полімерні компоненти не потребують регулярного мастила або заміни через корозію.

З іншого боку, економічна ефективність може бути обмежена високою вартістю деяких композитних матеріалів або необхідністю додаткових досліджень і випробувань перед серійним впровадженням. У цьому контексті особливо важливо оцінювати сукупну вартість життєвого циклу деталі, включаючи витрати на виготовлення, обслуговування та утилізацію.

Екологічні аспекти також мають важливе значення. Неметали, зокрема полімери, мають:

- Стійкість до корозії та хімічних реагентів, що зменшує ризик забруднення довкілля при витоках мастил або робочих рідин;
- Можливість повторної переробки (рециклінгу) – багато сучасних конструкційних термопластів можна повторно використовувати після подрібнення, що знижує навантаження на навколишнє середовище;

					<i>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</i>	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- Зниження загального екологічного сліду автомобіля – завдяки меншій масі транспортного засобу та відповідно – меншій витраті пального та викидам CO<sub>2</sub>.

Однак слід враховувати і потенційні екологічні ризики, пов'язані з використанням термореактивних полімерів або складних армованих композитів, які важко піддаються переробці та утилізації. Саме тому важливим напрямом розвитку є створення біосумісних та екологічно нейтральних полімерних систем, а також використання вторинної сировини у виробництві технічних полімерів.

У підсумку, впровадження неметалевих матеріалів у трансмісійні системи дозволяє досягти позитивного балансу між економічною вигодою та екологічною відповідальністю, що відповідає сучасним вимогам сталого розвитку в автомобільній промисловості.

#### 2.5. 3D-друк. Технології 3D друку

3D-друк, або адитивне виготовлення, – це сукупність технологій, за допомогою яких фізичний об'єкт створюється шляхом пошарового нанесення матеріалу згідно з цифровою 3D-моделлю. Ці технології кардинально змінюють підходи до виробництва виробів у промисловості, зокрема в машинобудуванні, завдяки високій гнучкості, економії матеріалу та можливості виготовлення складних геометрій без застосування традиційної оснастки.

На сьогодні 3D-друк використовується для:

- виготовлення дослідних зразків та прототипів;
- створення кінцевих функціональних виробів з термопластів і композитів;
- виробництва оснащення, шаблонів, пристроїв для малосерійного складання.

					<i>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</i>	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Основними технологіями 3D-друку в промисловості є кілька основних методів 3D-друку, класифікованих відповідно до стандарту ISO/ASTM 52900:

◆ **FDM (Fused Deposition Modeling)** – моделювання шляхом наплавлення розплавленого матеріалу.

Найбільш поширена технологія для виготовлення полімерних деталей. В якості сировини використовуються нитки (філаменти) з PLA, ABS, PETG, PA (нейлон), PEEK тощо. Висока доступність, простота експлуатації, підходить для прототипів і простих функціональних виробів.

◆ **SLA (Stereolithography Apparatus)** – лазерна фотополімеризація смол.

Забезпечує високу точність і гладкість поверхні, але має обмежену механічну міцність і термостійкість матеріалу. Застосовується для виготовлення точних моделей, форм, мікродеталей.

◆ **SLS (Selective Laser Sintering)** – селективне лазерне спікання порошків.

Дозволяє виготовляти складні функціональні деталі з порошкових полімерів (PA12, TPU), без опорних структур. Забезпечує високу міцність, придатне для малосерійного виробництва технічних деталей.

◆ **DLP, MJF, DED, Binder Jetting** – інші сучасні методи, що використовуються для створення високоточного, інженерного або металевого друку.

Матеріали для 3D-друку в автомобілебудуванні:

**PLA (полілактид)** – легкий у друку, але крихкий; використовується для декоративних і прототипних елементів.

**ABS (акрилонітрилбутадієнстирол)** – міцніший і термостійкіший; підходить для функціональних корпусних деталей.

					<b>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		28

**PETG** – поєднує гнучкість і хімічну стійкість; використовується в механізмах з помірними навантаженнями.

**PA** (нейлон), зокрема армований скловолокном або вуглецевим волокном – має високу зносостійкість і ударну міцність; придатний для виготовлення шестерень і втулок.

**PEEK, Ultem** – високотемпературні технічні полімери для критичних навантажень (вузли тертя, силові елементи).

Значення для трансмісійних механізмів суттєве через те, що 3D-друк дає змогу швидко створювати дослідні зразки полімерних елементів трансмісії – шестерень, втулок, корпусних елементів – з подальшим тестуванням їх міцності, точності та зносостійкості. Це особливо актуально у ранніх етапах проектування або для малосерійного виробництва спеціалізованих компонентів.

3D-друк як форма адитивного виробництва є ефективним засобом розробки та виготовлення полімерних елементів автомобілів. При правильному виборі матеріалу та технології, цей метод може забезпечити оптимальне поєднання точності, швидкості та економічної доцільності, особливо на етапі експериментального моделювання та впровадження інновацій у конструкцію трансмісійних вузлів

## 2.6. Еволюція застосування полімерних матеріалів

У сучасному автомобілебудуванні спостерігається сталий інтерес до заміни традиційних металевих компонентів трансмісій на полімерні, що зумовлено потребою зниження маси, покращення ергономіки перемикання передач, зменшення шуму та вартості виробництва. Одним із ключових вузлів, де активно впроваджуються полімерні матеріали, є механізми перемикання передач кулісного типу, зокрема типу M1, що широко застосовуються у передньопривідних легкових автомобілях.

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Куліса типу М1 забезпечує передавання руху від важеля до механізму перемикання, часто розташованого безпосередньо на корпусі коробки передач. У таких конструкціях полімери застосовуються для виготовлення втулок, шарнірних елементів, опорних пластин, напрямних і навіть частини важеля. Найпоширенішими є поліаміди (РА6, РА66), модифіковані поліацетали (РОМ), а також композити з додаванням твердих змащувальних наповнювачів (графіт, РТФЕ).

Розвиток використання полімерів у механізмах перемикання передач типу М1 зумовлює:

- Зниження маси вузла на 20–40% порівняно з металевими аналогами;
- Покращення комфорту за рахунок зниження шумів, вібрацій і зусилля перемикання;
- Підвищення корозійної стійкості в умовах впливу вологи, пилу та перепадів температур;
- Спрощення монтажу та зниження собівартості завдяки литтю під тиском і мінімізації обробки.

Аналіз функціонування куліс типу М1, оцінка можливості заміни окремих металевих елементів на полімерні аналоги, а також вибір оптимального матеріалу для виготовлення втулки або напрямної з урахуванням навантажень, зносу і технології виготовлення наведені нижче.

Кулісний механізм типу М1 є широко поширеним рішенням у системах перемикання передач передньопривідних автомобілів із поперечним розташуванням двигуна. Така конструкція забезпечує механічний зв'язок між селектором перемикання передач, розташованим у салоні, та механізмом перемикання, змонтованим на картері коробки передач.

Привід управління кулісою М1 Привід кулісного механізму типу М1 складається з: ручки (важеля) перемикання передач, встановленої у салоні автомобіля, тягово-шарнірного механізму – зазвичай дві жорсткі тяги (повздовжня та поперечна) або гнучкі троси, куліси (важеля вибору передач),

					<i>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		30

розташованої на корпусі КПП, яка передає зусилля на вал перемикання та внутрішній механізм вибору, проміжних втулок, кронштейнів, опор і направляючих, частково виготовлених з полімерів, що забезпечують ковзання й фіксацію тяг.

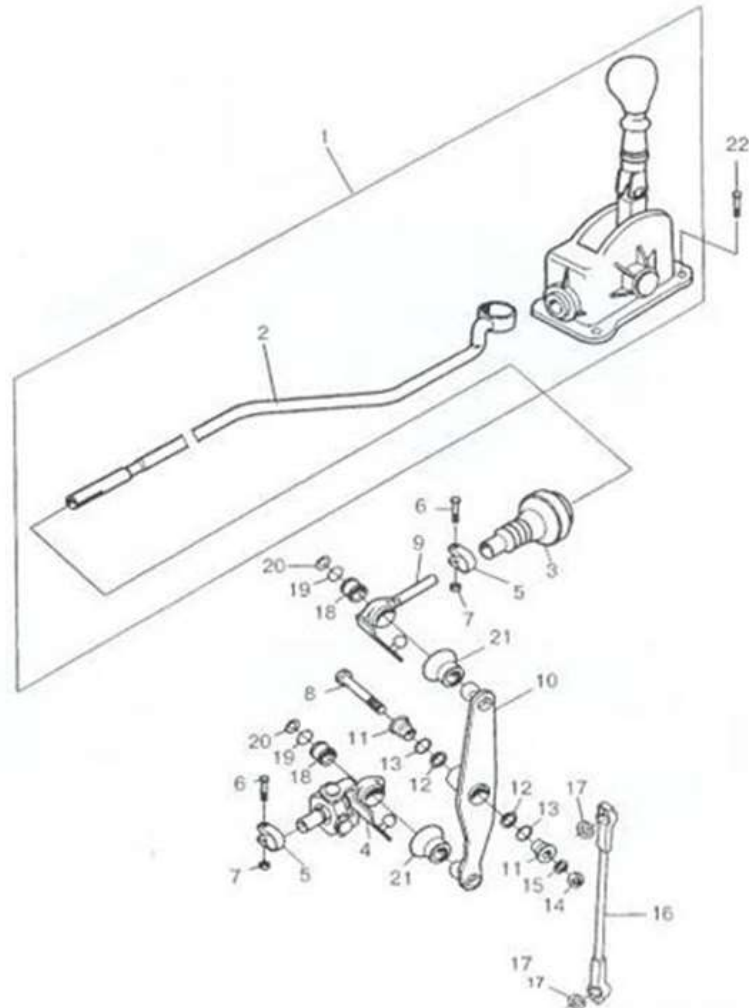


Рис. 8 – Механізм перемикання передач:

