

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
(повна назва)

АТЕСТАЦІЙНА РОБОТА

Пояснювальна записка

другий (магістерський)

(рівень вищої освіти)

Технологічне забезпечення раціонального автоматизованого проектування
зубчатих коліс з композиційних матеріалів

(тема)

Виконав: студент 2 курсу, гр. КІТПВм-19-1
Кривуля О. М.
(прізвище, ініціали)

Спеціальність 151 Автоматизація
та комп'ютерно-інтегровані технології
освітньої програми Комп'ютерно-інтегровані
технологічні процеси та виробництво
(код і повна назва напрямку)

Тип програми освітньо-професійна
(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Боцман І. В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І. Ш.

(прізвище, ініціали)

2020 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет	Автоматики і комп'ютеризованих технологій
Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та мехатроніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси та виробництво

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«_____» _____ 2020 р.

ЗАВДАННЯ НА АТЕСТАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Кривулі Ользі Михайлівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Технологічне забезпечення раціонального автоматизованого проектування зубчатих коліс з композиційних матеріалів

затверджена наказом по університету від _____ 02.11. 2020 р. № _____ Ст _____

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії _____ 14.12.2020 р.

3. Вихідні дані до роботи _____

3.1 Виконати моделювання розподілу напружень у композиційних матеріалах зубчатих колесах.

3.2 Фактор Льюїса – 0,134 мм; ширина грані зуба – 54 мм;

3.3 Дослідити матеріали: поліамід і вуглець;

3.4 Середовища моделювання: ANSYS 14.5, SOLIDWORKS.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі

4.1 Вступ.

4.2 Аналіз предметної області.

4.3 Теоретичний аналіз та розрахунки зубчатих коліс.

4.4 Моедлювання зубчатої передачі

4.5 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint (*.ppt) – 14с. формату А4

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Керівник (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Отримання завдання	02.11.2020 р.	виконано
2	Аналіз завдання	04.11.2020 р.	виконано
3	Огляд літератури за темою роботи	11.11.2020 р.	виконано
4	Аналіз конструктивних особливостей зубчатих коліс і виконання розрахунків	17.11.2020 р.	виконано
5	Виконання моделювання розподілу напруження на композиційні матеріали	25.11.2020 р.	виконано
6	Оформлення атестаційної роботи	03.12.2020 р.	виконано
7	Подання на підпис керівнику	07.12.2020 р.	виконано
8	Подання роботи на рецензію	10.12.2020 р.	виконано
9	Подання роботи в ЕК	12.12.2020 р.	виконано

Дата видачі завдання

Студент

(підпис)

Керівник роботи

(підпис)

Кривуля О. М.

(прізвище, ініціали)

доц. Боцман І. В.

(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 72 с., 3 табл., 31 рис., 1 дод., 55 джерел.

ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ, АВТОМАТИЗОВАНЕ ПРОЕКТУВАННЯ, ЗУБЧАТІ КОЛЕСА, КОМПОЗИЦІЙНІ МАТЕРІАЛИ.

Об'єкт дослідження – процеси автоматизованого проектування зубчатих коліс з композиційних матеріалів.

Предмет дослідження – зубчаті колеса з композитних матеріалів.

Метою магістерської атестаційної роботи є дослідження шляхів раціонального автоматизованого проектування зубчатих коліс з композиційних матеріалів для подальшого технологічного забезпечення їх міцності.

Методи досліджень: аналітичний і розрахунковий метод, статичний аналіз, комп'ютерне моделювання.

У роботі проаналізовано особливості виготовлення композиційних матеріалів в автоматизованому виробництві, а також технологічне забезпечення зубчатих коліс. Проведено дослідження розподілу напруження та зменшення ваги циліндричної шестерні для композиційних матеріалів. Наведені проектні розрахунки та технічні умови циліндричного зубчатого колеса. Виконано моделювання твердих тіл і статичний аналіз зубчатого колеса.

Результати магістерської атестаційної роботи опубліковано у збірнику студентських наукових статей ADED-2020.

ABSTRACT

Explanatory note: 72 p., 3 tables, 31 figures, 1 app., 55 sources.

TECHNOLOGICAL SUPPORT, AUTOMATED DESIGN, THE GEARS, COMPOSITE MATERIALS

The object of research are processes automated design of gears made of composite materials.

The subject of research is gears made of composites.

The purpose of the master's certification work is to study the ways of rational automated design of gears made from composite materials for further technological support of their strength.

Research methods are analytical and calculation method, static analysis, computer modeling.

The peculiarities of manufacturing composite materials and their influence in automated production were considered in the work. The technological support of gears is described in detail. A study of stress distribution and weight reduction of a cylindrical gear for composite materials was carried out. Design calculations and technical conditions of a cylindrical gear wheel are given. Solid state modeling and static gear analysis were performed.

The results of the master's attestation work were published in the collection of student scientific articles ADED-2020.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень	8
Вступ	9
1 Аналіз предметної області.....	11
1.1 Сучасні тенденції виготовлення та застосування композиційних матеріалів у промисловості	11
1.2 Полімерні композиційні матеріали, їх виготовлення й особливості механічної обробки.....	13
1.3 Виготовлення композиційних матеріалів з відкритим контактом.....	18
1.4 Автоматизоване виготовлення композиційних матеріалів.....	20
1.5 Висновки до першого розділу.....	26
2 Аналіз конструкції та дослідження напруження зубчастих колес з композиційних матеріалів в автоматизованому виробництві.....	28
2.1 Зубчаті колеса з композиційних матеріалів, їх виготовлення та застосування у промисловості.....	28
2.2 Параметри зубчастих колес з композиційних матеріалів в автоматизованому виробництві	29
2.3 Аналіз конструкції циліндричної зубчатої передачі.....	32
2.4 Проектні розрахунки та технічні умови циліндричного зубчатого колеса.....	35
2.5 Висновки до другого розділу.....	49
3 Моделювання циліндричної зубчатої передачі.....	50
3.1 Проектування зубчастих колес з композиційних матеріалів в автоматизованому виробництві.....	50
3.2 Аналіз напружено – деформованого стану конструкції	52
3.3 Ідентифікація математичних моделей	56
3.4 Висновки до третього розділу.....	59

4 Охорона праці.....	60
Висновки.....	62
Перелік джерел посилання.....	64
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	70

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЕ – армуючі елементи;

ККД – коефіцієнт корисної дії;

КМ – композиційні матеріали;

ПКМ – полімерні композиційні матеріали;

РП – реактопласти;

ТЕП – термоеластоласти;

ТКМ – технологія композиційних матеріалів;

ТП – термопласти.

ВСТУП

Поява нових композиційних матеріалів дає поштовх до підвищення їх точності, несучої здатності зубчастих передач і зниження маси. Зубчасті колеса є основним елементом зубчастої передачі. Зубчасті передачі та механізми досить поширені в машинобудуванні. Аналіз літератури виявив тільки окремі дослідження в цій області, присвячені стабілізації розмірів зубчастих колес в результаті додавання в пластичні маси волокон склопластику при цьому знижується деформація після видалення з форми. Велика увага в процесі виготовлення зубчастих коліс повинна приділятися якості і точності продукції, її відповідності необхідним технічним стандартам [1].

Об'єкт дослідження – процеси автоматизованого проектування зубчастих коліс з композиційних матеріалів.

Предметом дослідження є зубчасті колеса з композитних матеріалів.

Метою магістерської атестаційної роботи є дослідження шляхів раціонального автоматизованого проектування зубчастих коліс з композиційних матеріалів для подальшого технологічного забезпечення їх міцності.

Методи досліджень: аналітичний і розрахунковий метод, статичний аналіз, комп'ютерне моделювання.

Зубчасте колесо – основна деталь зубчастої передачі у вигляді диска з зубами на циліндричній або конічній поверхні, що входять в зачеплення із зубами іншого зубчастого колеса. У машинобудуванні прийнято мале ведуче зубчасте колесо незалежно від числа зубів називати шестернею, а велике ведене – колесом. Проте часто усі зубчасті колеса називають шестернями.

Зубчасті колеса зазвичай використовуються парами з різним числом зубів з метою перетворення обертового моменту і числа обертів валу на виході. Колесо, до якого обертовий момент підводиться ззовні, називається ведучим, а колесо, з якого момент знімається, – веденим. Якщо діаметр ведучого колеса менший, то обертовий момент веденого колеса збільшується за рахунок пропорційного зменшення швидкості обертання, і навпаки. Відповідно до передавального відношення, збільшення

обертового моменту викликатиме пропорційне зменшення кутової швидкості обертання веденої шестерні, а їх добуток – механічна потужність – залишиться незмінним. Це співвідношення справедливе для ідеального випадку, що не враховує втрати на тертя та інші ефекти, характерні для реальних пристроїв.

Зубчасті передачі служать для передачі обертального руху між валами, а також для перетворення обертального руху в поступальний або коливальний рух за допомогою зачеплення зубчастих коліс. Передачі між валами з паралельними осями називають циліндричними, а пару зубчастих коліс виконують із зовнішнім або внутрішнім зачепленням. Між дотичними поверхнями зубів у циліндричних передачах можливий евольвентний, циклоїдальний, часовий, цівковий, точковий або лінійний контакти. В основному використовується евольвентне зачеплення або рідше зачеплення з точковим або лінійним контактом.

До переваг зубчастої передачі відносяться висока здатність навантаження, високий ККД (0,95–0,98), сталість передавального відносини, надійність, компактність, простота в експлуатації. До недоліків відносяться вимоги підвищеної точності виготовлення, складність технології виготовлення, складання, регулювання, а отже висока вартість, можливий шум при роботі і т. д.

Циліндричні зубчасті колеса виготовляють прямозубими, косозубими і шевронними. У прямозубих колесах напрямок зуба паралельно осі колеса, а в косозубому зубі розташовані під постійним кутом до осі колеса. У косозубих зачепленні зуби набувають роботу не відразу по всій довжині, а поступово, що забезпечує плавну та безшумну роботу передачі у порівнянні з прямозубой. Недоліком косозубих коліс є наявність осьових навантажень на опори.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати предметну область;
- провести теоретичний аналіз і розрахунок напружень у зубчастих колесах;
- спроектувати зубчасту передачу;
- оформити пояснювальну записку згідно з рекомендаціями [2–3] та вимогами ДСТУ 3008:2015 [4].

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

1.1 Сучасні тенденції виготовлення та застосування композиційних матеріалів у промисловості

Композиційні матеріали відігравали важливу роль протягом історії людства, починаючи від житла ранніх цивілізацій і забезпечуючи майбутні інновації. Композити пропонують багато переваг; ключовими серед них є корозійна стійкість, гнучкість конструкції, довговічність, невелика вага та міцність. Композити пронизують наше повсякденне життя, такі як продукти, що використовуються в будівництві, для медичного застосування, нафти та газу, транспорту, спорту, аерокосмічної галузі та багатьох інших. Деякі програми, такі як ракетні кораблі, ймовірно, не змогли б відірватися від землі без композиційних матеріалів [5–6].

Композиційні матеріали рис. 1.1 утворюються комбінуванням двох або більше матеріалів, що мають досить різні властивості, і вони не розчиняються і не змішуються один з одним. Різні матеріали в композиті працюють разом, щоб надати композиту унікальні властивості. Люди вже тисячі років використовують композиційні матеріали в різних областях [7].

Все частіше використовуються інженерні компоненти з композитних матеріалів, від космічних кораблів до малих інструментів. Незаперечні переваги, такі як більш висока стабільність розміру, легка вага і мінімальний вплив на навколишнє середовище в порівнянні з іншими звичайними литими сталевими передачами. Передові вуглецеві композитні матеріали сучасного рівня відкрили новий рівень безшумних, високоміцних, без мастильних і точних передач при передачі потужності і руху [8].

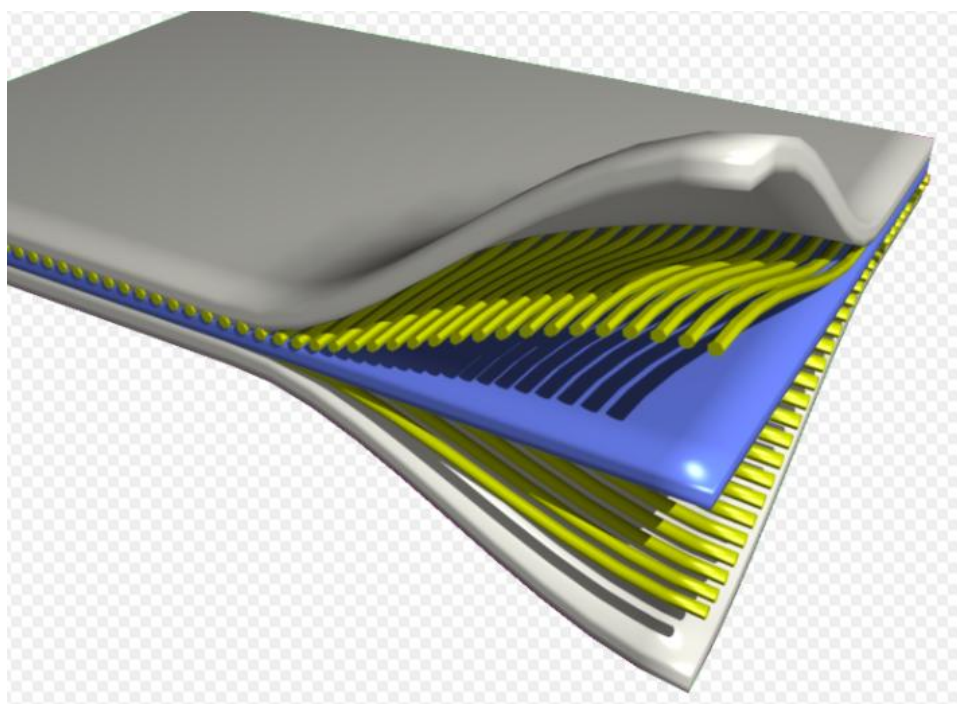


Рисунок 1.1 – Композиційний матеріал

Загалом, композит складається з трьох компонентів:

- матриці як неперервної фази;
- зміцнення як розривна або дисперсна фаза, включаючи волокно та частинки;
- тонка міжфазна область, також відома як інтерфейс.

Нижче наведено конструкцію композиту (рис. 1.2).



Рисунок 1.2 – Конструкція композиту

Ретельно вибираючи матрицю, арматуру та процес виробництва, що зближує їх, інженери можуть адаптувати властивості відповідно до конкретних вимог. За останні десятиліття було розроблено багато нових композитів, деякі з них мають дуже цінні властивості [9].

1.2 Полімерні композиційні матеріали, їх виготовлення й особливості механічної обробки

Будь-який матеріал може служити матричним матеріалом для композиту. Однак матричними матеріалами зазвичай є кераміка, метали і полімери. Насправді, більшість матричних матеріалів, доступних на композитному ринку, є полімерними. Існує кілька різних полімерних матриці, які можна використовувати в композитних матеріалах. Серед композитів з полімерною матрицею термореактивні матричні композити більш поширені, ніж термопластичні композити. Хоча термореактивні пластик і термопластики здаються схожими, вони мають дуже різні властивості і застосування. Розуміння відмінностей у продуктивності може допомогти вам приймати кращі рішення про покупку і розробляти продукти у вигляді композитів [10].

Термореактивні матеріали – це матеріали, на які хімічно реагують або виліковуються і зазвичай перетворюються з рідини в тверді. У неперевірній формі матеріал має невеликі непов'язані молекули, відомі як мономері. Додавання другого матеріалу в якості зшивного засобу, затвердіння, каталізатора або наявності тепла або якихось інших активуючих ефектів ініціює хімічну реакцію. Під час цієї реакції молекули зшиваються між собою і утворюють набагато довші молекулярні ланцюжки і зшити мережу, у результаті чого матеріал затвердиться. Зміна теплового реактивного стану є постійною і незворотною. Згодом вплив високих температур після закам'янення призведе до руйнування матеріалу, а не до плавлення. Це пов'язано з тим, що ці матеріали зазвичай розкладати при температурі нижче, де вони могли розплавитися [11].

Термопластики – це пластмаси, здатні плавитися. Термопластичні матеріали обробляються під впливом тепла. Коли додається достатня кількість тепла, щоб пластик перевищував його температуру плавлення, пластик плавиться, розріджується або пом'якшується достатньо для обробки. Коли джерело тепла видаляється і температура пластику опускається нижче точки плавлення, пластик

знову твердне в скляний твердий. Цей процес можна повторити, в той час як пластик тоне і твердне, коли температура піднімається вище і опускається нижче точки плавлення відповідно. Однак матеріал в розплавленому стані може погіршуватися все більше і більше, тому існує практична межа кількості разів, які можна перепроцесувати до того, як властивості матеріалу почнуть псуватися. Багато термопластичних полімерів відносяться до адитивного типу і можуть виробляти дуже довгі молекулярні ланцюжки або дуже високі молекулярні маси [12].