1 – привід перемикання передач в зборі; 2 – вал механізму перемикання передач; 3 – чохол труби в зборі; 4 – шарнір карданний в зборі; 5 – хомут стягнутий вилки шарніра; 6, 22 – болти; 7, 14 – гайки; 8 – вісь важеля; 9 – хвостовик шарніра в зборі; 10 – важіль в зборі; 11 – втулка маточини важеля; 12 – демпфуюче кільце маточини; 13 – кільце ущільнювача маточини; 15 – шайба; 16 – тяга вибору в зборі; 17 – ущільнювач шарніра тяги вибору; 18 – вкладиш шарніра; 19 – кільце вкладиша ущільнювача; 20 – заглушка шарніра; 21 – брудовідбивач шарніра; 22 – болт спеціальний.

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ

Арк.

31



Ці рухи передаються через тяги або троси на відповідні осі повороту кулісного механізму. Одна вісь забезпечує вибір ряду передач (оберт куліси), інша – безпосереднє перемикання (переміщення штовхача вздовж осі).

Завдяки використанню полімерних втулок і опор у вузлах з'єднання, зусилля на перемикання зменшуються, а хід важеля стає чітким і лінійним. Також полімерні напрямні зменшують люфти й підвищують чіткість включення передач.

Ергономіка та динаміка дій водія Середнє зусилля перемикання передач в механізмах такого типу складає 20...35 Н; хід важеля у повздовжньому напрямі – 80...120 мм, у бічному – 40...60 мм; час перемикання – 0,3...0,6 с у досвідченого водія.

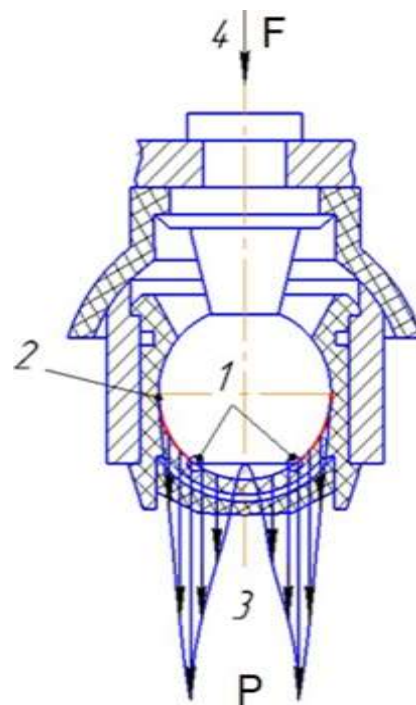


Рис. 10 – Плями гострого контакту кульової головки шарніра

Для забезпечення надійного та ергономічного перемикання передач у механічній трансмісії необхідно провести оцінку зусиль, що передаються від водія через важіль перемикання на тяги механізму вибору передач. Розрахунок виконується для тяг жорсткого типу, які передають переміщення

у двох площинах: – вибору ряду передач (бічна тяга); – ввімкнення передачі (поздовжня тяга).

Вхідні дані.

Довжина важеля перемикавання передач (від осі обертання до точки прикладання сили):

$$L = 120 \text{ мм} = 0,12 \text{ м} \quad (2.1)$$

Прикладене зусилля водія до ручки перемикавання передач:

$$F_{\text{водія}} = 30 \text{ Н} \quad (2.2)$$

Відношення плеча важеля водія до плеча привода куліси:

$$i = L/l_{\text{тяги}} = 120 / 60 = 2 \quad (2.3)$$

ККД тяглового механізму привода куліси (з урахуванням втрат на тертя)  $\eta = 0,85$ .

Розрахунок зусилля, що передається на тягу:

Зусилля, що створюється на тязі при перемиканні передач, можна обчислити з урахуванням передавального відношення та ККД:

$$F_{\text{тяги}} = (F_{\text{водія}} * i) / \eta \quad (2.4)$$

$$F_{\text{тяги}} = (30 * 2) / 0,85 \approx 70,6 \text{ Н} \quad (2.5)$$

Отже, при прикладеному зусиллі водія 30 Н, на тязі механізму перемикавання діє сила близько 70 Н.

Розрахунок сили тертя у втулках (полімерні напрямні):

Для перевірки надійності полімерних елементів можна виконати попередній розрахунок сили тертя в одній з втулок (наприклад, ковзної втулки куліси).

Діаметр втулки:  $d = 12 \text{ мм}$

Довжина втулки:  $h = 15 \text{ мм}$

Матеріал: поліамід з коефіцієнтом тертя  $\mu = 0,18$

Радіальне навантаження (оцінкове):  $N = 70 \text{ Н}$

Сила тертя:

$$F_{\text{тертя}} = \mu * N = 0,18 * 70 \approx 12,6 \text{ Н} \quad (2.6)$$

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це зусилля не є критичним і може бути сприйняте полімерною втулкою без помітного зносу за нормальних умов експлуатації

Отримані розрахункові значення зусиль підтверджують, що при застосуванні конструкційних полімерів з низьким коефіцієнтом тертя та правильною геометрією елементів, система привода куліси типу М1 забезпечує ефективну передачу рухів водія при невеликих зусиллях. Це робить можливим використання легких полімерних втулок, обойм і напрямних без зниження надійності механізму перемикання передач.

2.7. Методи оцінки зносу полімерів і композитів на їх основі залежно від умов тертя

У контексті розвитку транспортного машинобудування зростає потреба у використанні полімерів та полімерних композитів як конструкційних матеріалів для вузлів, що зазнають тертя. У зв'язку з цим надзвичайно важливою є задача достовірного прогнозування їх зносостійкості залежно від механічних властивостей та умов експлуатації.

Один із перших якісних підходів до оцінки зносостійкості пластмас було запропоновано С.Б. Ратнером. Він увів формулу, що описує знос ( $V$ ) як функцію від коефіцієнта тертя ( $\mu$ ), твердості ( $H$ ), міцності при розтягуванні ( $\sigma$ ) та відносного подовження ( $\epsilon$ ):

$$V \sim \mu / (H \cdot \sigma \cdot \epsilon) \quad (2.7)$$

Згідно з цією формулою, підвищення розривного подовження матеріалу відіграє важливу роль у підвищенні його зносостійкості, оскільки воно знижує ймовірність мікроруйнувань в умовах поверхневого розтягування [9].

Подальші дослідження, зокрема К.Г. Budinski, базувалися на випробуваннях матеріалів у режимі частково закріпленого абразиву. Будинськи визначив емпіричну залежність швидкості стирання ( $W$ ) від

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

коефіцієнта тертя та площі деформації в координатах «глибина вдавнення – об’ємний знос»:

$$W \sim \mu \cdot S_e \quad (2.8)$$

де  $S_e$  – площа під кривою деформації в експерименті з вдавненням кульки [10].

Horst Czichos у своїй моделі визначає абразивний знос як функцію контактної площі, пройденої відстані, навантаження, коефіцієнта тертя та напруги при розриві:

$$W \sim (F_n \cdot S \cdot f) / y \quad (2.9)$$

Цей підхід враховує дію зношувальних частинок, які утворюються у процесі тертя та виступають як додатковий абразив [11].

Серед сучасних моделей важливим є також підхід Фрідріха та Кафки, які включили до формули оцінки зносу енергію руйнування ( $G$ ) та твердість матеріалу ( $H$ ):

$$W \sim \Omega / (H \cdot G) \quad (2.10)$$

де  $\Omega$  – ймовірність утворення мікротріщин, зумовлена розміром зерна абразиву [12].

H. Sin, N. Saka та N.P. Suh у своїх роботах вивчали знос поліметилметакрилату (PMMA) у режимі «палець-диск» із жорстко закріпленим карбідокремнієвим абразивом. Збільшення діаметру зерен від 10 до 100 мкм викликало підвищення коефіцієнта тертя на 20%, а далі значення стабілізувалося [13].

Дослідження [14] також свідчать про те, що кореляція між механічними властивостями матеріалів ( $\sigma$ ,  $\varepsilon$ ,  $H$ ) та зносостійкістю є об’єктивною лише в умовах короткочасного (однопрохідного) навантаження. При багатопрохідних випробуваннях ефект абразивного «забруднення» контртіла частинками зносу ускладнює точну оцінку.

Загалом, для оцінки зносостійкості полімерів і композитів на їх основі використовується низка емпіричних і напівемпіричних підходів. Їх

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

застосування повинно базуватись на конкретних умовах тертя, типі навантаження та характері зношеного контакту.

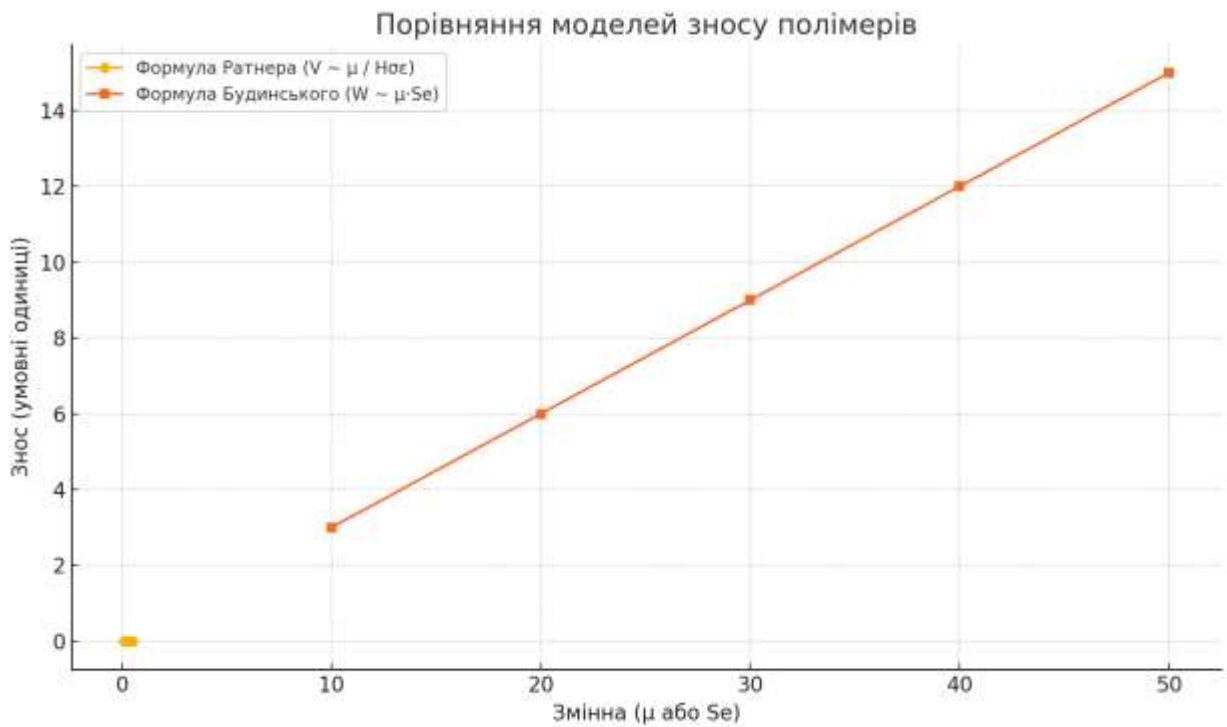


Рис. 11 – Порівняння моделей зносу полімерів: залежність зносу за формулою Ратнера від коефіцієнта тертя ( $\mu$ ); залежність зносу за формулою Будинського від площі деформації ( $Se$ )

### 3. Розкриття методів адитивної технології

#### 3.1. Лазерна фотополімеризація смол

##### Що таке стереолітографія (SLA)

Стереолітографія (SLA) – одна з найстаріших і найточніших технологій адитивного виробництва (3D-друку), яка заснована на лазерному отвердінні фотополімерної смоли. Вперше вона була запатентована Чаком Халлом у 1986 році [15].

Принцип роботи SLA-принтера:

Резервуар наповнений фотополімерною смолою.

Лазер сканує поперечний переріз моделі на поверхні смоли.

Фотополімер твердне під дією УФ-випромінювання лазера.

Платформа занурюється на один шар вниз.

Процес повторюється, поки модель не буде створена шар за шаром.

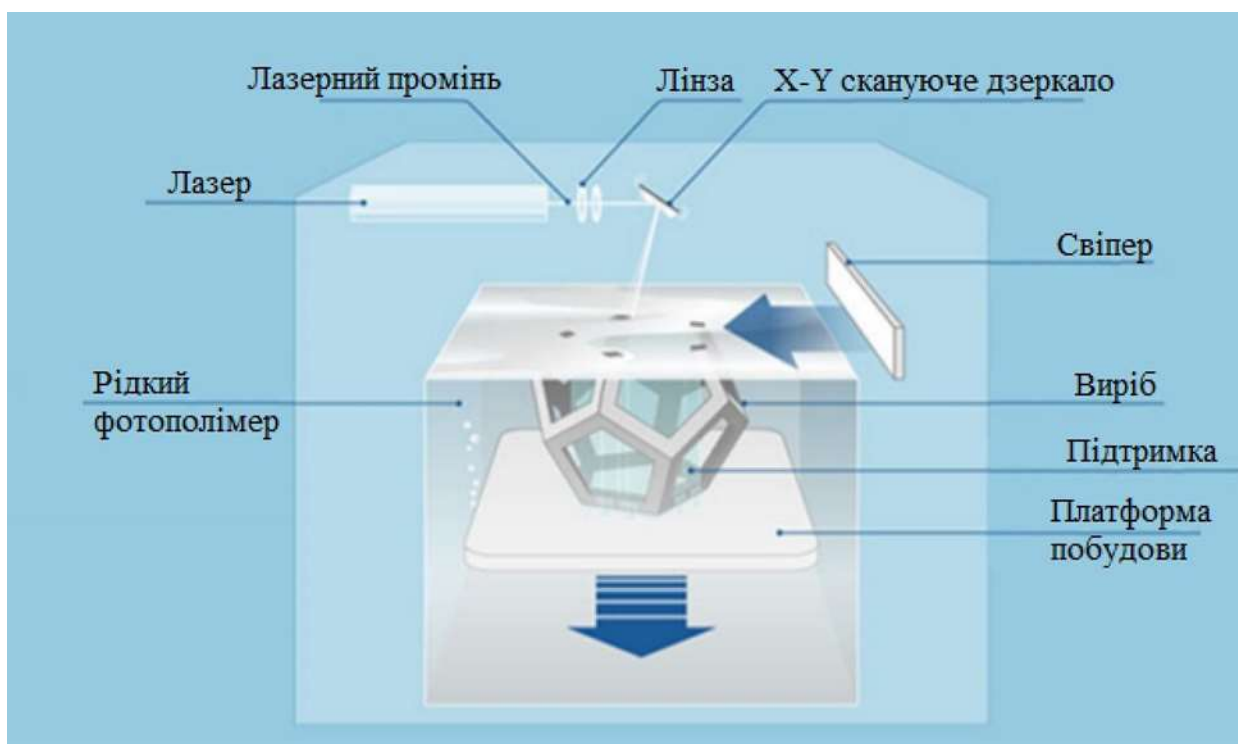


Рис. 12 – Схема SLA друку

Переваги SLA:

- Висока точність друку (до 25 мкм).

Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ

Арк.

38

- Гладка поверхня виробів без додаткової обробки.
- Можливість створення надскладної геометрії.

Підходить для інженерних прототипів, стоматології, ювелірної справи, мікрофлюїдних структур.

Недоліки:

- Висока вартість витратних матеріалів (смола).
- Потребує постобробки: промивання, УФ-досвічування.
- Обмежений спектр механічних властивостей готових виробів.

Процес SLA-друку ґрунтується на поетапному опроміненні рідкої фоточутливої смоли ультрафіолетовим лазером, який полімеризує лише вибрані ділянки відповідно до поперечного перерізу цифрової 3D-моделі. Ванна зі смолою містить платформу, яка поступово опускається на товщину одного шару (від 25 до 100 мкм) після кожного сканування. Лазер по черзі "малює" кожен новий шар, що поступово формується один над одним, створюючи тривимірну фізичну модель. Готовий виріб утворюється шляхом нашарування твердих структур у рідкому середовищі [16].

Після завершення друку модель підлягає постобробці. Її промивають у розчині ізопропілового спирту для видалення залишків незатверділої смоли, а потім піддають вторинному УФ-опроміненню з метою завершення полімеризації та досягнення максимальної міцності. При наявності допоміжних опорних структур вони видаляються механічним або хімічним шляхом. Ці операції суттєво впливають на геометричну точність і експлуатаційні властивості готового виробу.

Основними перевагами SLA-друку є виняткова точність (до 25 мкм), висока роздільна здатність та відмінна якість поверхні без помітної шаруватості. Це робить дану технологію незамінною в створенні функціональних прототипів, елементів для мікрофлюїдних систем, стоматологічних та ортопедичних зразків, форм для лиття. У транспортному секторі SLA використовується для виготовлення дослідних деталей, зокрема

					<b>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</b>	Арк.
						39
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

корпусів редукторів, кришок розподільних механізмів, шаблонів деталей трансмісій, в яких важлива точна відповідність геометрії [17].

Проте, у SLA існують і технологічні обмеження. Готові вироби мають обмежену термостійкість та дещо нижчу механічну міцність у порівнянні з термопластами, виготовленими методом FDM чи литтям під тиском. Окрім того, фотополімери мають схильність до деструкції під дією сонячного випромінювання, що обмежує їхнє використання у зовнішньому середовищі. Вартість витратних матеріалів (спеціалізованих смол) також є вищою, а процес обслуговування принтера потребує високої точності й належної кваліфікації персоналу.