Свої місця на ринку мають як термореактивні, так і термопластичні матеріали. У загальних умовах термореактивні пластмаси, як правило, існують тривалий час і займають сильне місце на ринку, часто мають меншу вартість сировини і часто забезпечують легке змочування армування волокон і легке формування до кінцевої геометрії частини. Іншими словами, термореактивні пластмаси часто легше переробляти, ніж термопластика. Термопластики, як правило, жорсткіші або менш крихкі, ніж термореактивні. Вони можуть мати кращу хімічну стійкість, не вимагають охолодження, як це часто буває в незастосовних термореактивних матеріалах (препрегах), і їх легше переробляти і ремонтувати.

Термореактиви містять мономери, які зшиваються разом в процесі затвердіння, утворюючи незворотній хімічний зв'язок. Процес зшивання виключає ризик плавлення виробу при нагріванні, роблячи теплові реактивні матеріали ідеальними для використання в високотемних зонах, таких як електроніка і прилади. Є кілька термореактивних смол, які забезпечують різні переваги продуктивності [13].

Термореактиви значно підвищують механічні властивості матеріалу, забезпечуючи підвищення хімічної стійкості, термостійкості і цілісності конструкції. Термореактивні матеріали часто використовуються для герметичної продукції через їх стійкість до деформації. Термореактиви не підлягають переробці, неможливо переробити або змінити форму (не розплавляється при

нагріванні). Легко змокати над армовані волокна і наповнювачі. Терморективи більш стійкі до високих температур, ніж термопластика. Терморективи мають відмінний естетичний вигляд, високу стійкість до розмірів, більш складну обробку поверхні і економічну.

У термопластику пелети розм'якшуються при нагріванні і стають більш рідкими при нанесенні додаткового тепла. Ця характеристика дозволяє повторно формувати і обробляти термопластику, не впливаючи негативно на фізичні властивості матеріалу [14].

Є кілька термопластиків, які забезпечують різні переваги продуктивності. Зазвичай мають високу міцність, стійкість до усадки і легку гнучкість. Залежно від полімерів термопластик можна використовувати в низьковольтних додатках, таких як поліетиленові пакети або високовольтні механічні деталі. Придатний для переробки, може розплавитися при нагріванні, можливості ремоделювання або зміни форми. Термопласти важче змочувати арматурні волокна і наповнювачі, мають високу ударну міцність, хімічно стійкі. Мають варіанти твердої кристалічної або гумової поверхні, як правило, дорожче, ніж тепловий реактивний матеріал.

Терморективні смоли діляться на поліестерові смоли, епоксидні смоли, складні вінілетерові смоли, феноличні, поліуретанові та інші високотемперні смоли, такі як ціанатні ефіри і т. д. Очікується, що попит на високоетеричні та легкі матеріали з різних галузей промисловості кінцевого використання, таких як автомобільні, хімічні резервуари та резервуари для води, розширить світовий ринок теплових матеріалів протягом наступних 6 років [15].

З іншого боку, використання термопластичних полімерів (акрил, поліолефін, акрилонітрил-бутадиєн-стирол і т. д). Більш легко формований і регенований композитний матеріал в порівнянні з терморективними полімерами є зростаючою тенденцією в волоконно-армованих полімерах. Термопластичні полімери також пропонують простий розчин для переробки композитних компонентів, що викликає занепокоєння, коли мова йде про

використання композитних матеріалів. пов'язані з можливістю перевиробництва композитів.

Останнім часом основною тенденцією в аерокосмічній галузі є перехід до більш широкого використання термопластики в порівнянні з «традиційними» термореактивними епоксидними смолами. Це також відкриває можливості для термопластики [16].

Термопластики є переважаючими пластиковими матеріалами в цілому, особливо в неозброєних районах. Термореактивні матеріали використовуються в неозброєних додатках з певною метою, де вони мають перевагу завдяки деяким унікальним властивостям. Однак на ринку армовані або композитні матеріали домінуючий термореактивний матеріал і термопластик використовуються тільки там, де важливі їх унікальні переваги. На композитному ринку термореактивний матеріал становить близько 80 % всього використовуваного матеріалу.

Композитні арматурні елементи можуть бути в різних формах, таких як волокна, пластівці або частинки. Кожен має свої властивості, які можна додавати в композити, і тому кожен має свою область застосування. Серед форм клітковина найчастіше використовується в композитних додатках, і вони мають найбільший вплив на властивості композитних матеріалів. Ці причини полягає в тому, що волокна мають високий коефіцієнт розміру до діаметра, який може ефективно передавати зсув напруження між матрицею і волокнами, а також здатність обробляти і виробляти композитні частини різних форм з використанням різних технологій [17].

Останнім часом натуральні волокна отримали більше уваги в композитних додатках завдяки своїм перевагам розумних механічних властивостей, низькій щільності, екологічним перевагам, відновлюваним джерелам енергії та економічній доцільності. Натуральні волокна в простому визначенні є волокнами, які не є синтетичними або штучними і класифікуються відповідно до їх походження від тварин, мінеральних або рослинних джерел. Натуральні волокна є одним з тих якісних матеріалів, які можуть бути використані для заміни

синтетичних матеріалів і супутніх продуктів для додатків, які вимагають меншої ваги і економії енергії.

Натуральні рослинні волокна повністю отримані з рослинних джерел і повністю біорозкладні за своєю природою. Волоконно-посилена полімерна матриця привернула велику увагу в багатьох додатках завдяки своїм хорошим властивостям. Поточні показники свідчать про те, що інтерес до композитів натурального волокна з галузі буде стрімко зростати по всьому світу. Використання полімерних композитів, армовані натуральним волокном і природними смолами для заміни існуючих синтетичних полімерів або скловолокнистих матеріалів, величезне. Однак якість натурального волокна багато в чому залежить від віку рослини, виду, зростаючого середовища, врожаю, вологості, якості ґрунту, температури і етапів обробки, а також існують заходи щодо зниження обробки в полі для поліпшення консистенції і зниження витрат [18].

1.3 Виготовлення композитних матеріалів з відкритим контактом

Існує кілька способів виготовлення композитних матеріалів. Вибір способу для частини буде залежати від матеріалів, дизайну частини, продуктивності і кінцевого використання або обсягу нанесення.

Ручна укладка – це метод лійки з відкритим контактом для виготовлення композитних матеріалів. Смоли вручну просочуються волокнами, які мають форму сплєтених, в'язаних, зшитих або скріплених матеріалів. При цьому способі цвіль спочатку обробляється формою мастила, на цвіль укладаються сухі волокна або сухі тканини, а потім рідка шкіра заливається і розподіляється по волокнистих шарах. Зазвичай це досягається за допомогою валиків або кистей, а самозйомки з затискним валиком все частіше використовуються для проштовхування в тканину вмощення через обертові валики і ванну зі смолой. Валик або щітка використовується для намочування волокон і видалення повітря, що потрапило в

шари. Кілька шарів волокон промиваються, а ламінат залишається для затвердіння в стандартних атмосферних умовах. Після того, як ці шари були вилікуваними, додаються додаткові шари рис. 1.3 [19].

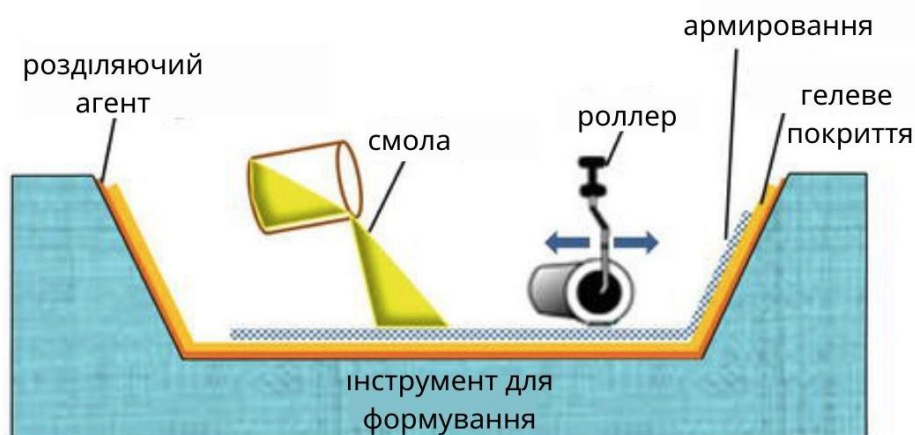


Рисунок 1.3 – Ручна укладка

Обприскування також є композитним методом відкритої форми. Техніка обприскування вважається продовженням ручного способу укладання. У цьому процесі цвіль спочатку обробляється формою мастила. Якщо використовується гелькот, він розпорошується на форму певної товщини після нанесення мастила для форми. Потім гелькот твердне і форма готова до ходу. Клітковину і каталізовані розсипчасті з в'язкістю 500-1000 шпильок розпорошують у форму з розпилювачем пістолета з подрібнювачем. Гармата розрізає джгут безперервних волокон на пучки коротких волокон, а потім здуває короткі волокна прямо в струмінь розпиленої осінини, так що обидва матеріали одночасно наносяться на поверхню цвілі, як показано на рис. 1.4. На завершальних етапах виготовлення, в процесі обприскування, робітники вручну ущільнюють ламінат роликками. Потім композитну частину видаляють, охолоджують і видаляють з форми [19].

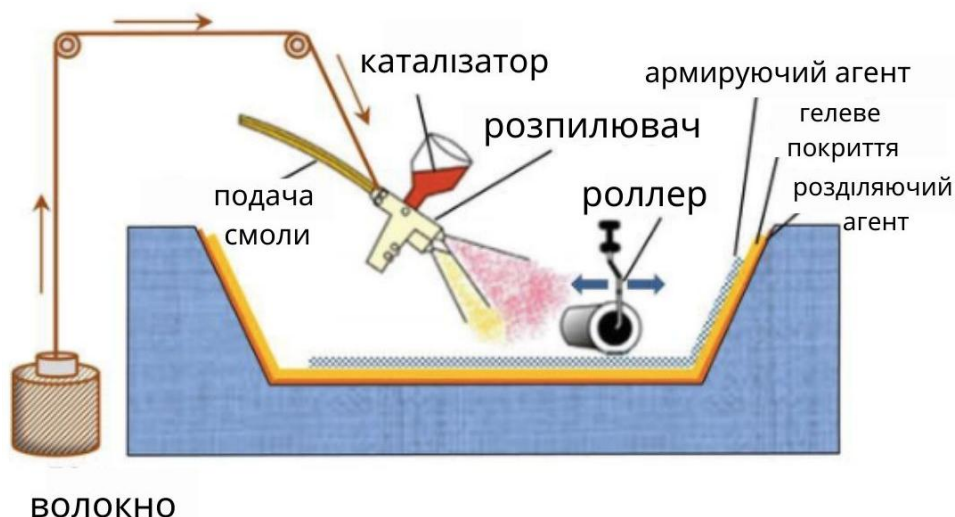


Рисунок 1.4 – Метод обприскування

Ручні методи укладання та обприскування часто використовуються одночасно для зниження витрат на робочу силу. Це звичайний процес виготовлення скловолокна таких виробів, як ванни, корпуси і палуби човнів, крил, комплектуючих для житлових відпочиваючих, душових кабін, курортів, кабін вантажівок та інших відносно великих і простих форм.

1.4 Автоматизоване виготовлення композиційних матеріалів

У зв'язку з постійно зростаючим попитом на більш високі темпи виробництва, промисловість використовувала альтернативні виробничі процеси для заміни ручного укладання, і закликала виробників автоматизувати ці процеси, де це можливо.

Формування з переносом смоли іноді називають рідким формуванням, є досить простим процесом. У цьому способі цвіль спочатку обробляється формою мастила. Сухі світильники, як правило, попередньої форми, потім розміщуються у форму та форма закривається. Скоринку з низькою в'язкістю і каталізатором дозують і змішують, а потім перекачують у форму під тиском від низького до середнього через ін'єкційні отвори на заздалегідь розроблених доріжках через заготовку. Низька в'язкість в'язкості використовується в методах, що перевозять

вошей, щоб забезпечити швидке і ретельне проникнення вени через заготовку перед желем і затвердіння, особливо в разі товстих композитних деталей [20].

При реакційних лиття під тиском швидкорізна резина і каталізатор вводять у форму двома окремими потоками. Змішування та хімічна реакція відбуваються у вигляді, а не в дозувальній голові. Постачальники автомобільної промисловості поєднали лиття під тиском з швидкими методами попереднього лиття для виготовлення конструктивних деталей. На рис. 1.5 показано схему процесу лиття під тиском.

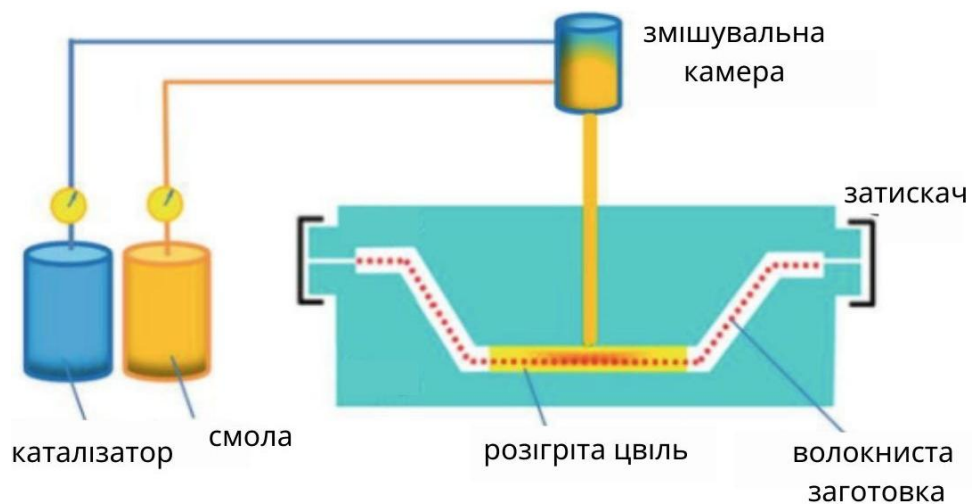


Рисунок 1.5 – Процес лиття з перенесенням смоли

Лиття компресією є точним і потенційно швидким процесом для виробництва високоякісних композитних деталей у широкому діапазоні об'ємів. Матеріал розміщується у формі вручну або автоматично. Половинки форми закриваються і тиск наноситься гідравлічними пресами. Час циклу залежить від розміру та товщини частини. Цей процес дозволяє виготовляти високоміцні складні деталі найрізноманітніших розмірів. Композити зазвичай обробляються компресійним литтям і включають термореактивні препреги, термопластики, що зміцнюють волокна, формувальні суміші, такі як листові ліпнина, склади масового лиття і подрібнені термопластичні стрічки. На рис. 1.6 показано візерунок процесу лиття компресією [21].

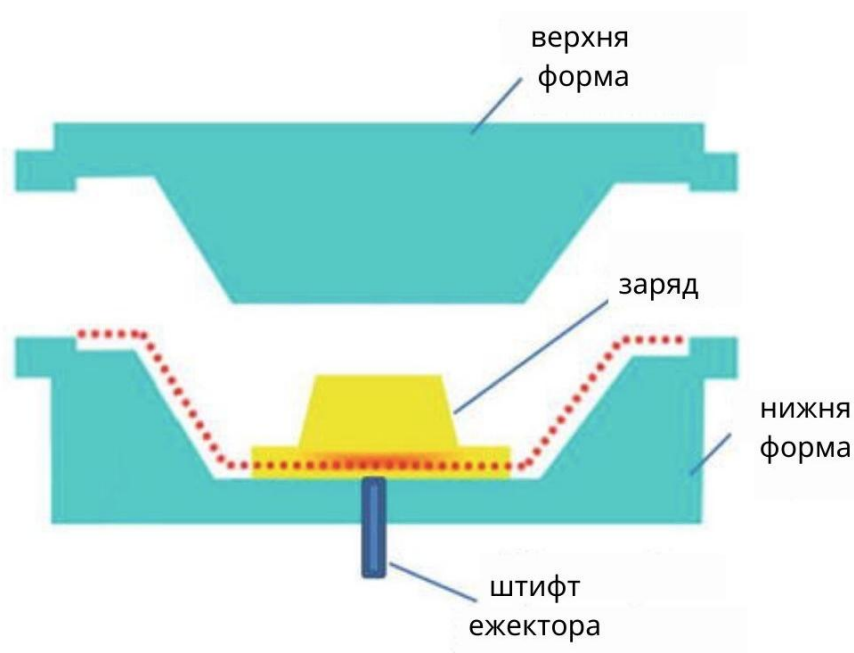


Рисунок 1.6 – Схема процесу лиття під тиском

Лиття під тиском є закритим процесом, як показано на рис. 1.7. Цей процес швидкий має високий об'єм та низький тиск, і найчастіше його використовують для термопластики з наповнювачем, таким як нейлон із подрібненим скловолокно. Процес лиття використовується вже майже 150 років. Машини для лиття під тиском були введені в 1960-х і використовуються до цих пір. Швидкість впорскування, як правило, від одного до декількох секунд, і багато деталей можуть бути виготовлені на годину в деяких формах з декількома розетками [22].