Узагальнюючи, SLA-друк є ефективним методом створення високоточних моделей і функціональних зразків зі складною геометрією. Його застосування доцільне в умовах, де критично важливими є мікророзмірна точність, естетика та гладкість поверхні. Для машинобудування, зокрема у розробці та модифікації вузлів трансмісії автомобілів, SLA забезпечує ефективний інструмент інженерного аналізу, перевірки ергономіки, монтажу та функціональності складних конструкцій на етапі дослідного проєктування.

### 3.2. FDM – друк

Технологія FDM-друку у виготовленні функціональних полімерних деталей FDM (Fused Deposition Modeling), або моделювання методом наплавлення розплавленого матеріалу, є однією з найбільш поширених технологій адитивного виробництва. Вона широко використовується у машинобудуванні, включаючи сферу прототипування та виготовлення дрібносерійних конструктивних елементів трансмісій. Завдяки простоті, доступності обладнання та широкому спектру використовуваних полімерів, FDM-друк став стандартом у виробничих лабораторіях, університетах та малих інноваційних підприємствах [18].

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40



ізолюваними об'ємами та знімними вкладками, що особливо цінно при конструюванні експериментальних вузлів [20].

Разом з тим, FDM має певні обмеження. До них належать обмежена точність друку (100–300 мкм), помітна шаруватість поверхні, а також напрямна анізотропія механічних властивостей – деталь найміцніша вздовж напрямку нанесення нитки, і значно слабша перпендикулярно до нього. Окрім того, для забезпечення геометричної стабільності часто потрібне додавання опорних структур, які після друку видаляються механічним шляхом.

FDM-процеси часто вимагають постобробки: зняття підтримок, шліфування, термообробки або навіть просочення для підвищення міцності. Проте з точки зору практичного застосування, технологія залишається оптимальним вибором для проєктування, розробки і дрібносерійного виготовлення функціональних елементів – включаючи корпуси вузлів, захисні кожухи, компоненти механізмів перемикачів передач тощо. Такі полімерні компоненти можуть використовуватись як тимчасові або остаточні, залежно від експлуатаційних умов та матеріалу філамента.

FDM-підхід є стратегічним інструментом для адаптивного виробництва, коли необхідно швидко відреагувати на зміну конструкції чи вимог, забезпечити індивідуальне виготовлення без використання складних форм або металорізального інструменту. У сукупності з цифровими інженерними системами (CAD/CAE) це створює замкнутий цикл проєктування – виготовлення – перевірки функціональності, особливо ефективний у дослідницьких центрах і малосерійному виробництві автомобільних компонентів.

### 3.3. MJM (Multi-JetModeling) технологія

Технологія MJM-друку у виготовленні точних полімерних компонентів Multi-Jet Modeling (MJM), або багатоструменеве моделювання, є однією з

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

найточніших технологій адитивного виробництва, що застосовується для виготовлення прототипів, оснастки, елементів з високим рівнем деталізації, а також функціональних деталей, включаючи вузли автомобільних систем. MJM є різновидом струминного 3D-друку, при якому фотополімерна смола подається на платформу за допомогою великої кількості мікрофорсунок і одразу отверджується під дією ультрафіолетового випромінювання [21].

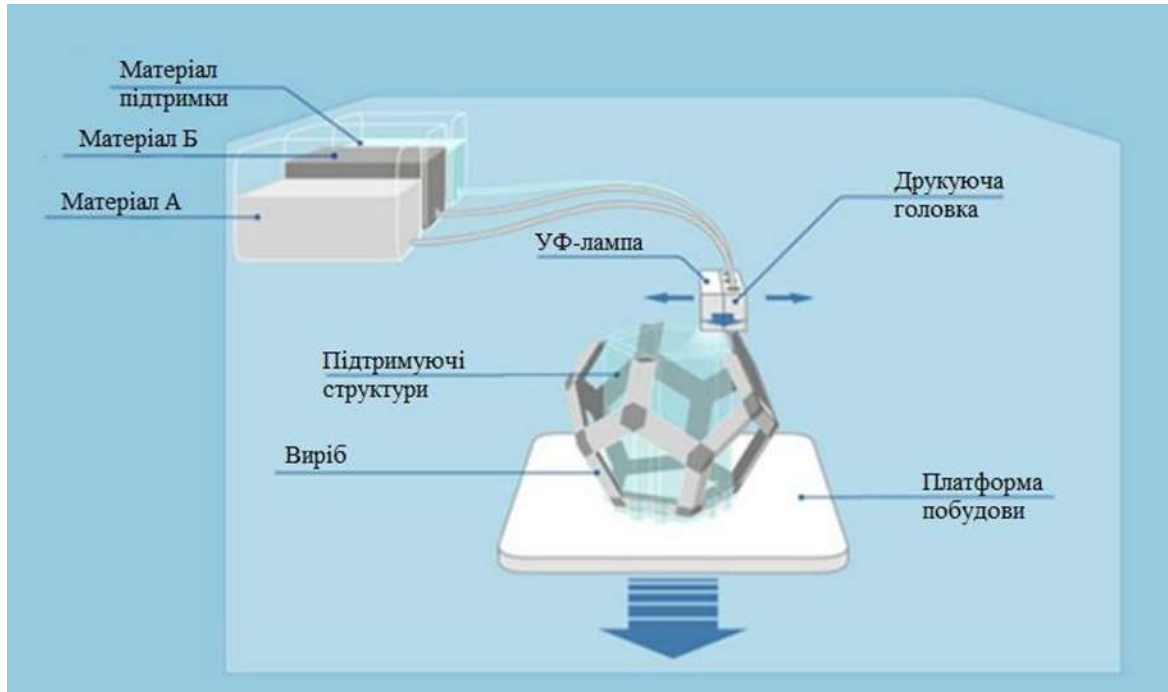


Рис. 14 – Схема MJM друку

Ця технологія характеризується винятково високою роздільною здатністю, яка може досягати 16...32 мікрон по висоті шару. Такий рівень дозволяє виготовляти деталі зі складною геометрією, мінімальними допусками, а також внутрішніми каналами без потреби у значному шліфуванні чи механічній обробці. MJM-друк дозволяє використовувати не лише основний конструкційний матеріал, а й допоміжні підтримуючі речовини (support material), які легко видаляються водою або хімічним розчинником після друку, не залишаючи слідів на поверхні деталі [22].

Основними полімерними матеріалами, що застосовуються у MJM, є фотополімери – акрилові смоли, модифіковані поліуретани та епоксидні композиції, які після затвердіння мають гарну стабільність розмірів, стійкість

						КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
							43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			

до стирання та помірну еластичність. Це робить MJM особливо ефективним у виготовленні деталей, де потрібна висока точність позиціонування, наприклад, при виготовленні елементів механізмів перемикачів передач або мікромеханіки у важкодоступних зонах трансмісійного простору.

На відміну від FDM, MJM дозволяє досягти майже ідеальної якості поверхні та не потребує постобробки за винятком видалення підтримок. Це робить MJM придатною для серійного виготовлення невеликих партій полімерних компонентів або прототипів, які проходять тестування без подальших змін. Також можлива обробка напівпрозорих матеріалів, що дозволяє створювати віконця, датчики, оглядові канали в корпусах вузлів.

Обмеженням MJM є відносна крихкість деяких полімерів, що можуть втрачати механічну міцність під впливом вологи чи температури. Крім того, самі принтери MJM є дорогими й потребують спеціального технічного обслуговування, тому технологія найчастіше використовується у професійному секторі – в лабораторіях автомобільного прототипування, аерокосмічної промисловості та медицини.

Попри ці обмеження, MJM залишається потужним інструментом для точного адитивного виготовлення, особливо тоді, коли необхідна деталізація, стабільність розмірів та швидкість виробництва без суттєвої ручної дообробки. Використання MJM у поєднанні з CAD/CAE-інструментами дозволяє проектувати та друкувати вузли зі складною кінематикою, включаючи шарнірні з'єднання або елементи з високою локалізацією механічних навантажень.

### 3.4. Селективне лазерне спікання

Технологія селективного лазерного спікання (SLS) у виробництві полімерних функціональних елементів SLS (Selective Laser Sintering) – це одна з найперспективніших адитивних технологій, яка дозволяє виготовляти високоточні деталі з термопластичних порошків шляхом пошарового

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

локального спікання лазерним променем. Метод відзначається високим рівнем функціональності виробів, які мають добру термостійкість, зносостійкість та стабільність геометрії. Технологія успішно застосовується у виготовленні конструкційних полімерних елементів, зокрема в автомобілебудуванні – у трансмісійних механізмах, редукторах, корпусах підшипників, напрямних муфт, прототипах зубчастих передач тощо.

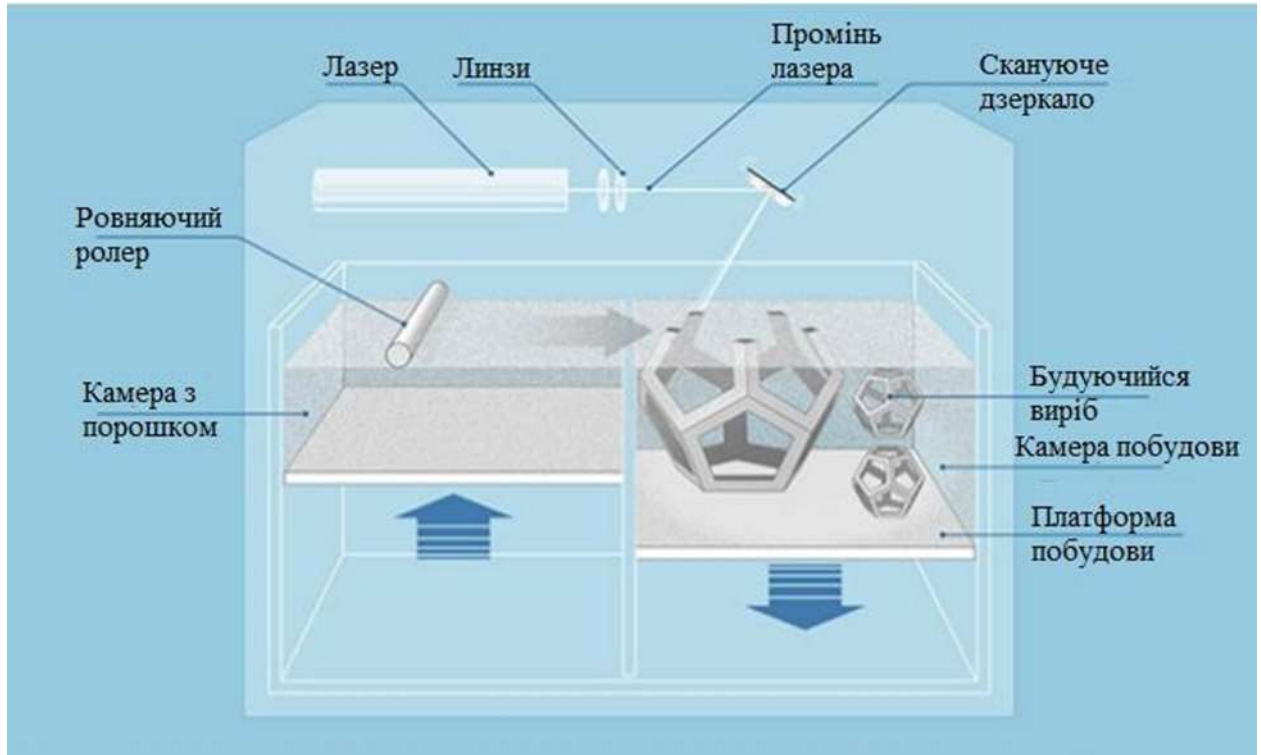


Рис. 15 – Схема SLS друку – селективного лазерного спікання

Принцип роботи SLS полягає у створенні тривимірної моделі на основі CAD-файлу, що розбивається на шари завтовшки від 60 до 150 мікрон. Кожен шар формується шляхом рівномірного нанесення порошку (наприклад, PA12, PA11, TPU, PEEK) на платформу будівництва, після чого відбувається локальне лазерне спікання частинок у зоні експозиції. Лазер, скеровуючись галво-системою, сканує поверхню згідно з цифровою моделлю. Після завершення одного шару, платформа опускається вниз, і наноситься новий шар порошку. Неопромінені зони залишаються вільними й виконують роль опори для деталей з нависаючими геометричними

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

елементами. Це дозволяє виготовляти вироби складної конфігурації без потреби у додаткових підтримках.

Однією з головних переваг методу є відсутність потреби у структурах підтримки та можливість багатокомпонентного друку – у одній камері можуть паралельно виготовлятися десятки або сотні деталей, що знижує собівартість одиниці виробу. Механічні характеристики надрукованих виробів близькі до традиційно литих пластмас, а у випадку армованих полімерів навіть перевищують їх за зносостійкістю.

Проте, SLS також має обмеження. Процес вимагає ретельного контролю температури як платформи, так і камери друку. Температурні градієнти можуть викликати залишкові напруження, деформацію або розшарування виробів, тому післядрукова термічна стабілізація є критичною. Деталі мають залишатися в камері до повного охолодження, що подовжує загальний цикл виробництва. Також, хоча значна частина непровареного порошку може бути повторно використана, він втрачає частину своїх властивостей, і рекомендоване повторне використання не перевищує 30–50% у суміші з новим матеріалом.

У контексті автомобілебудування, SLS-друк дозволяє створювати легкі, жорсткі, термостійкі конструктивні елементи трансмісійних систем, особливо в електромобілях і малосерійних моделях, де необхідна висока гнучкість у зміні конструкції та оптимізація за масою.

На сьогодні існує велика кількість технологій адитивного виробництва (рисунок 16), однак переважна більшість із них є модифікаціями або розвитком базових принципів, розглянутих у попередніх розділах. Порівнюючи основні методи тривимірного друку, можна дійти висновку, що технологія FDM (Fused Deposition Modeling) є найбільш збалансованим варіантом за критерієм «функціональність – економічна доступність». Серед основних переваг FDM – здатність працювати з широким набором термопластичних матеріалів та армованих полімерних волокон, а також

					<i>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46



для SLS. Завдяки цьому метод FDM отримує широке поширення в таких галузях, як швидке прототипування, автомобілебудування, аерокосмічна техніка та біомедичне проектування, де потрібне поєднання гнучкості, надійності та рентабельності виробництва.

### 3.5. Матеріали для 3D друку

Матеріали, які застосовуються в адитивному виробництві, відіграють визначальну роль у формуванні якості, міцності, функціональності та довговічності виробів, створених за допомогою 3D-друку. Різноманіття доступних полімерів, композитів і спеціалізованих сумішей зумовлене специфікою кожної з технологій друку, зокрема FDM, SLA, SLS, MJM та ін. Кожен із процесів має власні вимоги до фізико-хімічних характеристик матеріалу: текучість, температура плавлення або полімеризації, адгезія між шарами, стійкість до термічних і механічних навантажень.

Для FDM (Fused Deposition Modeling) найбільш поширеними матеріалами є:

- PLA (полілактид) – біорозкладний термопластик на основі рослинної сировини з низькою температурою плавлення (~180–220 °C). Має гарну деталізацію, простий у друці, але недостатньо термо- та зносостійкий.
- ABS (акрилонітрил-бутадієн-стирол) – міцніший і стійкіший до ударних навантажень матеріал, використовується для функціональних прототипів і виробів з підвищеними механічними вимогами. Вимагає підігріву платформи та має характерний запах при друці.
- PETG (глікольмодифікований поліетилентерефталат) – поєднує гнучкість, стійкість до вологи та хімікатів із простотою друку, застосовується в галузях, що потребують прозорих або хімічно інертних виробів.

Крім стандартних термопластів, у FDM-друці активно впроваджуються армовані композити – нитки з наповнювачами на основі вуглецевого

					<i>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		48

волокна, скловолокна, кевлару. Такі матеріали демонструють підвищену жорсткість і модуль пружності, дозволяючи використовувати їх у силових елементах.

У SLA-друку (стереолітографія) застосовуються рідкі фотополімерні смоли, які полімеризуються під дією ультрафіолетового лазера або світлодіодів. Смоли класифікуються на стандартні, інженерні (з підвищеною жорсткістю або термостійкістю), еластичні та біосумісні. Попри високу деталізацію, фотополімери мають обмежену міцність і схильні до крихкого руйнування при ударних навантаженнях.

Для SLS (селективне лазерне спікання) використовуються полімерні порошки, здебільшого:

- PA12 (поліамід-12) – універсальний, міцний, термостійкий матеріал, застосовується для функціональних компонентів у машинобудуванні та медицині.
- TPU (термопластичний поліуретан) – для виробів, що потребують гнучкості та еластичності.

Серед матеріалів для MJM (Multi Jet Modeling) – фотополімерні гелі та воскоподібні смоли, які наносяться у вигляді крапель і тверднуть під УФ-випромінюванням. Ці матеріали придатні для виготовлення ювелірних форм, стоматологічних моделей, мікродеталей із високою точністю.

Загалом матеріали для 3D-друку можна умовно класифікувати за такими категоріями:

- Термопласти (PLA, ABS, PETG, нейлон, PC, HIPS, ASA)
- Фотополімери (стандартні, інженерні, біосумісні, прозорі)
- Композити (армовані скловолокном, вуглеволокном)
- Порошки (нейлони, TPU, полістирол, поліефіри)
- Функціональні матеріали (електропровідні, самозатухаючі, антибактеріальні)

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

Кожен із цих матеріалів має власну сферу застосування залежно від технічного завдання, умов експлуатації та обраної технології друку. Вибір матеріалу суттєво впливає на надійність і довговічність виробу, а також на складність процесу виготовлення.