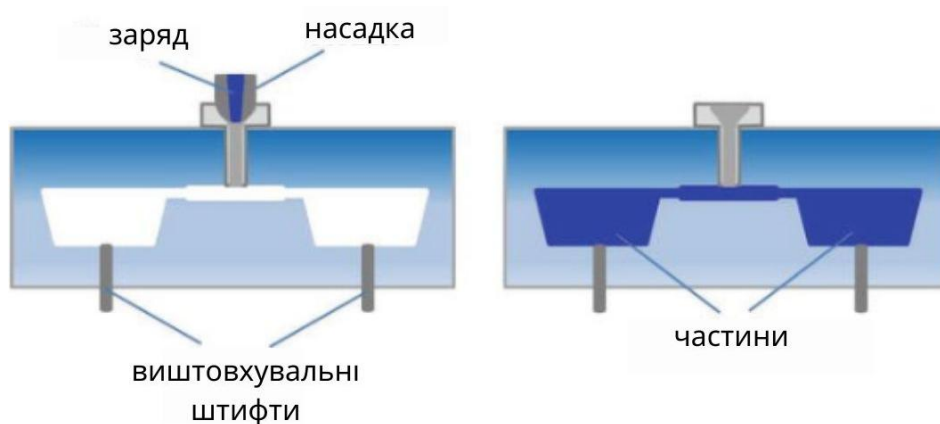


Рисунок 1.7 – Спрощена схема процесу формування

Намотка філаменту є безперервним методом виготовлення, який може бути високо автоматизований і відтворений при відносно низьких витратах матеріалу, як показано на рис. 1.8. Довгий циліндричний інструмент під назвою обідок горизонтально підвішений між торцем опор. Сухі волокна проходять через ванну зі шкірою для змочування. Інструмент застосування волокна рухається вперед-назад по довжині обода, що обертається, з поперечним вагоном, помістивши волокно на інструмент в задану конфігурацію. Для організації рухів сокири використовуються машини для мокрих пасом з комп'ютерним управлінням. Нитка є одним з прикладів композитних матеріалів для аерокосмічної промисловості [23].

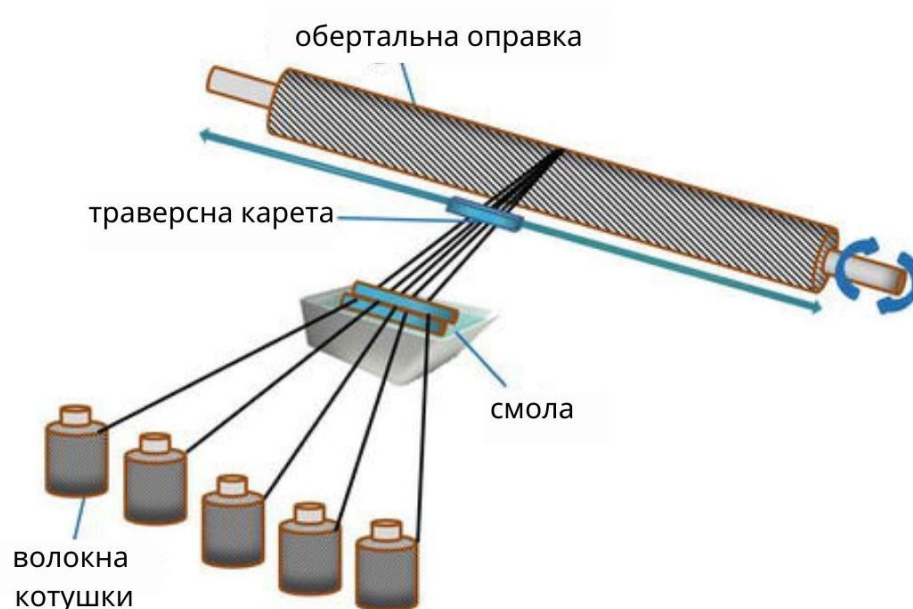


Рисунок 1.8 – Процес намотки філаменту

Композитна пултрузія є технологічним методом виробництва безперервних сегментів волокно-армовані полімерних структурних форм з постійним перетином. Це безперервний метод виробництва, який може бути повністю автоматизований. У цьому процесі безперервний пучок сухого волокна протягується через нагріту шкіру змочування станції. Змочений пучок втягується в нагріті матриці, і форма поперечного перерізу подовженого волокна формується

цими марками. Смола отверждається і утворюються композити. Потім деталі виготовляють нарізанням довго затверділого шматка. Цей процес обмежується прямими деталями з постійним перетином, такими як двотаврові балки, балки марки або каркасні секції і перила сходів. На рис. 1.9 представлена схема процесу пултрузії. Пултрузія використовується при виробництві лінійних компонентів, таких як сходи і ліпнина [23].

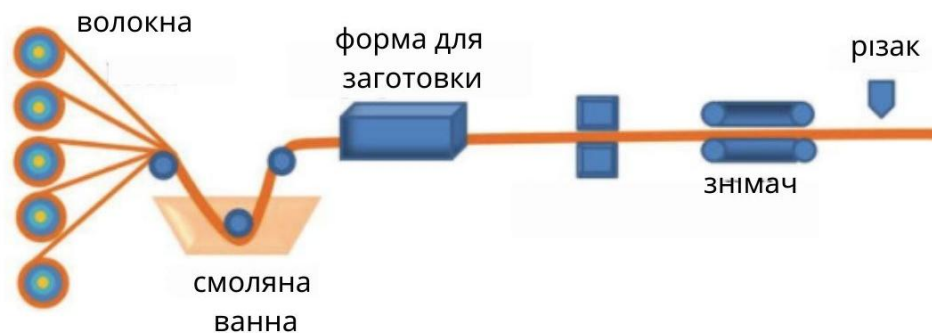


Рисунок 1.9 – Схема процесу пултрузії

Автоматична укладання волокна є одним з найбільш просунутих методів виготовлення і виробництва композитних матеріалів, як показано на рис. 1.10. Цей метод використовується практично виключно зі стрічкою, армовані суцільними волокнами. Робот використовується для укладання стрічки, армованої клітковиною, і створення структури по одному шару за раз. Смуга матеріалу, що складається з багатьох вузьких смужок стрічки (джгутів), розміщується там, де ці джгути, як правило, шириною 0,125 і 0,25 дюйма. Використання робототехніки дає оператору активний контроль над усіма критичними змінними процесу, що робить процес легко керованим і повторюваним. Цей метод дозволяє робити деталі на індивідуальній основі, так як кожен шар може розташовуватися під різними кутами, щоб краще витримувати необхідні навантаження [25].

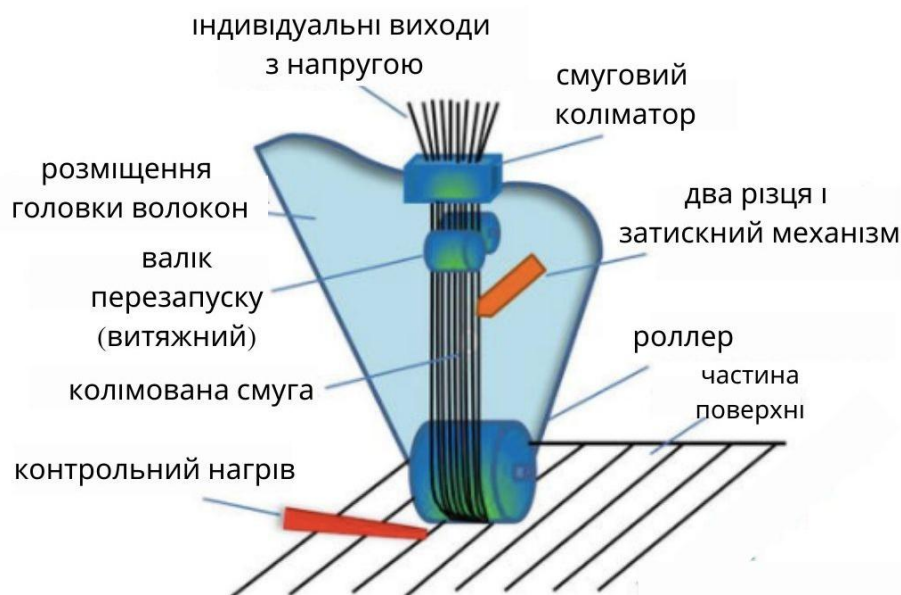


Рисунок 1.10 – Автоматичне укладання волокна

Перевагами розміщення волокон є швидкість переробки і зменшення матеріальних відходів і робочої сили. Часто цей процес використовується для створення великих теплореверсивних частин складної форми. Як і цей процес, автоматична укладання стрічки є ще швидшим автоматизованим процесом, в якому попередня стрічка, а не поодинокі джгути, укладається безперервно для формування деталей.

Аддитивна продукція також відома як техніка 3D-друку. Аддитивна промисловість є кроком вперед у розробці концепцій швидкого прототипування, які були введені більше 20 років тому. Це процес створення твердого об'єкта з 3D-цифрової моделі, як правило, шляхом накладення декількох послідовних тонких шарів матеріалу. Одна композитна конструкція сопла використовує полімерну композитну нитку, що містить полімер і добавки, такі як гумові мікросфери, скловолокно або частинки вуглецевого волокна, деревне борошно тощо, як показано на рис. 1.11. Ця пізніша форма виробництва композитних деталей виросла, зусилля зі скорочення витрат на етапі розробки продукту від проектування до прототипу, зосереджуючись на матеріальних, трудомістких сферах виробництва інструментів [26].

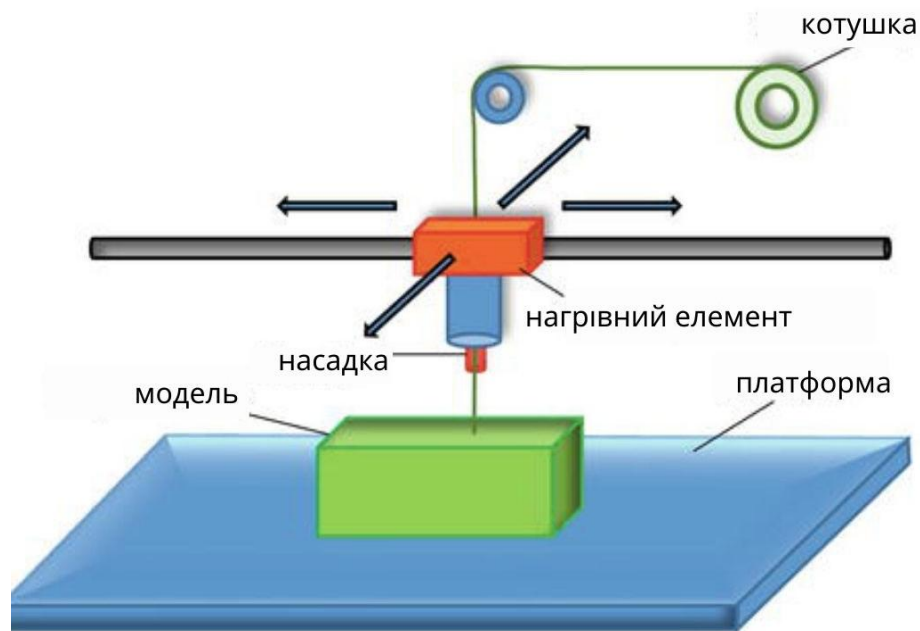


Рисунок 1.11 – Адитивна технологія

Полімерні композитні матеріали мають легку вагу, що підвищує економію палива автомобілів з композитів і надає їм структурну стійкість. Крім того, вони мають високе співвідношення міцності до ваги і підвищену термостійкість. Композити мають дуже різні властивості і застосування в залежності від типу матриці, армування, співвідношення між ними, композицій, обробки і т. д. властивості полімерного композиту.

1.5 Висновки до першого розділу

У першому розділу розглянуто особливості виготовлення композиційних матеріалів, і їх застосування у промисловості.

Композиційні матеріали відігравали важливу роль протягом історії людства, починаючи від житла ранніх цивілізацій і забезпечуючи майбутні інновації. Композити пропонують багато переваг, ключовими серед них є корозійна стійкість, гнучкість конструкції, довговічність, невелика вага та міцність.

Інженери використовують компоненти з композитних матеріалів для виготовлення багатьох виробів – від космічних кораблів до малих інструментів. Вони мають незаперечні переваги, такі як більш висока стабільність розміру, невелика вага та мінімальний вплив на навколишнє середовище, у порівнянні з іншими звичайними литими сталевими передачами.

2 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕННЯ ЗУБЧАСТИХ КОЛЕС З КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ В АВТОМАТИЗОВАНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

2.1 Зубчаті колеса з композиційних матеріалів, їх виготовлення та застосування у промисловості

Сьогодні зубчата передача широко використовується в швидкозрілих галузях, таких як автомобільна, суднобудівна та інша офісна робота через їх високу прецесію. Зубчата передача є одним з найважливіших компонентів в механічній трансмісії енергії і в більшості промислових обертів машин.

Все частіше використовуються інженерні компоненти з композитних матеріалів, від космічних кораблів до малих інструментів. Незаперечні переваги, такі як більш висока стабільність розміру, легка вага і мінімальний вплив на навколишнє середовище в порівнянні з іншими звичайними литими сталевими передачами. Передові вуглецеві композитні матеріали сучасного рівня відкрили новий рівень безшумних, високоміцних, без мастильних і точних передач при передачі потужності і руху. Зубчата трансмісія є одним з найбільш часто використовуваних компонентів для передачі енергії між двома паралельними валами, і широко використовується в механічній передачі енергії. Спроекувати і намалювати прямозубне колесо, а також проаналізувати розподіл напруження в сталевому лиття і композитному матеріалі.

Зубчата передач є одним з найпоширеніших компонентів, в якому широко використовується система механічної передачі енергії. Зубчате спорядження або зубчате колесо має нарізані зуби або зубці, які зачеплені іншою зубчатою частиною з нарізаним краєм для передачі моменту. Шестерні завжди змінюють момент, що дає механічну перевагу в контролі руху або моменті, зміна моменту руху контролюється їх номером трансмісії. Зуби двох парних передач повинні

бути однакової форми. Якщо два або більше підключаючих шестерні працюють послідовно, вони називаються зубчастими передачами. Зубчаста передача також може бути зачеплена лінійно-зубчастою частиною під назвою граблі. Шестерні дуже ефективні для передачі потужності з одного валу в інший завдяки їх високому ступеню надійності і компактності [27].

Зростаючий попит на передачу енергії в автомобілях, транспортних засобах, ліфтах і генераторах створив підвищений попит на більш точний аналіз характеристик передач. Іноді для створення дуже великих коробок передач використовуються кілька прямозубих передач.

Коробка передач, яка зазвичай використовується в системі трансмісії, також називається швидкісною коробкою передач, зубчастою головою, зубчастою коробкою передач і т.д., яка складається з набору передач, валів і підшипників, які встановлюються на заводі в закритому розмазаному корпусі. Редуктори доступні в широкому діапазоні розмірів, потужності і номерів передач. Їх робота полягає в перетворенні вхідної потужності основного двигуна (як правило, електродвигуна) в потужність на меншій швидкості і, відповідно, більш високому моменті.

Шестерні – це зубчасті елементи, які передають потужність, рухаючись між двома валами, зачепиваючи без ковзання. Отже, зубчасті колеса називають позитивними приводами. У будь-якій парі колес, меншу називають провідною передачею, а велику називають ведомою, яка не залежить від того, що приводить в іншу [28]. Шестерні бувають:

- прямозубчаті шестерні;
- косозубчаті шестерні;
- шевронні шестерні;
- шестерні з внутрішнім зачепленням;
- гвинтові шестерні;
- секторні шестерні;
- шестерні з круговими зубцями;
- конічні шестерні;

- зубчата рейка;
- зірка;
- коронна шестерня.

Прямозубчате циліндричне колесо є найбільш використовуваним типом зубчатих коліс як в інженерних, так і інших механізмах. Зуби розташовані в радіальних площинах. Лінія зіткнення зубів пари зубчастих коліс паралельно осі обертання. Вісь обох редукторів коліс розташована строго паралельно, прямозубчата передача наведена на рис. 2.1 [29].



Рисунок 2.1 – Прямозубчата передача

2.2 Параметри зубчатих коліс з композиційних матеріалів в автоматизованому виробництві

Модуль (m) є універсальною характеристикою зубчастого колеса (шестерні), яке зв'язує в одне ціле його найважливіші параметри, такі як:

- крок зуба;
- висота зуба;
- кількість зубів і діаметр кола виступів.

Модуль бере участь в усіх розрахунках, пов'язаних з будовою передач і систем передач (рис. 2.11) [36].

На рис. 2.2 позначені:

- d_a – діаметр вершин зубів;
- d_f – діаметр западин зубів;

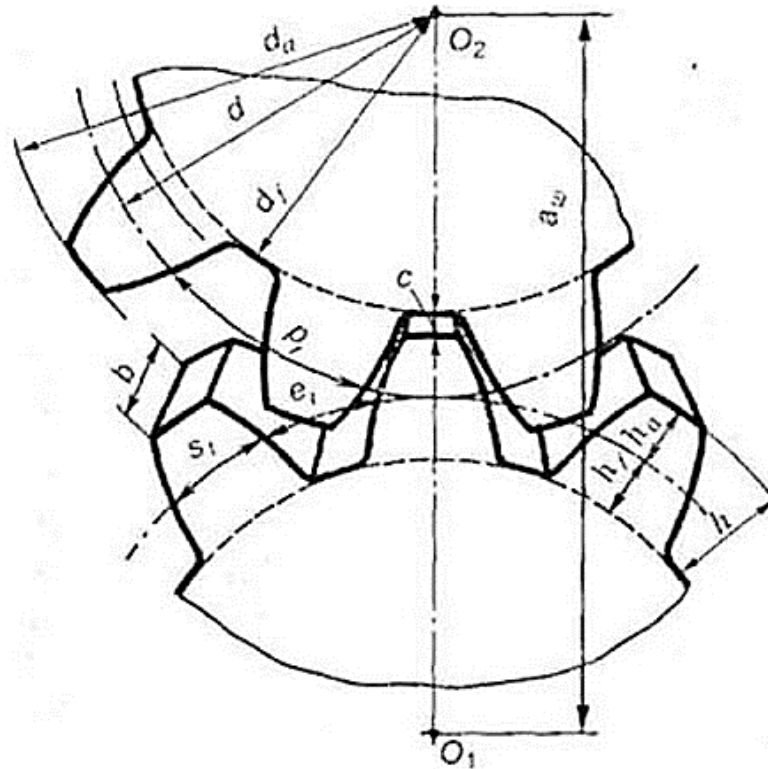


Рисунок 2.2 – Параметри зубчатих коліс

- d – діаметр поділу;
- P_t – окружний крок;
- h – висота зуба;
- h_f – висота ножки зуба;
- h_a – висота головки зуба;
- c – радіальний зазор;
- b – ширина зубчастого вінця;
- e_t – окружна ширина западини зубів;
- S_t – окружна товщина;
- a_w – міжосьова відстань.

Для знаходження ділільного діаметру колаі необхідно скористатися виразом:

$$d_1 = mZ_1, \quad (2.1)$$

де m – модуль;

Z_1 – число зубів.

З модулем пов'язані усі елементи зубчатого колеса, згідно з цим висоту головки зуба (h_a) знаходять так:

$$h_a = m. \quad (2.2)$$

Для знаходження висоти ніжки зуба використовуємо вираз:

$$h_f = 1,25m. \quad (2.3)$$

Для обчислення висоти зуба використовуємо формулу:

$$h = 2,25m. \quad (2.4)$$

Для знаходження діаметра кола використовуємо вираз:

$$d_a = m(Z_1 + 2). \quad (2.5)$$

Діаметр впадин кола знаходиться за формулою

$$d_f = m(Z_1 - 2,5). \quad (2.6)$$

Для знаходження міжосьової відстані використовуємо вираз:

$$a_w = a = m(Z_1 + Z_2) / 2. \quad (2.7)$$

2.3 Аналіз конструкції циліндричної зубчатої передачі

Для того щоб спроектувати прямозубне колесо, необхідно проаналізувати розподіл напруження в сталевому литті і композитному матеріалі. Циліндрична зубчата передача є одним з найбільш часто використовуваних компонентів для передачі енергії між двома паралельними валами, вони широко використовуються в механічній передачі енергії. Все частіше використовуються інженерні компоненти з композитних матеріалів, від космічних кораблів до малих інструментів. Незаперечні переваги, такі як більш висока стабільність розміру, легка вага і мінімальний вплив на навколишнє середовище в порівнянні з іншими звичайними литими сталевими передачами. Передові вуглецеві композитні матеріали сучасного рівня відкрили новий рівень безшумних, високосильних, безмастильних і точних передач при передачі потужності і руху. Правильне розуміння і передбачення відмови передач є важливою передумовою для будь-якого надійного застосування. У цьому проекті прямозубна передача розроблена з використанням розширеного програмного забезпечення для моделювання (Solidworks), і побудована і проаналізована за допомогою програмного забезпечення для аналізу за допомогою програми для обертального моменту [37].

В данному розділі ми порівнюємо результати аналізу як для композитних прямозубих передач, так і для існуючих прямозубих сталевих передач.

Зубчата передача є одним з найпоширеніших компонентів, в якому широко використовується система механічної передачі енергії. Зубчата передача або зубчате колесо має нарізані зуби або зубці, які зачеплені іншою зубчастою частиною з нарізною кромкою для передачі обертового моменту. Шестерні завжди змінюють обертовий момент, що дає механічну перевагу в контролі руху або обертовим моментом, зміна моменту руху контролюється їх передавальним значенням трансмісії. Зуби двох парних передач повинні бути однакової форми. Якщо два або більше підключаючих шестерні працюють послідовно, вони називаються зубчастими передачами. Зубчаста передача також може бути

зачеплена лінійно-зубчастою частиною під назвою граблі. Шестерні дуже ефективні для передачі потужності з одного валу в інший завдяки їх високому ступеню надійності та компактності.

Сьогодні зростаючий попит на передачу енергії в автомобілях, транспортних засобах, ліфтах і генераторах створив підвищений попит на більш точний аналіз характеристик передач. Іноді для створення дуже великих коробок передач використовуються кілька прямозубих передач. Циліндричні зубчасті колеса часто використовуються для зниження або збільшення швидкості, роздільної здатності, точності, збільшення крутного моменту і поліпшення систем позиціонування. Зуб циліндричної передачі проходить паралельно осі шестерні і може передавати рух тільки між паралельними осями. Циліндричні шестерні збігаються по одному зубу за раз, що призводить до високого навантаження на кон'юговані зуби і шуму на роботі. Це тому, що прямо зубчасте спорядження дійсно гучне. Кожен раз, коли зубна передача потрапляє в гачок з зубом іншої передачі, зубці стикаються і цей удар створює шум. Це також збільшує напруження на зубах шестерні [37].

Щоб мінімізувати напруження і шум в шестернях, більшість мають косу форму. Прямозубна передача зазвичай вибирається з діапазоном коефіцієнта трансмісії 1:1 до 1:6 з лінійною швидкістю кроку. ККД прямої зубчастої циліндричної передачі становить близько 98-99 %. Провідна передача виконана з більш твердого матеріалу, ніж колесо. Зубчасту пару слід вибирати так, щоб вона мала найбільшу кількість зубів, що відповідає дійсному запасу міцності. Мінімальна кількість зубів на шестерні з нормальним кутом преса 20 градусів – 18 [38].

Аналіз напружень зубчастих колес, прогноз динамічних навантажень зубчастих колес, похибка зубчастої передачі і оптимальна конструкція зубчастих передач є одними з основних проблем при проектуванні зубчастих коліс.

Швидкість зносу полімерної шестерні буде збільшуватися, коли прикладена навантаження досягне критичної позначки для специфічна геометрія. Поверхня

шестерні зношується повільно з низькою питомою зносом, якщо шестерня навантажена нижче критичної. Причина раптового збільшення швидкості зносу пов'язана з робочою температурою зубчастої передачі, коли вона досягає точки плавлення матеріалу в умовах критичного навантаження. Фактична продуктивність шестерні повністю залежала від навантаження [39].

Детальний аналіз температури спалаху полімерного композитного зубчастого колеса і теплового розділу між зубами зубчастого колеса розглядається як нестационарний, коли розподіл інтенсивності і швидкість джерела тепла змінюються в міру зачеплення. Припускаючи, що чисельне наближення приймається з використанням кінцевих різних методів, а результати показані якомога ближчими до результатів, отриманих з використанням напіваналітичних методів, за умови відсутності внутрішнього гистерезиса і постійних властивостей матеріалу.

У даному розділі проводиться теоретичний аналіз конструкції циліндричної зубчастої передачі й аналіз її напружено-деформованого стану, і пропонується замінити металеві шестерні на полімерні шестерні для зниження шуму та ваги. Основна мета – проаналізувати різні полімерні шестерні, а саме нейлон, полікарбонат, і перевірити їх працездатність за допомогою металевої шестерні, виготовленої з чавуна.

Якщо композитні зубчаті колеса добре спроектовані і проаналізовані, вони будуть мати такі корисні властивості, як низька вартість, шум, вага, вібрація та робота аналогічної металевої шестерні. На основі статичного аналізу нейлонові шестерні підходять для використання в умовах обмеженої навантаження в порівнянні з чавунними циліндричними циліндричними шестернями.

Модуль – це відношення ділільного діаметра до кількості зубів. Одиниця виміру модуля – міліметри. Нижче на рис. 2.12 приведена діаграма, що показує відносний розмір зубів, оброблених в стійці з модулем, в діапазоні значень модуля від 0,5 мм до 6 мм [40].

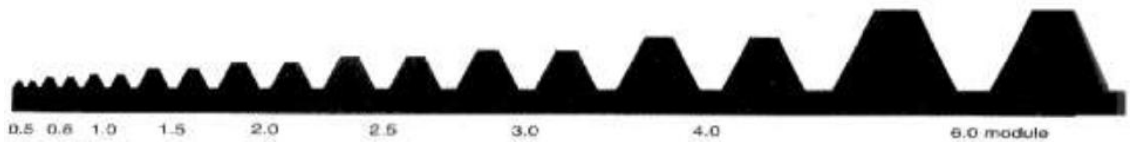


Рисунок 2.3 – Діаграма з відносним розміром зубів

Конструкція шестерні така, що при зачепленні обертаючої шестерні мають більш ніж одну шестерню в контакті та передають обертовий момент протягом деякого часу. Ця властивість називається коефіцієнтом контакту. Це відношення довжини лінії дії до основного кроку. Важливою змінною, що впливає на геометрію зубів шестерні, є кут нормального тиску. Зазвичай це 20° .

2.4 Проектні розрахунки та технічні умови циліндричного зубчатого колеса

Вихідні дані для аналізу: обертовий момент $T = 25,5$ кг/м ($N = 2500$ об/хв), тобто $T = 25,5 \cdot 10 \text{ Нм} = 225 \text{ Нм} = 2225000 \text{ Нмм}$.

Знаючи обертовий момент необхідно знайти потужність циліндричного зубчатого редуктора:

$$P = 2\pi \cdot N \cdot T / 60. \quad (2.8)$$

Тож отримуємо:

$$P = 2 \cdot 3,14 \cdot 2500 \cdot 225 / 60 = 58875 \text{ Вт} = 58,875 \text{ кВт}.$$

Для знаходження обертового моменту використовуємо вираз:

$$T = F \cdot (d / 2), \quad (2.9)$$

де F – навантаження;

d – діаметр кола висоти ($z \cdot m = 170 \text{ мм}$).

Згідно з цими даними знайдемо навантаження:

$$F = T / (d / 2), \quad (2.10)$$

$$F = 255000/90 = 2833,33 \text{ Н.}$$

Використовуючи рівняння Льюїса, тангенціальне навантаження обчислюється так:

$$F = b \cdot y \cdot pc \cdot \sigma b, \quad (2.11)$$

де pc – круговий крок, $pc = 3,14 \cdot m$;

$y = 0,134$ мм (фактор Льюїса);

$b = 54$ мм (ширина грані).

$$F = 8,7413 \text{ Н/мм}^2.$$

Гранична міцність на розрив для литої сталі дорівнює 540 МПа.

Виходячи з табличних значень допустимого напруження для литої сталі маємо вираз:

$$\theta = 540/3 = 180 \text{ Н/мм}^2 > 8,7413 \text{ Н/мм}^2.$$

А допустиме напруження для композиту є наступним:

$$\theta = 52/3 = 17,33 \text{ Н/мм}^2 > 8,7413 \text{ Н/мм}^2.$$

Гранична міцність на розрив для наповненого склом поліаміду дорівнює 38,1 МПа.

Тобто, виходячи з наших отриманих результатів маємо:

$$\theta = 38,1/3 = 12,7 \text{ Н/мм}^2 > 8,7413 \text{ Н/мм}^2.$$

Отже, виходячи з отриманих значень можемо сказати, що конструкція безпечна.

Далі знайдемо модуль:

$$m = D / Z = 170/17 = 10 \text{ мм.}$$

Для розрахунку властивостей зубів шестерні нам необхідно обчислити діаметр кроку кола:

$$D = z \cdot m, \quad (2.12)$$

$$D = 17 \cdot 10 = 170 \text{ мм.}$$

Знаючи діаметр кроку кола, ми можемо обчислити діаметр основного кола:

$$D_b = D \cos \alpha, \quad (2.13)$$

$$D_b = 170 \cdot \cos 20 = 159,745 \text{ мм.}$$

Для знаходження діаметру зовнішнього кола скористаємося виразом:

$$D_a = (z + 2) \cdot m, \quad (2.14)$$

$$D_a = (17 + 2) \cdot 10 = 190 \text{ мм.}$$

Для знаходження дедендума, тобто глибини зуба під кроком кола, необхідно знайти зазор:

$$S = pc / 20, \quad (2.15)$$

$$S = 31,4 / 20 = 1,57 \text{ мм.}$$

Щоб знайти дедендум, використовуємо вираз:

$$D_e = m + S, \quad (2.16)$$

$$D_e = 10 + 1,57 = 11,57 \text{ мм.}$$

Лита сталь – це перший тип стали, який дозволив додавати в чавун сплави. До застосування цього методу виробники не могли отримати сталь досить гарячою для плавлення. Нагріваючи блистерну сталь в глиняному тиглі, який поміщають прямо в вогонь, метал нагрівся до 2900 °F (1600 °C). Плавлення дозволило іншим елементам, таким як нікель, примешатися до металу, тим самим зміцнивши сталь [41].

Лита сталь має жорстку поверхню. У ній регулярно є отвори на поверхні, зроблені за рахунок підйому газу під час процедури нагріву. Цей вид стали – гнучкий метал, надзвичайно міцний і в чотири рази більше еластичний, ніж чавун. Жорсткість – це величина ваги, яку можна витримати при витягуванні предмета, перш ніж воно зламається.

Одна з проблем, пов'язаних з використанням литої сталі, полягає в тому, що не виходять поверхневі зазори всередину металу. Якщо припустити, що це так, ці зазори можуть привести до дефектів, що впливає на міцність сталі. Вимірювання об'єму води, який можна заповнити отворами, дасть неабиякий ознака того, проникають чи зазори глибоко в метал.

Твердість сталевого лиття різниться в залежності від суміші вуглецю і різних кріплень. Рівні нагрівання, використовувані при змішуванні металу, також впливають на твердість готового металевого виробу. Зазвичай знижений рівень вуглецю і високомолекулярні сполуки дають більш м'який метал. Більш високу кількість вуглецю з меншою кількістю доволів дозволяє отримати ливарну сталь з більш високою твердістю, але при цьому знижує якість плинності, яке є адаптованість металу [42].

Різні випробування використовуються для визначення міцності та довговічності сталевих лиття до того, як вона почне руйнуватися. Ці випробування включають випробування на падіння, ударні випробування, випробування на злам і випробування на розрив. У цій області низькі допустимі концентрації і високий вміст вуглецю дійсно шкідливі.

Пластичність сталі – це показник того, скільки їй можна надати форми або формування і наскільки маленькими можуть стати листи без руйнування. Це багато в чому визначається сумішшю матеріалів виливки і способом її формування. Як правило, відпущена або загартована сталь має більш високі рівні пластичності і здатність деформуватися без руйнування, ніж традиційна відпалена сталь, яка дає більш м'який метал [43].

Властивості литої сталі [15]:

- щільність – 7870 кг/м^3 ;
- модуль Юнга – 200 ГПа ;
- коефіцієнт Пуассона – $0,29$;
- межа міцності на розрив – $518,8 \text{ МПа}$;
- границя міцності на розрив 540 МПа ;
- межа міцності на крок – 415 МПа ;
- насипний модуль – 140 ГПа .

Композитний матеріал може бути охарактеризований як суміш двох або більшої кількості матеріалів, що дає переважні властивості порівняно з окремими сегментами, що використовуються окремо. Замість металевих композитів кожен матеріал має різні речовини, фізичні та механічні властивості.

Ці дві складові є підтримкою та основою. Основними сприятливими обставинами композиційних матеріалів є їх висока якість і міцність, ущільнені з низькою товщиною, у порівнянні з масовими матеріалами, з урахуванням зменшення ваги в готовій частині [44].

Арматурний етап надає якості та стійкості. За великим рахунком, укріплення є твердішим, більш обґрунтованим і жорсткішим, ніж сітка.

Армуванням, як правило, є волокно або тверді частинки. Тверді композити мають вимірювання, які приблизно еквівалентні у всіх підшипниках. Вони можуть бути круглими, трикутними або будь-якою іншою нормальною або непередбачуваною геометрією. Тверді композити мають тенденцію бути набагато слабшими та менш твердими, ніж композитні волокна, проте вони, як правило, істотно дешевші.

Основною причиною армування є підвищення якості та жорсткості, ніж композиту. У незмінному армованому волокнами композиті нитки надають в основному більшу частину якості та міцності. Дійсно, навіть у складах, укріплених молекулами, відбуваються критичні зміни.