Таблиця 3.1. Термопласти

Матеріал	Температура плавлення, °C	Міцність на розрив, МПа	Твердість по Шору D	Особливості
PLA	180–220	50–70	83	Біорозкладний, легкий у друці
ABS	210–250	40–50	76	Міцний, але схильний до деформацій
PETG	220–250	45–55	85	Добра хімічна стійкість
Nylon (PA6)	240–260	60–80	80	Гнучкий, міцний, чутливий до вологи
PC	260–300	60–70	88	Термостійкий, жорсткий
HIPS	230–240	30–40	75	Добре розчиняється в лимонені
ASA	250–270	40–60	78	Стійкий до ультрафіолету

Таблиця 3.2. Фотополімери

Тип	Міцність на розрив, МПа	Модуль пружності, МПа	Особливості
Стандартний	30–40	1000–2000	Висока деталізація, низька міцність
Інженерний	60–80	2000–3000	Для функціональних деталей
Еластичний	5–10	10–50	Висока еластичність, м'який
Біосумісний	50–60	1500–2500	Придатний для медичних застосувань

Таблиця 3.3. Композити для FDM

Матеріал	Міцність на розрив, МПа	Модуль пружності, ГПа	Переваги
PLA+Carbon	70–90	6–8	Висока жорсткість, низька вага
Nylon+Glass	80–100	8–10	Термостійкість, зносостійкість
ABS+Kevlar	50–65	5–6	Міцність при ударах, довговічність

Таблиця 3.4. Порошки для SLS

Матеріал	Температура обробки, °C	Міцність на розрив, МПа	Особливості
PA12	170–190	45–55	Універсальний, гнучкий
TPU	200–220	30–40	Гнучкий, для еластичних виробів
PS (полістирол)	170–200	25–35	Недорогий, обмежене застосування
PEEK	340–380	90–100	Надвисока термо- і хімічна стійкість

Таблиця 3.5. Матеріали MJM

Матеріал	Твердість по Шору D	Призначення	Особливості
Фотополімерні гелі	30–70	Ювелірні вироби, прототипи	Висока деталізація, UV-затвердіння
Воскоподібні смоли	20–40	Стоматологія, ливарні форми	Легке видалення, точність до 16 мкм

### 3.6. Етапи організації 3D друку

Організація процесу тривимірного друку є складною багатоступеневою процедурою, яка охоплює як інженерні, так і технологічні аспекти проєктування, підготовки та виготовлення виробів. Ефективне впровадження адитивних технологій у виробничий процес вимагає чіткого розуміння послідовності етапів, особливостей кожного з них, а також вибору відповідного обладнання, матеріалів і програмного забезпечення.

#### 1. Формування технічного завдання (ТЗ).

Першим кроком є постановка задачі, яка охоплює функціональне призначення деталі, її експлуатаційні умови, вимоги до міцності, точності, стійкості до температури, хімічних впливів тощо. Технічне завдання має включати:

- Геометричні параметри виробу;
- Границі допусків і вимоги до якості поверхні;
- Тип навантаження та його характер (статичне, динамічне, ударне);
- Умови експлуатації: температура, вологість, УФ-випромінювання;
- Рекомендований матеріал і його сумісність з обраною технологією друку;
- Кількість виробів для одиничного або серійного виготовлення.

#### 2. Моделювання виробу в CAD-системах.

На цьому етапі проєктується віртуальна 3D-модель виробу за допомогою комп'ютерного моделювання (CAD – Computer-Aided Design). До найбільш популярних програмних середовищ належать:

					<b>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</b>	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

«SolidWorks», «Fusion 360», «Autodesk Inventor», «Creo», «TinkerCAD» – для механіко-конструктивних деталей;

«ZBrush», «Blender», «Rhino 3D» – для художніх і біомедичних моделей.

Модель має бути топологічно коректною (без отворів, накладень поверхонь і зайвих граней). На цьому етапі також можливо застосування оптимізації структури деталі, наприклад, **\*\*топологічної оптимізації\*\***, яка дозволяє зменшити масу виробу без втрати жорсткості, що особливо актуально для авіації та автопрому.

### 3. Експорт моделі у формат, придатний до 3D-друку.

Після створення 3D-моделі вона експортується у відповідний формат для подальшої обробки в слайсері:

- «STL (Standard Tessellation Language)» – найпоширеніший формат, що описує поверхню моделі через трикутники;
- «OBJ», «3MF», «AMF» – альтернативні формати, що можуть містити додаткову інформацію (кольори, текстури, структуру).

Важливо перевірити модель на помилки за допомогою таких утиліт, як «Netfabb», «Meshmixer», «Microsoft 3D Builder».

### 4. Обробка в слайсер-програмі.

Слайсер (slicer) – це програмне забезпечення, яке перетворює 3D-модель на інструкції для 3D-принтера. Програма ділить модель на шари та формує «G-коди», що містять команди для переміщення екструдера, зміни температури, швидкості подачі тощо.

Під час слайсингу задаються критичні параметри:

- Товщина шару;
- Заповнення (інфіл), його тип і відсоток;
- Швидкість і температура друку;
- Підтримуючі структури (supports);

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		52

- Адгезія до платформи (raft, brim, skirt);
- Параметри охолодження та ретракції.

Популярні слайсери: «Ultimaker Cura», «PrusaSlicer», «Simplify3D», «Lycsee Slicer» (для SLA/MJM).

#### 5. Підготовка принтера та завантаження матеріалу

Перед запуском друку потрібно виконати низку підготовчих операцій:

- «Калібрування платформи» (bed leveling);
- «Очистка сопла» та перевірка подачі філаменту (для FDM);
- «Підготовка ванни з фотополімером» (для SLA, DLP);
- «Розігрів робочих вузлів» до необхідної температури;
- Завантаження G-коду на SD-карту або передача по мережі.

Паралельно перевіряється стан витратних матеріалів, а саме: вологість філаменту, термін придатності смол, ступінь зношення фотонних екранів тощо.

#### 6. Процес друку

Цей етап відбувається в автоматичному або напівавтоматичному режимі. Оператор лише контролює:

- Відсутність відшарування або деформацій;
- Стабільну подачу матеріалу;
- Відсутність збоїв у русі екструдера або платформи;
- Температурні показники та вентиляцію.

У випадку FDM-друку тривалість залежить від розміру виробу, висоти шару, швидкості друку. Для SLA або MJM значний вплив має площа шару, а не його висота.

#### 7. Постобробка та фінішна обробка

Після завершення друку отриманий виріб часто потребує додаткової обробки:

- «Для FDM»: зняття підтримок, зачистка, шліфування, термообробка, фарбування;

					<i>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</i>	Арк.
						53
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- «Для SLA/DLP»: промивка в ізопропанолі, полімеризація в UV-камері, шліфування;
- «Для SLS»: видалення надлишку порошку, іноді – спікання або фарбування.

Якість постобробки значно впливає на зовнішній вигляд, міцність і довговічність виробу.



Рис. 17 – Етапи організації 3D-друку

## 8. Контроль якості та верифікація

Фінальним етапом є контроль параметрів виробу:

- Геометрична точність (штангенциркулем, 3D-сканером);
- Фізико-механічні випробування;
- Перевірка на відсутність внутрішніх дефектів (для критичних деталей);
- Сертифікація (для медичних або авіаційних компонентів).

У разі невідповідності специфікаціям проводиться аналіз дефектів і корекція параметрів друку.

					<b>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		54

#### 4. Економічний розділ

Метою проєкту є впровадження технології 3D-друку для виготовлення полімерних втулок, що застосовуються у механізмах перемикання передач легкових автомобілів категорії М1. Основна ідея полягає в забезпеченні зниження ваги деталей за рахунок використання легких конструкційних полімерів та покращення зносостійких характеристик завдяки оптимізації геометрії та вибору сучасного матеріалу. У сучасному виробництві та на ринку полімерних компонентів для трансмісійних систем представлений широкий спектр виробів, виготовлених із різноманітних термопластичних матеріалів.

Аналіз ринку показує, що втулки для трансмісійних вузлів найчастіше виготовляють із фторопластів, зокрема методом лиття під тиском або холодного пресування з подальшою механічною обробкою. При цьому продаж окремих втулок зустрічається нечасто – зазвичай пропонуються повноцінні ремонтні комплекти, які містять усі елементи вузла у зборі. Це створює економічну неефективність у разі потреби заміни лише одного зношеного компонента.

З огляду на це, виникає доцільність розробки альтернативного рішення – можливості виготовлення окремої втулки за допомогою адитивних технологій, з урахуванням її експлуатаційного ресурсу, навантажень та точності. Використання 3D-друку дає змогу не лише знизити вартість виготовлення одиначної деталі, а й забезпечити її швидке відновлення або модифікацію під конкретні умови застосування, що є актуальним для індивідуального ремонту та малосерійного виробництва.

Для запуску процесу виготовлення полімерних втулок необхідно сформулювати повний перелік обладнання та матеріалів, що забезпечують реалізацію технологічного циклу. На початковому етапі проєкту передбачається часткова механізація виробництва, яка охоплює лише

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

операції 3D-друку, тоді як решта процесів – включно з підготовкою матеріалу, видаленням підтримок, очищенням та фінішною обробкою деталей – виконуватимуться вручну із залученням технічного персоналу.