Вуглецеві нитки демонструють пряме розтягування до розчарування, збільшення якості додатково передбачає збільшення подовження до розчарування. Отже, напрямки бізнесу демонструють збільшення до 2,2 %, що означає, що вони перевершують деформаційну здатність звичайних природних решіток.

Вуглецеві нитки доступні у різних виробничих та зовнішніх виробників у різноманітних структурах, що мають ще більш широкий спектр механічних властивостей. Найбільш ранні промислово доступні вуглецеві нитки були доставлені внаслідок термічного погіршення стану попередніх матеріалів із району. Процедура включала надзвичайно контрольовані кроки термічної обробки та тиску, щоб сформувати відповідну структуру вуглецю. Вуглецеві нитки додатково виготовляються з попередника для смоли для застосування форте. Властивості шару волокна зазвичай включають високий модуль і теплопровідність [45].

Епоксидні смоли часто використовуються в композитах, намотаних на нитки, а також придатні для формування додрукарської підготовки. Вони стійкі до дії хімічних речовин і чудово приєднуються, маючи повільну усадку в процесі затвердіння і відсутність викидів летких газів. Однак ці переваги роблять використання епоксидних смол досить дорогим. Крім того, їх не можна очікувати

понад температурні межі 140 °С. Вони використовуються в областях високих технологій, де робочі температури вищі, як результат, виключено. Епоксидні залізобетонні та вуглецеві армовані епоксидні конструкції та армовані склом застосовуються в мостових конструкціях та будівництві.

Області застосування матеріалів на основі епоксидної смоли широкі і включають покриття, цементи та композиційні матеріали, наприклад, ті, що використовують вуглецеві волокна та арматуру зі склопластику. Наука про епоксидні смоли та сферу фінансово доступних сортів дозволяють створювати полімери, що лікують, з надзвичайно широким діапазоном властивостей. Як правило, епоксидні смоли відомі своїм неймовірним зв'язком, речовиною та термостійкістю, великими фантастичними механічними властивостями і добрі електричні захисні властивості [46].

Властивості композитів (50 % вуглецевих волокон в матриці епоксидної смоли):

- щільність – 1800 кг/м³;
- модуль Юнга – 450 ГПа;
- коефіцієнт Пуассона – 0,30;
- міцність на крок – 52 МПа;
- міцність на стиск – 600 МПа.

Наповнений склом поліамід, або наповнений склом пластик, є формованим композитним матеріалом. Він містить короткі скляні нитки в матриці з полімерного матеріалу. Він використовується для виготовлення широкого спектру основних сегментів методом лиття під тиском або пресуванням.

Можуть бути використані як термопластичні, так і термореактивні полімери. Найвизначнішим серед найбільш широко використовуваних є нейлон. Основним литим композитом був бакеліт. При цьому використовували нитки деревного борошна як частину фенольної смоли. Оскільки волокна були досить короткими, цей матеріал мав помірно низьку якість маси, але в той же час підвищену твердість поверхні та велику формуваність.

На даний час у наповнених склом асортиментах створено широкий спектр полімерів, включаючи поліамід (нейлон), ацетальні гомополімери та сополімери, поліестер, поліфеніленоксид (PPO/Noryl), полікарбонат, поліетерсульфон. пасма, що постачаються для обрізки. Деякі термопластичні або термореактивні, інші штучно отверждаються і змішуються з імпульсом (поліестер) або затверджувачем (епоксидним) перед формуванням [47].

Властивості наповненого склом поліаміду:

- межа міцності: 5910 МПа;
- межа міцності на розрив: 38,1 МПа;
- співвідношення Пуассона: 0,314;
- щільність маси: 840 кг/м³;
- модуль зсуву: 3300 МПа.

Статичний структурний аналіз обчислює напруження, переміщення, деформації та сили в конструкціях, викликані навантаженнями що не викликає значних ефектів інерції та гасіння. Передбачається стійке навантаження та умови реагування; що навантаження та реакція конструкції, як передбачається, змінюються повільно щодо часу. Статичне структурне навантаження може виконувати за допомогою вирішувача ANSYS WORKBENCH. Типи навантажень, які можна застосувати при статичному аналізі, включають:

- стаціонарні інерційні сили;
- температура (для термічної деформації);
- зовні застосовувані сили та тиск;
- накладені переміщення (ненульові).

Програмне забезпечення для дизайну пропонує широкий спектр пристроїв, щоб надати епоху повного вдосконаленого представлення предмета, що проектується. Не зважаючи на загальні пристрої геометрії, додатково є можливість виробляти геометрію інших узгоджених навчальних контурів, наприклад, механічних та стандартних робіт з труб та обробки проводів. Апарати також доступні для сприяння вдосконаленню громади. Потім різні апарати плану

ідей, що надають заздалегідь сучасні ідеї, можна використовувати як частину подальшої процедури побудови предмета. Це поширюється на прикладі механічних контурних портретів, з'ясування інформації про хмари точок та вичерпних інструментів для вільного стилю. Моделі циліндричної шестерні та збірка циліндричних щестерен зображено на рис. 2.5, виготовляються за допомогою програмування Solidworks. Моделі демонструються наступним чином [47].

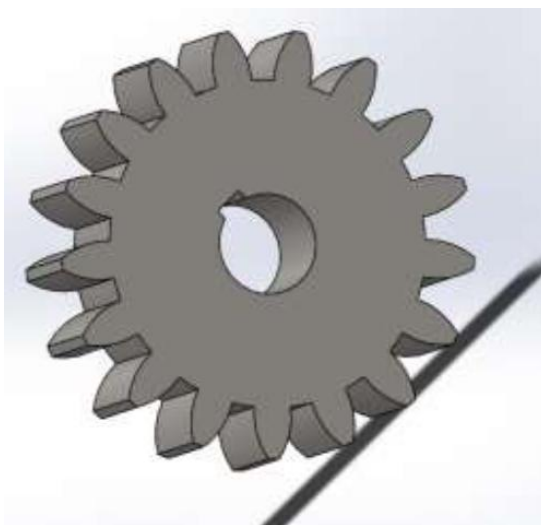


Рисунок 2.4 – Модель циліндричної шестерні

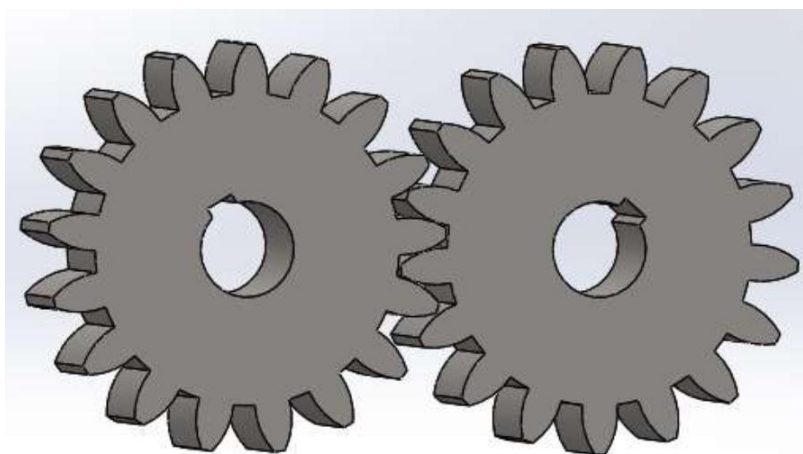


Рисунок 2.5 – Збірка циліндричної шестерні

Результати аналізу циліндричної шестерні у різних матеріалах. Звіт про литу сталеву циліндричну передачу за моменту $T = 140$ Нм зображено на рис. 2.6-2.8.

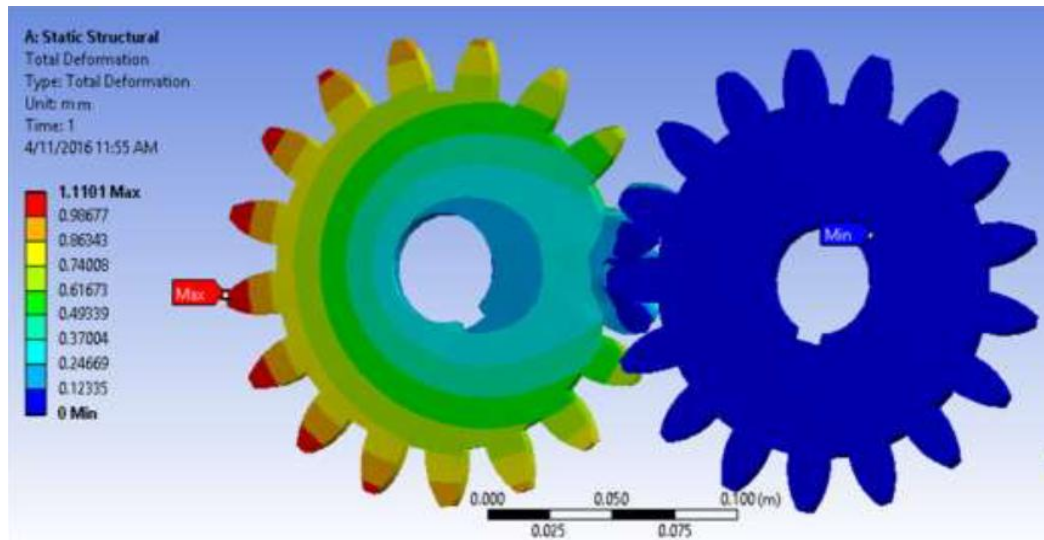


Рисунок 2.6 – Повна деформація у литій сталі

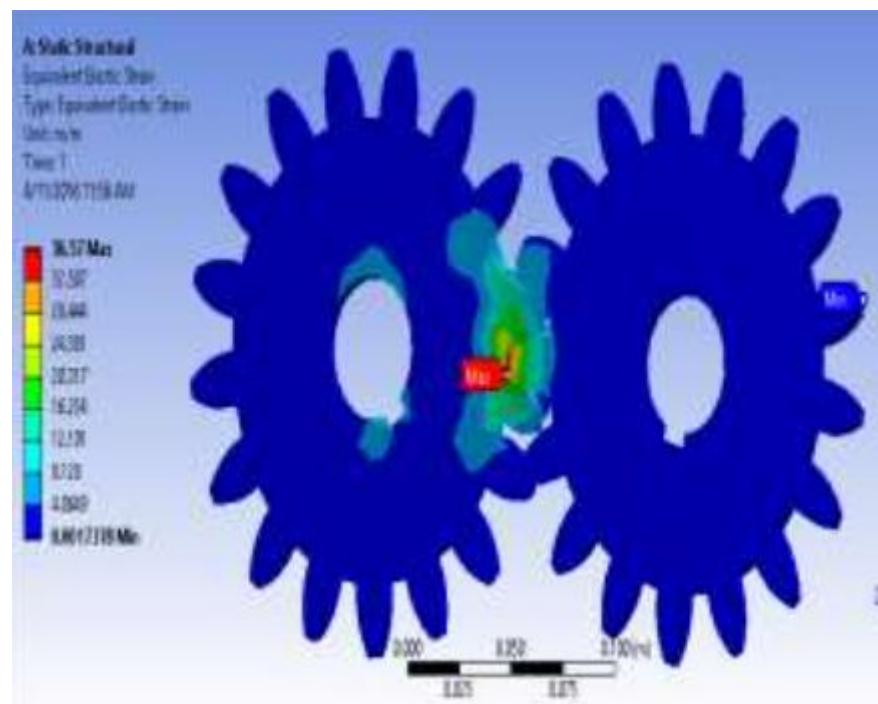


Рисунок 2.7 – Еквівалентна деформація литої сталі

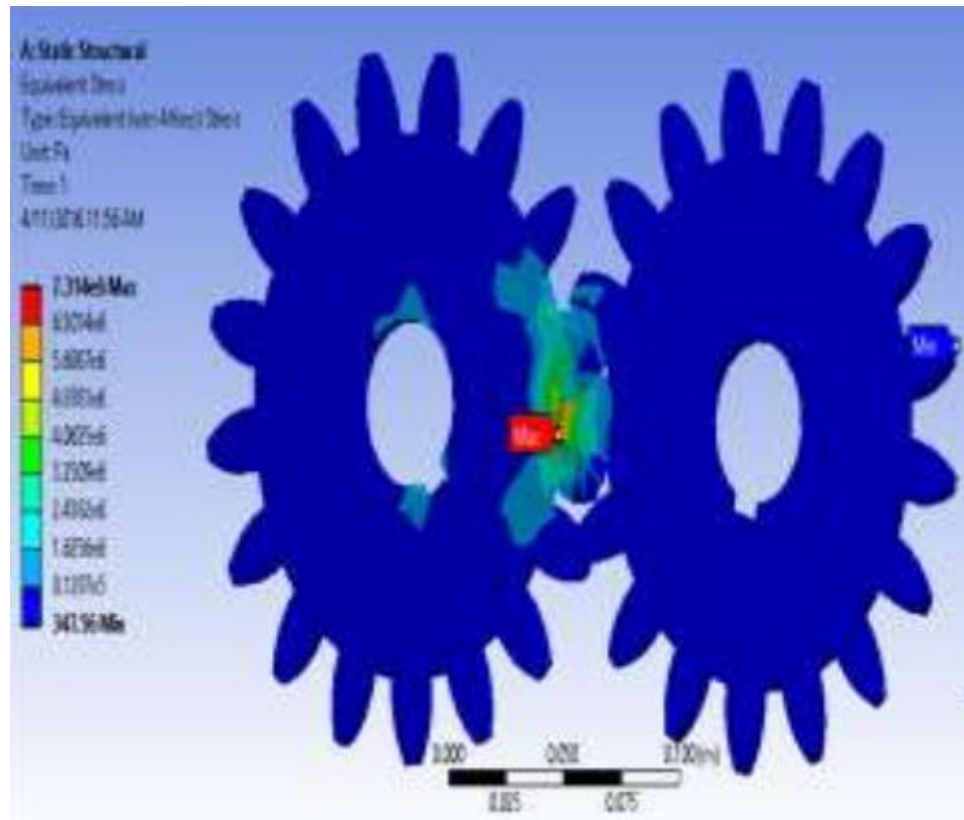


Рисунок 2.8 – Еквівалентне напруження литої сталі

Звіт про композитний матеріал (вуглецевий епоксид) Звіт про литу сталеву циліндричну передачу за моменту $T = 140$ Нм, зображено на рис. 2.9, 2.10.

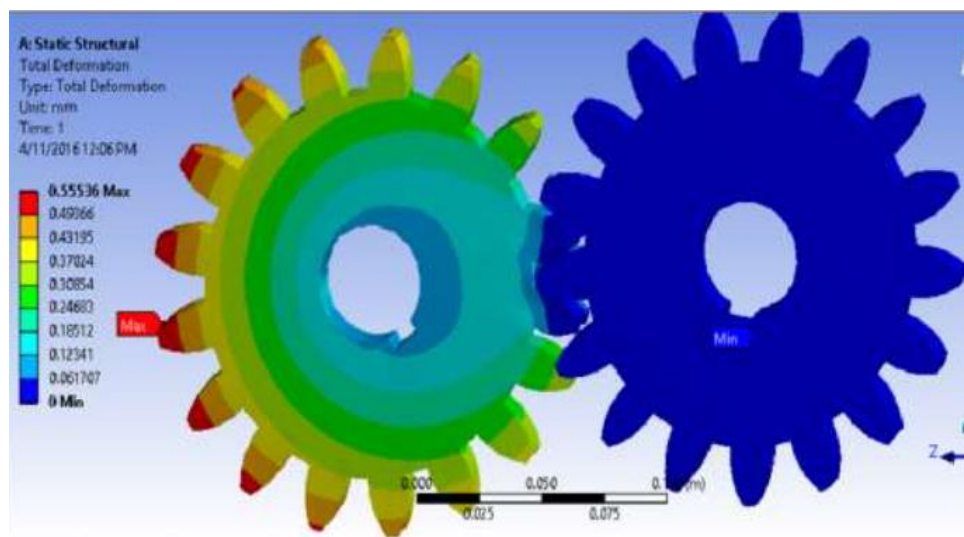


Рисунок 2.9 – Повна деформація вуглецевого епоксидного матеріалу

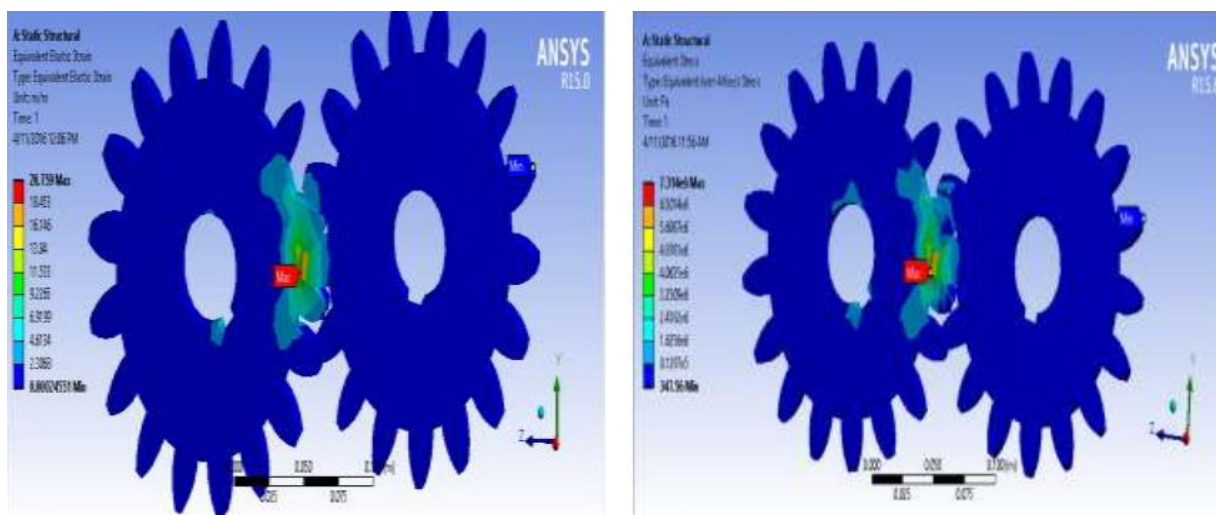


Рисунок 2.10 – Еквівалентний еластичний елемент вуглецевої епоксидної смоли та еквівалентне напруження вуглецевої епоксидної смоли

Таблиця 2.1 – Порівняння властивостей литої сталі з композитним матеріалом із вуглеця

	Лита сталь		Композит (вуглець)		Різниця
Обертний момент T , Нм	140	170	140	170	
Повна деформація	1,1101	1,601	0,55536	1,122	0,55474
Еквівалентна пружна деформація	36,57	59,933	20,759	39,921	15,811
Еквівалентне напруження	7,314e6	1,077e7	4,3417e6	9,417e6	2,973e6
Пружна деформація	66,341	80,204	31,002	58,214	35,339
Максимальне напруження зсуву	8,471e6	9,122e6	5,368e6	6,101e6	3,103e6

Результати аналізу композиційного матеріалу (наповнений склом поліамід)
 Звіт про литу сталеву циліндричну передачу за моменту $T = 140$ Нм зображено на
 рис. 2.11, 2.12.