Таким чином, організація виробництва включає два основні блоки: автоматизовану ділянку для адитивного формування виробів і ручну ділянку для допоміжних операцій. Для виконання друку необхідним є наявність самого 3D-принтера, який відповідає вимогам до розміру друку, типу філаменту, точності позиціонування та температурного режиму. Залежно від складності геометрії втулок, бажаним є використання принтера з функцією подвійної екструзії або можливістю друку з розчинними підтримками.

Щодо ручного інструменту, то більшість базових пристроїв, таких як щипці, шпатель, ножі для зняття підтримок, шліфувальні елементи та інші допоміжні засоби, входять до стандартної комплектації більшості настільних FDM-принтерів. При потребі можуть бути залучені додаткові інструменти для точнішої обробки або полірування поверхонь. Повний перелік необхідного обладнання та матеріалів подано в таблиці 4.1, що дозволяє структурувати процес організації виробництва відповідно до вимог безперервності, ефективності та якості кінцевого виробу.

Таблиця 4.1. Інструменти, що необхідні для 3D-друку

Інструменти	Призначення	Ціна
SD-Карта	Моделі друкують з карти	Комплект 3D принтера
Картридер	Перехідник на USB	Комплект 3D принтера
Клей для столу друку, 100 мл	Намашують стіл для адгезії з полімером	500 грн
Шпатель	Сприяє швидкому усунуванню моделі зі столу	Комплект 3D принтера
Бокорізи	Для усунення підтримок моделі	Комплект 3D принтера
Набір губок, 5 шт.	Застосовується з водою для зняття клею	105 грн

За умови використання одного 3D-принтера для серійного виготовлення полімерних втулок, можливо здійснити орієнтовну оцінку продуктивності обладнання. Виходячи з умов експлуатації, припускається, що операція заміни заготовки, очищення платформи та підготовки до наступного циклу друку триває не більше ніж 5 хвилин. Решту часу протягом години приймаємо за ефективний час безперервного друку.

Відомо, що один цикл друку однієї втулки триває 20 хвилин, а маса готової деталі становить 3 грами. Таким чином, протягом години, з урахуванням регламентної зупинки на заміну, реально можливо здійснити друк двох повноцінних виробів ( $2 \times 20 \text{ хв} = 40 \text{ хв}$  друку та  $2 \times 5 \text{ хв} = 10 \text{ хв}$  обслуговування, залишаючи 10 хвилин резерву).

Отже, продуктивність друку за одну годину становить:

- Кількість втулок: 2 шт/год
- Сумарна маса деталей: 6 грамів/год

Ці розрахунки дозволяють обґрунтувати очікувану ефективність друкарської дільниці за умови використання одного принтера в ручному режимі обслуговування та закласти відповідні параметри до техніко-економічного обґрунтування. У разі автоматизації операцій з підготовки платформи або застосування декількох принтерів, загальний випуск деталей можна буде пропорційно збільшити

$$V_{\text{др}} = m / t, \quad (4.1)$$

$$V_{\text{др}} = 3 / 20 = 0,15 \text{ г/хв} = 9 \text{ г/год.}, \quad (4.2)$$

де  $m$  – вага виробу, г;

$t$  – час виробництва одного виробу, хв.

Застосування одноразового друку лише однієї деталі є малоефективним з точки зору раціонального використання робочої площини платформи 3D-принтера. Оскільки стандартна область побудови сучасних моделей починається від  $200 \times 200$  мм, виникає технічна можливість одночасного

					<i>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</i>	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

виготовлення 20–25 втулок за один цикл друку, залежно від габаритів кожної деталі та способу їх розміщення на столі. Такий підхід дозволяє значно підвищити продуктивність процесу, скоротити витрати часу та зменшити простої обладнання між циклами.

$$t = n \cdot m / V_{\text{др}} + 1, \quad (4.3)$$

$$t_{20} = 20 \cdot 3 / 9 + 8 = 6,83 \text{ год}, \quad (4.4)$$

де  $n$  – кількість виробів,  $n = 20$  шт.;

$l$  – час на перехід від деталі до деталі,  $l = 8$  хв.

Час, необхідний для виготовлення партії з 20 втулок, з урахуванням основного циклу друку, а також додаткових операцій з вилучення готових виробів зі столу принтера та виконання постобробки, становить орієнтовно 7,5 годин.

Таблиця 4.2. Характеристика потенційних клієнтів стартап–проєкту

Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
Заміна зношених втулок куліси коробки передач	Водії легковиків Ремонтні майстерні	Низька ціна Можливість купівлі великої кількості товару	– до продукції: надійність, довговічність, безпека – до компанії постачальника: гарантійний термін на строк служби

З урахуванням ключових параметрів запропонованої проєктної ідеї та актуальних вимог споживачів до продукції, було сформовано перелік чинників, що впливають на її конкурентоспроможність. На основі цього виконано аналіз переваг і недоліків проєкту, результати якого наведено в таблиці 4.3

Таблиця 4.3. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з проектом						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Надійність				X				
2	Безпека					X			
3	Ціна		X						
4	Маса деталі					X			
5	Серійне виробництво							X	

Завершальним етапом маркетингового аналізу перспектив впровадження проекту стало формування SWOT-аналізу, що відображає оцінку методу підвищення зносостійкості за чотирма ключовими категоріями: сильні сторони (Strengths), слабкі сторони (Weaknesses), можливості (Opportunities) та загрози (Threats). Відповідна аналітична матриця наведена у таблиці 4.4, складена на основі виявлених ринкових тенденцій, потенційних ризиків і характеристик проектного підходу.

Таблиця 4.4. SWOT-аналіз стартап-проекту

<p><b>Сильні сторони:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– менша собівартість матеріалу;</li> <li>– покращені умови безпеки ;</li> <li>– можливість змінювати форму і характеристики;</li> <li>– друк інших полімерних запчастин;</li> <li>– швидка заміна матеріалу навіть у процесі друку.</li> </ul>	<p><b>Слабкі сторони:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– низька автономність процесу;</li> <li>– необхідність сушки матеріалу.</li> </ul>
<p><b>Можливості:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– впровадження в інші вузли з наявністю полімерних деталей;</li> <li>– відсутність необхідності придбання додаткового обладнання або додаткового навчання робітників – можливість подальшого розвитку як способів зміни матеріалу так і налаштування самого друку.</li> </ul>	<p><b>Загрози:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– підприємства України дуже неохоче йдуть навіть на малі зміни в технічних процесах;</li> <li>– висока конкуренція серед інших виготовлювачів;</li> <li>– відсутність регламенту і патенту на даний спосіб виготовлення.</li> </ul>

Наявність вказаних переваг у запропонованому методі 3D-друку дає підстави стверджувати, що виготовлення втулок із підвищеною зносостійкістю є конкурентоспроможним рішенням. Водночас, для підвищення продуктивності та скорочення часу виготовлення деталей доцільно залучити більш спеціалізоване обладнання, а також забезпечити роботу принаймні 2–3 принтерів, що сприятиме розширенню обсягів виробництва та підвищенню рівня автоматизації процесу.

Запропонований метод виробництва є економічно доцільним на етапі дрібносерійного або індивідуального виготовлення деталей. Використання FDM-друку дозволяє суттєво зменшити собівартість одиниці продукції за рахунок доступної сировини (полімерної нитки) та відсутності необхідності у дорогому металообробному обладнанні. Первинні інвестиції у 3D-принтер та базовий набір інструментів не перевищують обґрунтованого рівня витрат для малого виробництва. Простота обслуговування, гнучкість налаштувань і автоматизація процесу друку створюють сприятливі умови для оптимізації виробничого циклу.

Проведений SWOT-аналіз показав, що серед сильних сторін проєкту є зниження витрат на виробництво та можливість швидкого запуску в експлуатацію, однак слабкі сторони включають обмежену продуктивність при використанні одного принтера. Розрахунки показали, що для забезпечення стабільного виробництва необхідно масштабувати виробничу базу – наприклад, шляхом використання кількох принтерів або спеціалізованих моделей із розширеною площею друку.

Таким чином, реалізація проєкту є обґрунтованою за умови раціонального планування ресурсів і подальшого нарощування виробничих потужностей. У перспективі така ініціатива здатна забезпечити стабільний прибуток і бути конкурентоспроможною на ринку ремонтних елементів трансмісійних механізмів.

					<i>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

## 5. Охорона праці та техніка безпеки

Охорона праці є невід'ємною частиною виробничого процесу та передбачає створення безпечних умов праці для всіх учасників виробництва. В межах реалізації проєкту з виготовлення полімерних втулок методом 3D-друку особливу увагу слід приділити питанням безпечного користування обладнанням, контролю шкідливих факторів, дотримання санітарно-гігієнічних норм, а також забезпеченню пожежної безпеки.

Усі працівники повинні проходити вступний та первинний інструктаж з охорони праці, а також періодичне навчання з техніки безпеки та пожежної безпеки згідно з чинними нормативно-правовими актами України: Законом України «Про охорону праці», ДСТУ EN ISO 12100:2014 «Безпечність машин» та іншими регламентами.

Під час роботи з 3D-принтерами (зокрема технології FDM), а також виконання операцій з підготовки та обробки деталей, можуть виникати наступні шкідливі та небезпечні фактори. Підвищена температура екструдерів (нагрівачів) – досягає 200–250 °С, що створює ризик термічних опіків. Випари пластиків (ABS, PLA, PETG, Nylon тощо) – містять леткі органічні сполуки, які при недостатній вентиляції негативно впливають на дихальну систему. Рухомі елементи механізму – можливе защемлення пальців рук при обслуговуванні. Шумове навантаження – при роботі кількох пристроїв рівень шуму може сягати 60–70 дБ. Ультрафіолетове випромінювання – у разі використання SLA-принтерів або полімеризаційних камер. Мікромеханічні операції з обробки деталей (обрізання підтримок, шліфування тощо) – створюють ризик механічних поранень, а також утворення пилу.

Для мінімізації вищенаведених ризиків передбачаються наступні організаційні та технічні заходи. Робоче місце повинно бути оснащено системою вентиляції та фільтрації повітря, особливо при друці ABS або

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

інших технічних пластиків. Принтери встановлюються у провітрюваному приміщенні, ізольованому від офісної частини. Бажано використовувати принтери з герметичним корпусом і вугільними фільтрами. Заборонено торкатися гарячих елементів (сопло, платформа) без термостійких рукавичок. Всі механічні операції (обрізка підтримок, шліфування) виконуються в рукавичках, захисних окулярах та при потребі – з використанням респіратора (FFP2). Інструменти для постобробки повинні бути надійно закріплені, зберігатися в окремому ящику і регулярно перевірятися на справність. Для захисту від електричного струму уся апаратура має бути заземлена. Не допускається підключення принтера через саморобні подовжувачі або перехідники.

Оскільки робота з 3D-принтерами передбачає нагрівання матеріалів та використання електричних пристроїв тривалого режиму роботи, питання пожежної безпеки є критичним. Приміщення повинне бути обладнане порошковим або вуглекислотним вогнегасником (не менше 2 л) типу ВС або АВС. Заборонено залишати працюючі принтери без нагляду, особливо у разі використання пластикових корпусів, що схильні до загоряння. Не допускається зберігання легкозаймистих рідин чи матеріалів поблизу друкарського обладнання. Резервне аварійне відключення подається до кожної лінії живлення пристроїв через автоматичні вимикачі.

Умови праці повинні відповідати вимогам ДБН В.2.2-27:2010 та ДСанПіН 3.3.6.042–99. Температура в робочому приміщенні – в межах 18–24 °С. Вологість – не вище 70%, щоб уникнути деформації полімерів. Освітленість – не менше 300 лк, бажано з локальним підсвічуванням зони обслуговування. Площа на одне робоче місце – не менше 4 м<sup>2</sup>, з достатнім простором для переміщення.

Після завершення друку або обробки деталей необхідно мити руки з милом. Пластикові відходи та залишки друку підлягають утилізації відповідно до норм з екологічної безпеки (бажано передати на переробку).

					<b>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</b>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

Працівникам рекомендується проходити профілактичний огляд не рідше одного разу на рік.

#### Висновок до розділу

Реалізація проєкту з виготовлення полімерних втулок засобами адитивного виробництва вимагає обов'язкового дотримання заходів охорони праці. Впровадження відповідних інженерно-організаційних рішень дозволить мінімізувати ризики впливу небезпечних факторів та забезпечити безпечні умови праці персоналу. Враховуючи доступність сучасного обладнання та існуючі нормативні документи, створення безпечного середовища є цілком досяжною метою.

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
						63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВОК

У рамках випускної кваліфікаційної роботи бакалавра була розглянута можливість технологічного виготовлення конструкційних елементів трансмісійних механізмів автомобілів з неметалевих матеріалів.

Кваліфікаційна робота бакалавра (КРБ) складається із п'яти розділів.

У вступі була обґрунтована доцільність зростання використання неметалевих матеріалів при виготовленні конструкційних елементів авто.

В першому розділі доведено, що застосування неметалевих матеріалів у трансмісійних механізмах переважно у вузлах із помірними навантаженнями, де критичними є маса, шум або корозійна стійкість є сучасним трендом.

У другому розділі присвяченому адитивному виробництву полімерних елементів обґрунтований вибір методу й обладнання для 3D-друку, дана характеристика неметалевих матеріалів, що використовуються в цій технології.

Третій розділ присвячений вибору оптимальній технології за якою можна проводити виробництво елементів трансмісійних механізмів автомобілів з неметалевих матеріалів, розроблені її етапи.

У економічному й розділі охорони праці та техніки безпеки надані рекомендації з впровадження стартап-проєкту що базується на цій технології 3D-друку, а також запропоновані заходи безпеки при проведенні таких робіт.

Випускна кваліфікаційна робота складається з 67 сторінок, і містить у собі 17 ілюстрації, 23 джерела, 10 таблиць, 1 додаток.

Ключові слова: АДТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, 3D-ДРУК, 3D-ПРИНТЕР, НЕМЕТАЛЕВІ МАТЕРІАЛИ, СТАРТАП-ПРОЕКТ.

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

## СПИСОК ВИКОРИСТОВУВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Бодрова Л.Г., Крамар Г.М., Ковальчук Я.О., Коваль І.В. Технологія конструкційних матеріалів та матеріалознавство: Навчальний посібник. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. – 157 с.
2. Назаренко А.В., Чернявський В.І. Полімерні композиційні матеріали в машинобудуванні: навчальний посібник. – Краматорськ: ДДМА, 2021. – 132 с.
3. Осадчий А.І., Довгалюк А.В. Інженерні матеріали та технології виготовлення деталей машин: Навчальний посібник. – Київ: НАУ, 2020. – 244 с.
4. Ільчишин І.Р., Романюк О.С. Триботехніка полімерних матеріалів: сучасні дослідження та застосування. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2021. – 190 с.
5. Васильєв С.В., Калюжний С.О. Адитивні технології в автомобілебудуванні: теорія та практика. – Суми: СумДУ, 2022. – 164 с.
6. Коваленко В.М. Механіка матеріалів і конструкцій на основі полімерів. – Дніпро: НМетАУ, 2023. – 208 с.
7. Sarkar A.D. Friction and Wear. – London: Academic Press, 2021. – 328 с.
8. Chang L., Zhang Z., Breidt C., Friedrich K. Tribological properties of polymer matrix composites. – Wear Journal, Elsevier, 2020. – Vol. 258, Issues 1–4.
9. Friedrich, K., Schlarb, A.K. Tribology of Polymeric Nanocomposites. 2nd Edition. Elsevier, 2011. – 556 p.
10. Budinski, K.G. Surface Engineering for Wear Resistance. 2nd Edition. CRC Press, 2021. – 288 p.
11. Czichos, H., Habig, K.-H. Tribology: A Systems Approach to the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear. Elsevier, 2020. – 400 p.
12. Friedrich, K., Karger-Kocsis, J. Wear of Polymers and Composites. Advanced Structured Materials, Springer, 2020. – 354 p.
13. Sin, H., Saka, N., Suh, N.P. Abrasive wear mechanisms and the grit size effect. Wear, Vol. 55, Issues 1–3, 1979, pp. 163–190.

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

14. Jeyakumar, A., Hashim, J., Daud, N., Gupta, M. Wear behaviour of polymer composites: a review. *Polymer Composites*, 2022. DOI: 10.1002/pc.26689

15. Tumbleston, J.R., Shirvanyants, D., Ermoshkin, N., Januszewicz, R., Johnson, A.R. et al. Continuous Liquid Interface Production of 3D Objects. *Science*, 2020, 347(6228), pp. 1349–1352.

16. Narayanan, L.K., Huebner, P., Fisher, M.B. et al. 3D bioprinting of polylactic acid (PLA) scaffolds using stereolithography (SLA): Optimization and mechanical properties. *Materials Science and Engineering: C*, 2021, 119, 111646.

17. Kumar, S., Kumar, V., Kim, H.-Y. Recent progress in 3D printing of polymer composites: A review. *Composites Part B: Engineering*, 2021, 226, 109353.

18. Chia, H.N., Wu, B.M. Recent advances in 3D printing of biomaterials using FDM. *Journal of Biological Engineering*, 2015, 9:4.

19. Shanmugam, V., Babu, S., Rajkumar, K., Ravichandran, M. A review on recent advances in FDM materials and applications. *Materials Today: Proceedings*, 2022, 66(4), pp. 1091–1099.

20. Ngo, T.D., Kashani, A., Imbalzano, G., Nguyen, K.T.Q., Hui, D. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*, 2018, 143, pp. 172–196.

21. Tumbleston, J.R., Shirvanyants, D., Ermoshkin, N. et al. Continuous liquid interface production of 3D objects. *Science*, 2015, 347(6228), pp. 1349–1352. <https://doi.org/10.1126/science.aaa2397>

22. Galantucci, L.M., Lavecchia, F., Percoco, G. Experimental study aiming to enhance the surface finish of fused deposition modeled parts. *CIRP Annals*, 2009, 58(1), pp. 189–192. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2009.03.059>

23. Hopkinson, N., Hague, R.J.M., Dickens, P.M. *Rapid Manufacturing: An Industrial Revolution for the Digital Age*. Wiley, 2020. – 288 p. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118354036>

					<i>КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ</i>	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

ДОДАТКИ

					КРБМТВА 2521156. 000 ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67