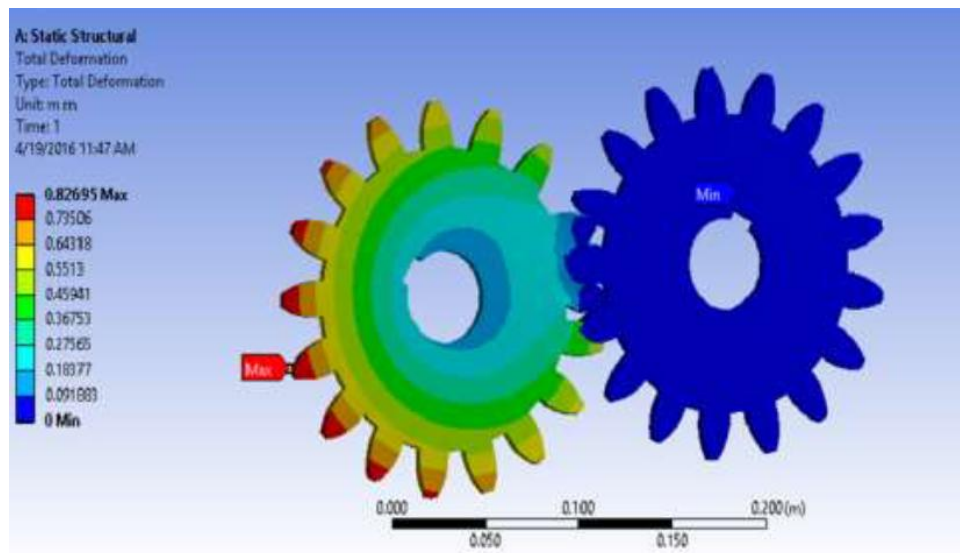


Рисунок 2.11 – Повна деформація в заповненому склом поліаміді

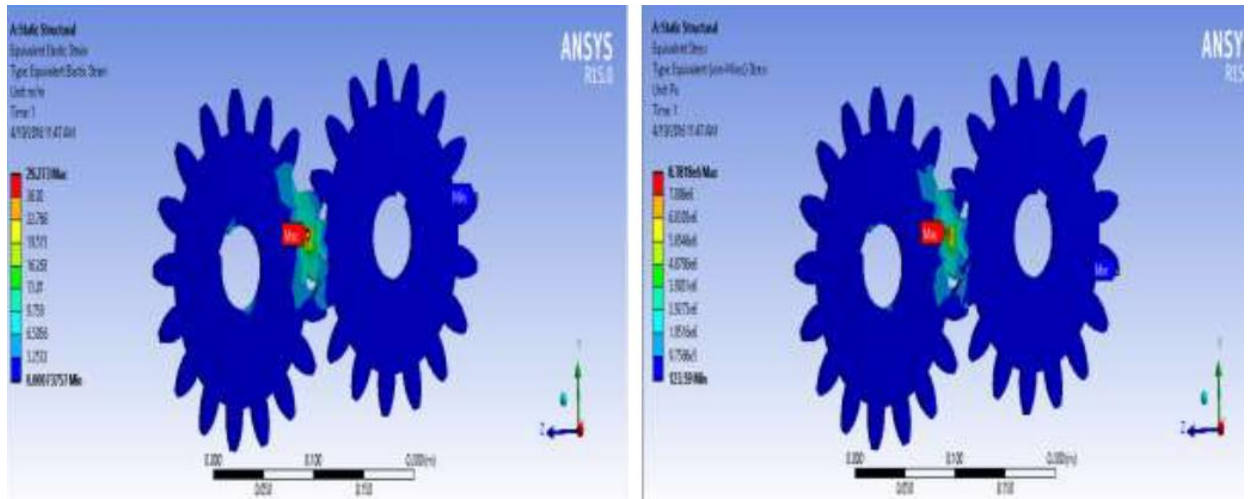


Рисунок 2.12 – Еквівалентна еластична деформація скляного поліаміду
 та еквівалентне напруження наповненого склом поліаміду

Таблиця 2.2 – Порівняння властивостей литої сталі та композиту поліаміду

	Лита сталь		Композит (поліамід із наповненим склом)		Різниця
	140	170	140	170	
Обертний момент T , Нм	140	170	140	170	
Повна деформація	1,1101	1,601	0,8269	1,324	0,2832
Еквівалентна пружна деформація	36,57	59,933	29,273	46,482	7,297
Еквівалентне напруження	7,314e6	2,077e7	5,7818e6	1,013e7	1,5322e6
Пружна деформація	66,341	80,204	44,346	69,682	21,339

Результати аналізу показують, що індуковані напруженням деформації та вага композитної шестерні менша ніж лита сталева циліндрична шестерня.

2.5 Висновки до другого розділу

У другому розділу виконано літературний огляд композиційного механізму. Проведено дослідження розподілу напруження та зменшення ваги циліндричної шестерні для композиційних матеріалів і литої сталі.

На основі дослідження проводиться аналіз як композиційних матеріалів, так і литої сталі при застосуванні редуктора, який використовується в автоматизованому виробництві. З цього аналізу ми виявили, що значення напруження для композиційних матеріалів менші порівняно з литим сталевим циліндричним механізмом.

Отже, за результатами аналізу зроблено висновок, що індуковані напруження деформації та вага композитної циліндричної шестерні менші порівняно з литою сталевією циліндричною шестернею. Отже, композиційні матеріали можуть застосовуватись зубчатих передачах замість існуючих шестерень із литої сталі з кращими результатами.

3 МОДЕЛЮВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ЗУБЧАТОЇ ПЕРЕДАЧІ

3.1 Проектування зубчатих колес з композиційних матеріалів в автоматизованому виробництві

Основне призначення зубчатих механізмів – передача обертання та крутного моменту між осями. Головним напрямком дослідження стає оптимальна конструкція, модифікація зубів, аналіз напружень зубів шестерні при зменшеній вазі, але при збільшенні міцності в зубчастій передачі.

Виконаємо проектування циліндричної зубчатої передачі, яка складається з ведомої шестерні та введеної. При цьому необхідно провести порівняльний аналіз напружено-деформованого стану конструкції цієї зубчатої передачі для двох варіантів матеріалів – литої сталі та композитного матеріалу.

Для проектування зубчатої шестерні обрано композиційний матеріал – вуглецеве волокно високого модулю марки UMT 400. Даний композит має такі характеристики:

- щільність 4,2 ГПа
- модуль Юнга – 400 ГПа;
- коефіцієнт Пуассона – 0,2.

Виходячи з аналізу предметної області, визначено, що для того, щоб конструкція була безпечною, для проектування циліндричної шестерні необхідно виконати проектні розрахунки для введеної шестерні та ведомої.

Для розрахунку властивостей зубів ведомої шестерні нам необхідно обчислити діаметр кроку кола:

$$D = 22 \cdot 10 = 220 \text{ мм.}$$

Знаючи діаметр кроку кола, можемо обчислити діаметр основного кола:

$$D_b = 220 \cdot \cos 20 = 206,58 \text{ мм.}$$

Для знаходження діаметру зовнішнього кола скористаємося виразом:

$$D_a = (22 + 2) \cdot 10 = 240 \text{ мм.}$$

Для знаходження дедендума, тобто глибини зуба під кроком кола, необхідно знайти зазор:

$$S = 31,4 / 20 = 1,57 \text{ мм.}$$

Щоб знайти дедендум, використовуємо вираз:

$$D_e = 10 + 1,57 = 11,57 \text{ мм.}$$

Для розрахунку властивостей зубів введеної шестерні нам необхідно обчислити діаметр кроку кола:

$$D = 12 \cdot 10 = 120 \text{ мм.}$$

Знаючи діаметр кроку кола, можемо обчислити діаметр основного кола:

$$D_b = 120 \cdot \cos 20 = 112,68 \text{ мм.}$$

Для знаходження діаметру зовнішнього кола скористаємося виразом:

$$D_a = (11 + 2) \cdot 10 = 130 \text{ мм.}$$

Для знаходження дедендума, тобто глибини зуба під кроком кола, необхідно знайти зазор:

$$S = 31,4 / 20 = 1,57 \text{ мм.}$$

Щоб знайти дедендум, використовуємо вираз:

$$D_e = 10 + 1,57 = 11,57 \text{ мм.}$$

3.2 Аналіз напружено-деформованого стану конструкції

У програмі ANSYS проведено проектування зубчатої циліндричної передачі, конструкція якої зображена на рисунку 3.1.

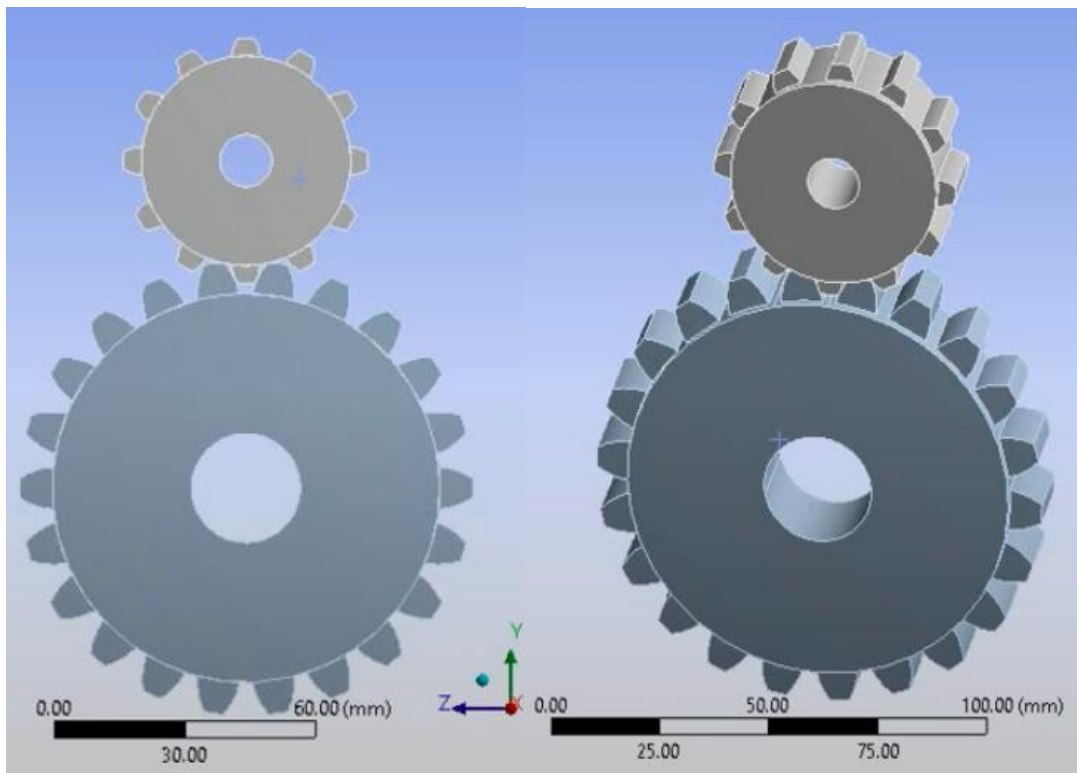


Рисунок 3.1 – Спроекована у програмі ANSYS конструкція циліндричної передачі

Для зубчатої шестерні зі сталевого матеріалу проведено дослідження її напружено-деформованого стану, результати наведено на рисунку 3.2.

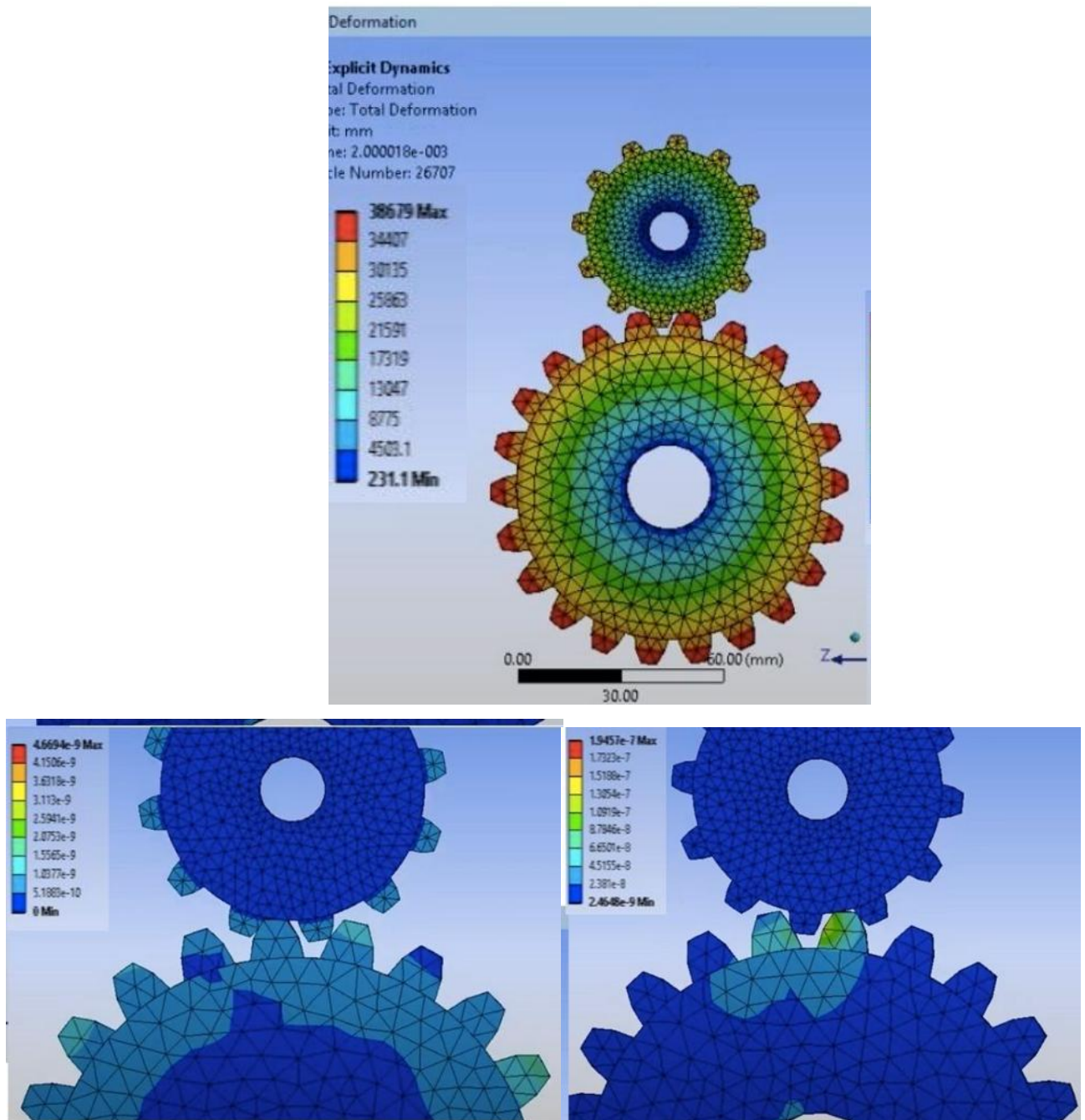


Рисунок 3.2 – Деформація сталевго матеріалу

Аналогічний звіт про композитний матеріал (вуглець) наведено на рисунку 3.3.

У таблиці 3.1 наведено результати моделювання напружено-деформованого стану матеріалів проєктованої конструкції зубчатої передачі.

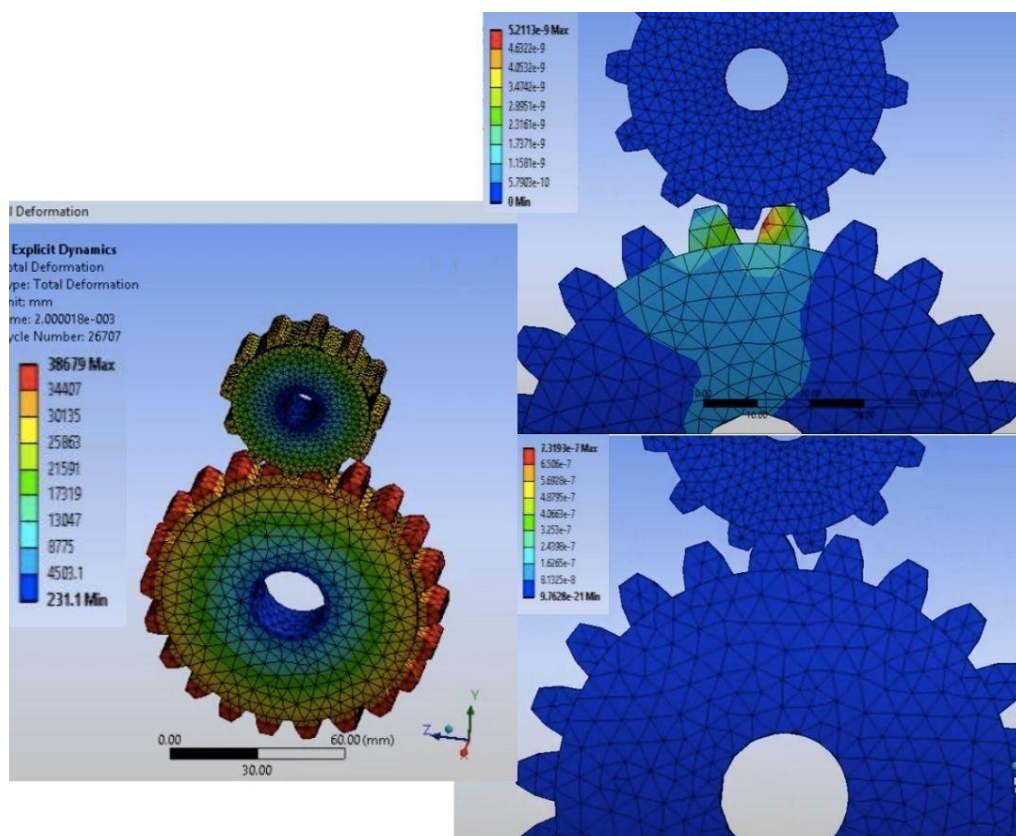


Рисунок 3.3 – Деформація композиту (вуглець)

Таблиця 3.1 – Результати моделювання у програмі ANSYS

	Лита сталь		Композит (вуглець)	
	Мінімум	Максимум	Мінімум	Максимум
Повна деформація, мм	0	0,050307	0	0,0047467
Еквівалентна пружна деформація, Па	9,765411e7	2,39	2,9338e7	0,00044866
Еквівалентний стрес	6,11679	179,2	0,11735	179,46

За результатами моделювання у програмі ANSYS побудовано графіки залежностей, які дозволяють виконати порівняння механічних властивостей сталі та композитного матеріалу.

На рисунку 3.4 наведено залежності рівня еквівалентної пружної деформації матеріалів від обертового моменту.

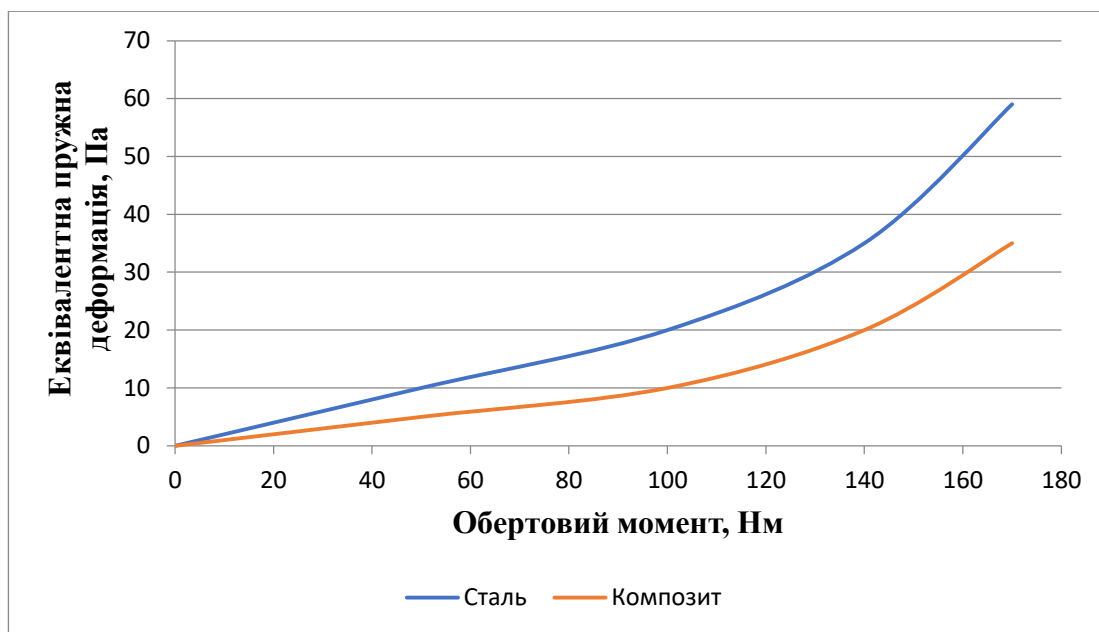


Рисунок 3.4 – Порівняльна характеристика рівня пружних деформацій для сталі та композиту

На рисунку 3.5 наведено графік зміни навантаження у сталі та композиті у залежності від розтягнення.

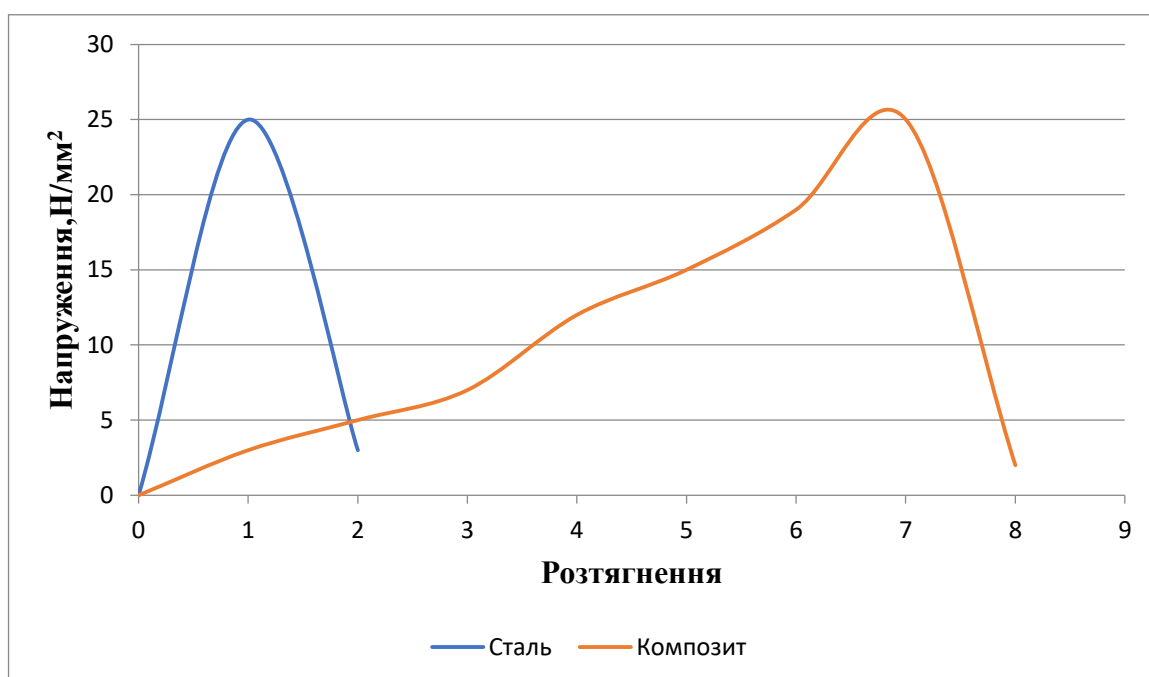


Рисунок 3.5 – Графік зміни напруження у сталі та композиті у залежності від розтягнення

З побудованої залежності можна зробити висновок, що у процесі розтягування у сталі швидше відбувається досягнення критичних механічних навантажень, ніж у композиті.

3.3 Ідентифікація математичних моделей.

Із графіків залежності отриманими під час моделювання, ідентифікуємо взаємозв'язок між обертовим моментом та напруження, повної деформації та еквівалентної пружності деформації.

X – обертовий момент;

$Y1$ – напруження;

$Y2$ – повна деформація;

$Y3$ – еквівалентна пружна деформація.

Вхідні значення моделі зв'язано з її вихідними даними залежністю:

$$y_1(x) = F[y(x), q, 0] \quad (3.1)$$

де F – оператор моделі;

$y(x) = x$, $y_1(x)$ – вхідні та вихідні данні;

q – вектор параметрів моделі, $q = (q_0, q_1, \dots, q_m)$.

Вибір моделі здійснюється по множині поліномів

$$F_m = q_0 x + q_1 x^2 + \dots + q_m x^m \quad (3.2)$$

де m – ступінь поліному моделі.

В якості критерія близькості використовувати мінімум суми квадратів відхилення результативних факторів моделі $y_m(x)$ від системи $y(x)$.

$$K = \sum_{i=1}^n [y_i - y_{mi}]^2 = \sum_{i=1}^n \{y(x_i) - F_m[y_m(x, q, 0)]\}^2 \rightarrow \min \quad (3.3)$$

N – кількість результативних показників.

Найкраще значення параметрів моделі являються рішеннями системи рівнянь.

$$\begin{aligned} q_0 \sum_{i=1}^n x^{2m} + q_1 \sum_{i=1}^n x^{2m-1} + \Lambda + q_m \sum_{i=1}^n x^m &= \sum_{i=1}^n x^m y_i; \\ q_0 \sum_{i=1}^n x^{2m-1} + q_1 \sum_{i=1}^n x^{2m-2} + \Lambda + q_m \sum_{i=1}^n x^{m-1} &= \sum_{i=1}^n x^{m-1} y_i; \\ q_0 \sum_{i=1}^n x^m + q_1 \sum_{i=1}^n x^{m-1} + \Lambda + q_m \sum_{i=1}^n x^0 &= \sum_{i=1}^n y_i, \end{aligned} \quad (3.4)$$

де n – кількість спостережуваних сигналів (експериментів).

За результатами моделювання побудовано лінійний графік залежності обертового моменту та напруження (рис. 3.6).

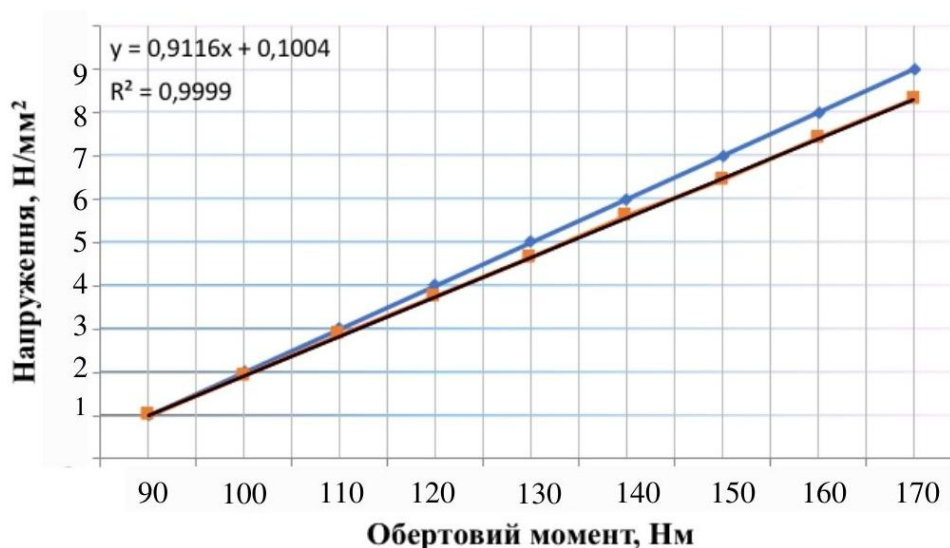
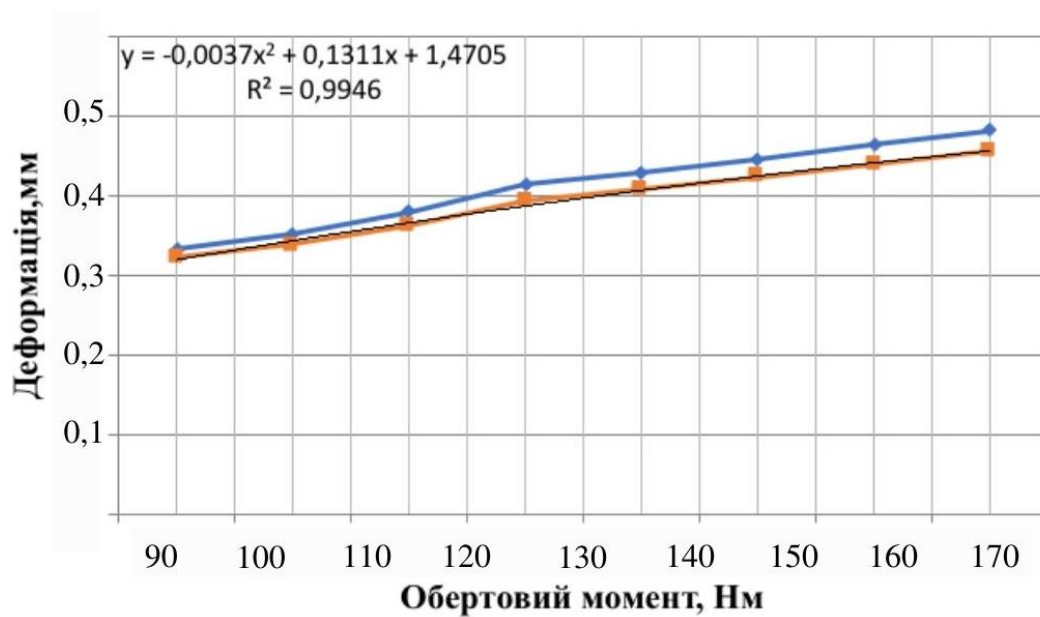


Рисунок 3.6 – Графік залежності напруження від обертового моменту

На рисунку 3.7 наведено графік залежності деформації від обертового моменту



Риснок 3.7 – Графік залежності деформації від обертового моменту

На рисунку 3.8 наведено графік залежності еквівалентної пружної деформації від обертового моменту.

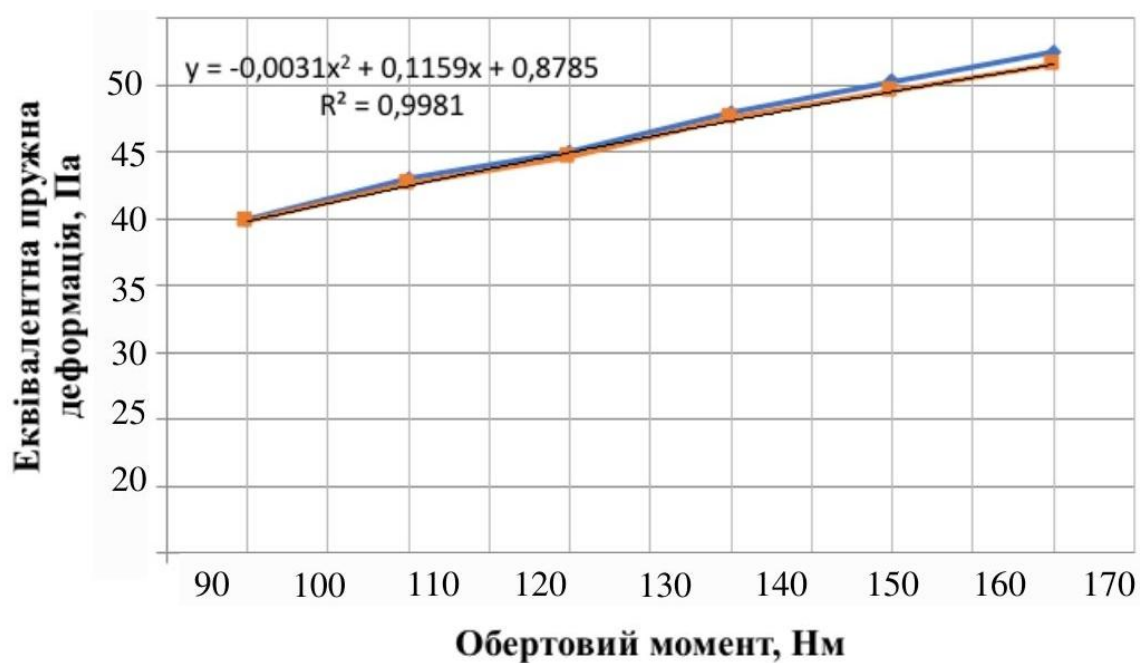


Рисунок 3.8 – Графік залежності еквівалентної пружної деформації від обертового моменту

Таким чином проведено ідентифікація математичних моделей:

– математична модель залежності напруги від обертового моменту:

$$y(x) = 0.9116x + 0.1004 \quad (3.5)$$

– математична модель деформації від обертового моменту:

$$y = 0,0979x + 1,5259 \quad (3.6)$$

– математична модель залежності еквівалентної пружної деформації від обертового моменту:

$$y = y = 0,0979x + 1,5259 \quad (3.7)$$

В ході проведення ідентифікації відповідно до результатів моделювання отримані математичні моделі, які дозволяють описати залежності впливу зміни обертового моменту на зубчасту передачу.

3.4 Висновки до третього розділу

Таким чином, проведено проектування зубчатої шестерні та порівняно матеріали композита (вуглецевого волокна високого модулю) та литої сталі. Порівнюючи сталь і композит, можна зробити висновок, що вуглецеве волокно має високий модуль, тож матеріал підходить для виготовлення циліндричних передач, матеріал має низькі значення сумарних деформацій, напружень.

Проведено індексація математичних моделей, які дозволяють описати залежності обертового моменту на зубчату передачу.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ

Аналіз умов праці проводиться для приміщення конструкторського бюро. Приміщення конструкторського бюро, в якому розміщені робочі місця операторів ЕОМ, має наступні параметри: висота 4,5 м, ширина 11 м, довжина 20 м, площа 220 м², об'єм 990 м³. У приміщенні розташовано 9 робочих місць, одночасно в приміщенні працює 9 чоловік. На кожне робоче місце припадає по одному ПК, загальна споживана потужність обладнання складає 6,3 кВт. Електроживлення конструкторського бюро здійснюється від трифазної чотирихпровідної мережі змінного струму з напругою 380/220 В, частотою 50 ± 1 Гц із глухозаземленою нейтраллю.

Згідно ДСН 3.3.6-042-99 робота у конструкторському бюро по категорії робіт відноситься до легких (категорія I_a – легкі фізичні роботи з енерговитратами до 139 Вт або 120 ккал/год). Робота виробляється сидячи, не вимагає систематичного фізичного напруження і переміщення важких предметів.

У робочій зоні приміщення згідно з ДСН 3.3.6.042-99 мають бути встановлені оптимальні поєднання параметрів мікроклімату. Для категорії робіт I_a в приміщенні повинні дотримуватися такі норми мікроклімату:

- температура повітря не повинна перевищувати 22-24 °С у теплий період і 23-25 °С в холодний період;
- відносна вологість повинна бути в межах 40-60 %;
- швидкість руху повітря не повинна перевищувати 0,1 м/с.

Для забезпечення оптимальних параметрів мікроклімату застосовується кондиціонування.

Рівень загального штучного освітлення приміщення конструкторського бюро можна перевірити за допомогою методу питомої потужності. Питома потужність освітленості розраховується за формулою:

$$W = \frac{W_{\Sigma}}{S}, \quad (4.1)$$

де W – питома потужність, Вт/м²;

S – площа приміщення, $S = 220$ м²;

W_{Σ} – загальна потужність освітлювальної установки (Вт), розраховується за формулою:

$$W_{\Sigma} = W_{cb} \cdot n_{cb}, \quad (4.2)$$

де W_{cb} – потужність одного світильника, $W_{cb} = 40$ Вт;

n_{cb} – кількість світильників у приміщенні, $n_{cb} = 3$.

Розраховуємо загальну потужність освітлювальної установки:

$$W_{\Sigma} = 40 \cdot 3 = 1200 \text{ Вт}$$

Розраховуємо питому потужність освітленості:

$$W = \frac{1200}{220} = 5,45 \text{ Вт/м}^2$$

Згідно ДБН В.2.5-28-2006 для приміщень конструкторських бюро застосовується сполучений тип освітлення, рекомендоване штучне освітлення при роботі з монітором становить 300–500 лк за умови використання люмінесцентних світильників білого кольору. Розрахована питома потужність забезпечує освітленість не менше 400 лк.

ВИСНОВКИ

В атестаційній роботі магістра проведено аналіз сучасних конструкцій і характеристик зубчатих коліс з композиційних матеріалів. Композиційні матеріали утворюються комбінуванням двох або більше матеріалів, що мають досить різні властивості, і вони не розчиняються і не змішуються один з одним. Різні матеріали в композиті працюють разом, щоб надати композиту унікальні властивості.

У другому розділі був огляд композиційного механізму. Проведено дослідження розподілу напруження та зменшення ваги циліндричної шестерні з композиційних матеріалів та литої сталі.

На основі дослідження проводився аналіз як композиційних матеріалів, так і литої сталі при застосуванні редуктора, який використовується в автоматизованому виробництві. З цього аналізу ми виявили, що значення напруження для композиційних матеріалів менші порівняно з литим сталевим циліндричним механізмом.

Отже, індуквані напруженням деформації та вага композитної циліндричної шестерні менші порівняно з литою сталевую циліндричною шестернею. Отже, композиційні матеріали можуть застосовуватись в зубчатих передачах, замість існуючих шестерень із литої сталі з кращими результатами.

У третьому розділі проведено раціональне проектування циліндричної зубчатої передачі, порівняно матеріали композита (вуглецевого волокна високого модулю) та литої сталі. Порівнюючи сталь і композит, можна зробити висновок, що вуглецеве волокно має високий модуль, тож матеріал підходить для виготовлення циліндричних передач, матеріал має низькі значення сумарних деформацій, напружень. Проведено індексація математичних моделей за допомогою якої можна описати залежності обертового моменту на зубчату передачу.

У четвертому розділі розглянуто питання охорони праці, проведені розрахунки необхідного рівня загального освітлення приміщення у приміщенні конструкторського бюро.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Кривуля О. М. Аналіз показників якості зубчатих коліс / Кривуля О. М. // Автоматизація та приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» (ADED-2020) збірник студентських наукових статей (Випуск 2) – Харків: ХНУРЕ, 2020. – С. 48–52.

2. Методичні вказівки до підготовки атестаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І. Ш. Невлюдов, О. В. Токарева, Г. В. Пономарьова – Харків: ХНУРЕ, – 2018. – 34 с.

3. Дипломне проектування для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: Навч. посібник / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, О. В. Токарева, Г. В. Пономарьова. – Київ, 2016. – 320 с.

4. ДСТУ 3008-2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлення. – К.: Вид-во стандартів, 2016. – 26 с.

5. Дмитриев Ф. С. Проектирование редукторов точных приборов. Справочное пособие / Ф. С. Дмитриев. – Л.: Машиностроение, 1971. – 372 с.

6. Пластмассовые зубчатые колеса в механизмах приборов. Расчет и конструирование. Справочное и научное издание / Старжинский В. Е., Тимофеев Б. П., Шалобаев Е. В., Кудинов А. Т. Под общ. Ред. В. Е. Старжинского и Е. В. Шалобаева // Санкт-Петербург-Гомель: ИММС НАН Белоруссии, 1998. – 538 с.

7. Основи наукових досліджень: Навчальний посібник / І.Ш.Невлюдов, Ю.М. Олександров, А.О. Андрусевич, О.О. Чала – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019 – 396 с.

8. Технічні засоби автоматизації: Підручник / І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.І. Филипенко, Н.П. Демська, С.П. Новоселов – Кривий Ріг: Криворізький коледж НАУ, 2019 – 366 с.

9. Невлюдов І.Ш. Людино – машинний інтерфейс в технічних засобах автоматизації: Навчальний посібник / І.Ш. Невлюдов, О.І. Филипенко, Б.О. Шостак – Харків: «ХТМТ», 2019 – 244 с.

10. Благодарный В. М. Расчет мелко модульных зубчатых передач на износ и прочность / В. М. Благодарный. – М.: Машиностроение, 1985. – 126 с.

11. Истомин С.Н. Проектирование мелко модульных передач приборов с применением ЭВМ / С.Н. Истомин. – М.: Машиностроение, 1985. – 176 с.

12. Зубчатые передачи в приборах. Учебное пособие / А. М. Политавкин, Е. В. Шалобаев, Г. В. Замоуев, В. В. Симаков. – Л.: ЛИТМО, 1985. – 88 с.

13. Шалобаев Е. В., Медунецкий В. Е. Зубчатые передачи в исполнительных механизмах машиностроения и приборостроения. Монография / Под ред. Е.В. Шалобаева. – Санкт-Петербург: изд-во СПбГУ ИТМО, 2010. – 268 с.

14. Lee S.C. A study of the design and manufacturing technology for precision plastic gears / S.C. Lee // Seoul: KIST, 1984.

15. Caggiano A. Machining of Fibre Reinforced Plastic Composite Materials / A. Caggiano // Materials, 2018. – 11. – pp. 442–462.

16. Режущий инструмент / Кожевников Д. В., Гречишников В. А., Кирсанов С. В., Кокарев В. И., Схиртладзе А. Г. Под редакцией С. В. Кирсанова. 3-е изд. – М.: Машиностроение, 2007. – 528 с.

17. Механическая обработка пластмасс. Фрезерование / Семко М. Ф., Баскаков И. Г., Дрожжин В. И., Качер В. А. – М.: Машиностроение, 1965. – 131 с.

18. Ahmad J. Machining of polymer composites. – Springer Science & Business Media, 2009. – 230 p.

19. Степанов А. А. Обработка резанием высокопрочных композиционных полимерных материалов / А. А. Степанов. – Л.: Машиностроение, 1987.– 176 с.

20. Семко М. Ф. Обработка резанием электроизоляционных материалов / М. Ф. Семко, Г. К. Сустан, В. И. Дрожжин. – М.: Энергия, 1974. – 176 с.
21. Криворучко Д. В. Современные достижения в области изготовления зубчатых колес из композиционных материалов / Д. В. Криворучко, И. О. Осадчий // Резание и инструмент в технологических системах, 2014. – № 14. – С.134–144.
22. Старжинский В. В. Технология производства зубчатых колес из термопластичных полимерных материалов (обзор) / В. В. Старжинский, С. В. Шилько, Е. В. Шалобаев // Полимерные материалы, 2018. – Т.4, №2. – С. 6–31.
23. Андреев М. В. Особенности высокоскоростной обработки полимерных композиционных материалов / М. В. Андреев, А. А. Щитюк // Ползуновский альманах, 2016. – № 4. – pp. 89–93.
24. Бабай С. О. Підвищення ефективності механічної обробки виробу з вугле-органопластика / С. О. Бабай, А. П. Тарасюк // Машинобудування, 2010. – № 5. – pp. 77–86.
25. Рыбак Л. А. Новые технологии высокоскоростной механической обработки на станках с параллельной кинематикой / Л. А. Рыбак, Е. В. Гапоненко, Ю. А. Мамаев // Современные проблемы науки и образования, 2012. – № 6. – pp. 55–63.
26. Hocheng, H. Machining Technology for Composite Materials / Woodhead Publishing: Cambridge, UK, 2012.
27. High-quality machining of CFRP with high helix end mill / Hosokawa A., Hirose N., Ueda T., Furumoto T. // CIRP Annals, 2014. – 63. – pp. 89–92.
28. Gara, S.; M'hamed, S.; Tsoumarev, O. Temperature measurement and machining damage in slotting of multidirectional CFRP laminate // Mach. Sci. Technol., 2018. – №22. – pp. 320–337.

29. Multiple Regression and Committee Neural Network Force Prediction Models in Milling / Sheikh-Ahmad J., Twomey J., Kalla D., Lodhia P. // *FRP. Mach. Sci. Technology*, 2007. – 11. – pp. 391–412.

30. Gara, S.; Tsoumarev, O. Effect of tool geometry on surface roughness in slotting of CFRP // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2016. – № 86. – pp. 451–461.

31. Azmi, A.I.; Lin, R.J.T.; Bhattacharyya, D. Machinability study of glass fibre-reinforced polymer composites during end milling // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2013. – № 64. – pp. 247–261.

32. Ghafarizadeh, S.; Chatelain, J.F.; Lebrun, G. Finite element analysis of surface milling of carbon fiber-reinforced composites // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2016. – №87. – pp. 399–409.

33. He Y., Qing H., Zhang S., Wang D., Zhu S. The cutting force and defect analysis in milling of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composite // *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, № 93. – pp. 1829–1842.

34. Iskandar Y., Tendolkar A., Attia M.H., Hendrick P. Flow visualization and characterization for optimized MQL machining of composites // *CIRP Ann.*, 2014. – № 63. – pp. 77–80.

35. Hintze W., Hartman D. Modeling of Delamination During Milling of Unidirectional CFRP // *Procedia CIRP*, 2013. – № 8. – pp. 444–449.

36. Geis, T.; Klingelhöller, C.; Hintze, W. Constant Depth Scoring of Fibre Reinforced Plastic Structures to Prevent Delamination // *Procedia CIRP*, 2014. – № 14. – pp. 205–210.

37. Hintze W., Cordes M., Geis T., Blühm M. Laser Scored Machining of Fiber Reinforced Plastics to Prevent Delamination // *Procedia Manuf.*, 2016. – № 6. – pp. 1–8.

38. Медунецкий В. М. Обеспечение качественных показателей комбинированных цилиндрических передач. – СПб: Политехника, 2002. – 160 с.

39. Медунецкий В. М., Горбунов С. А. Вопросы изготовления малогабаритных зубчатых передач с нестандартными параметрами // *Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО*, 2007. – № 44. – С. 181–185.

40. Тимофеев Б. П., Фролов Д. А. Расчет геометрических параметров цилиндрических эвольвентных передач с несимметричными зубьями // Теория механизмов и машин. – СПб: СПбГПУ, 2005. – Т. 3, № 2 (6). – С. 15–29.
41. Chmielik P., Czarnecki H. Evaluation of gear tooth 3D surface topography. *Mechanic*, 2015. – № 7. – pp. 101–110.
42. Boral P. Technological determinants of the teething geometry of worm gears with either a fixed or variable pitch worm // *Czestochowa University Press of the Czestochowa University of Technology*, 2018.
43. Step-by-Step Machining of Spur Gears with Longitudinal Tooth Modification / Nieszporek T., Piotrowski A., Boral P. & Potiomkin K. // *Theory and Practice of Industrial and Production Engineering*, 2015. – № 791. – pp. 272–280.
44. Talar R., Stoic A. Finish machining of hardened gears wheels using cubic boron nitride (CBN) inserts // *Metalurgija*, 2012. – V. 51, № 2. – pp. 253-256.
45. Nieszporek T. Cutting tool design and external cylindrical toothing technology // *Czestochowa University Press of the Czestochowa University of Technology*, 2013.
46. Stryczek R., Pytlak B. Flexible programming of machine tools // *Warsaw: PWN*, 2011.
47. Nieszporek T., Gołębski R., Boral P. Shaping the Helical Surface by the Hobbing Method // *Procedia Engineering*, 2017. – № 177. – pp. 49–56.
48. Skoczylas L. New possibilities for gear wheel machining // *Mechanik*, 2017. – № 12. – pp.1018–1020.
49. Litvin F. L., Fluntes A. *Gear Geometry and Applied Theory* // *Cambridge University Press*, 2004.
50. Старжинский В. Е., Шалобаев Е. В, Шилько С. В. [и др.]. Элементы приводов приборов. Расчет, конструирование, технологии / под общ. ред. Ю. М. Плескачевского. – Минск: Беларуская навука, 2012. – 769 с.

51. Антонюк В. Е. [и др.]. Технология производства и методы обеспечения качества зубчатых колес и передач: учебное пособие / под общ. ред. В. Е. Старжинского и М. М. Кане. – СПб.: Профессия, 2007. – 232 с.

52. Зубчатые передачи и трансмиссии в Беларуси: проектирование, технология, оценка свойств / под общ. ред. В. Б. Альгина и В. Е. Старжинского. – Минск: Беларуская навука, 2017. – 406 с.

53. Hooke S. J., Mao K., Walton D. Measurement and prediction of the surface temperature in polymer gears and its relation to surface wear // Journal of Tribology, 1993. – № 115 (1). – pp. 119–124.

54. Скудра А. М., Булавс Ф. Я. Прочность армированных пластиков. – М: Химия, 1982. – 216 с.

55. Осадчий И. О., Криворучко Д. В., Родин И. С. Интегрированная технология изготовления зубчатых колес из волокнистых полимерных композиционных материалов // Журнал инженерных наук, 2014. – Т.1, № 2. – С. 19–24.