

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ФАКУЛЬТЕТ ІНЖЕНЕРІЇ, ТРАНСПОРТУ ТА АРХІТЕКТУРИ  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### «Модернізація карданної передачі автомобіля Toyota Qualis шляхом заміни матеріалу»

Рівень вищої освіти перший бакалаврський  
Галузь знань 13 Механічна інженерія  
Спеціальність 132 Матеріалознавство  
Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

Шифр КвРМТВА. 21154.01.07.00

Виконав студент 4 курсу група МТВА-21-1

  
Підпис

Сергій МАМЧУР

Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ

  
Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

Нормоконтролер к.т.н., доцент каф. ТАМ

  
Підпис

Олег БАБАК

До захисту допускаю:  
Завідувач кафедри ТАМ

12.01.25

Дата

  
Підпис

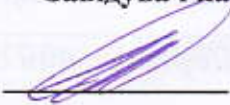
Олександр ДИХА

Хмельницький, 2025

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет інженерії, транспорту та архітектури  
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства  
Рівень вищої освіти перший бакалаврський  
Галузь знань 13 Механічна інженерія  
Спеціальність 132 Матеріалознавство  
Освітня програма Відновлення та технічний сервіс автомобілів

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри ТАМ

  
Диха О.В.  
20.02 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Мамчуру Сергію Леонідовичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: *Модернізація карданної передачі автомобіля Toyota Qualis шляхом заміни матеріалу.*

керівник роботи: Посонський Сергій Феліксович, доцент каф. ТАМ.

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

Затверджено наказом університету від 7.02.2025 р. № 23 (Д 14)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.06.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) *Матеріали курсових проектів, робіт, практики.*

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

1) Аналіз конструкції та умов роботи карданної передачі автомобіля Toyota Mark Qualis.

2) Композитний карданний вал автомобіля.

3) Порівняльний аналіз сталевого та композитного карданних валів.

4) Висновки, рекомендації

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

Розробити презентацію у вигляді слайдів з розкриттям питань відповідно до мети роботи.

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 21.04 2025 р.

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН


№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	<i>Аналіз конструкції та умов роботи карданної передачі автомобіля Toyota Mark Qualis</i>	4.05.25	вик
2	<i>Композитний карданний вал автомобіля</i>	16.05.25	вик
3	<i>Порівняльний аналіз сталевого та композитного карданних валів</i>	26.05.25	вик
4	<i>Висновки, рекомендації</i>	10.06.25	вик
5	<i>Оформлення пояснювальної записки</i>	12.06.25	вик
6	<i>Допуск до захисту</i>	14.06.25	вик
7	<i>Захист дипломної роботи</i>	18.06.25	

Студент

  
Підпис

*Сергій МАМЧУР*

Керівник кваліфікаційної роботи

  
Підпис

*Сергій ПОСОНСЬКИЙ*

## РЕФЕРАТ

Студент групи МТВА-21-1 Мамчур Сергій Леонідович.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Дипломна робота на тему «Модернізація карданної передачі автомобіля Toyota Qualis шляхом заміни матеріалу» складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 15 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 13 сторінках. Роботу викладено на 76 сторінках, з них 70 сторінок основного тексту, на яких розміщено 51 рисунок і 9 таблиць.

Двокомпонентний сталевий карданний вал складається з трьох універсальних шарнірів, центрального опорного підшипника та кронштейна, які збільшують загальну вагу автомобіля. Передача потужності може бути покращена за рахунок зменшення інерційної маси та легкої ваги. Заміна звичайних металевих конструкцій на композитні має багато переваг через вищу питому жорсткість і більшу питому міцність композитних матеріалів.




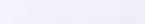
Мета роботи: виконати модернізацію карданної передачі автомобіля Toyota Qualis шляхом заміни сталевого карданного валу на композитний.

Методом скінченних елементів вдалось встановити, що використання композитного матеріалу призвело до економії ваги в 28 % у порівнянні зі звичайним сталевим. Беручи до уваги зниження ваги, деформацію, напруження зсуву та резонансні частоти, очевидно, що композит має найбільш обнадійливі властивості для заміни сталі з двох розглянутих матеріалів

*Ключові слова: КАРДАННИЙ ВАЛ, КОМПОЗИТ, СКЛОВОЛОКНО, НАМОТУВАННЯ НИТКИ, СМОЛА, МОДЕЛЮВАННЯ, ДЕФОРМАЦІЯ, НАПРУЖЕННЯ ЗСУВУ, РЕЗОНАНСНІ ЧАСТОТИ.*

## ЗМІСТ

ВСТУП	5
1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА УМОВ РОБОТИ КАРДАННОЇ ПЕРЕДАЧІ АВТОМОБІЛЯ TOYOTA MARK QUALIS	7
1.1 Загальні відомості автомобіля Toyota Mark II	7
1.2 Конструкція та принцип роботи карданного валу	8
1.3 Аналіз умов роботи елементів карданної передачі	16
2 КОМПОЗИТНИЙ КАРДАННИЙ ВАЛ АВТОМОБІЛЯ	24
2.1 Аналіз композитних матеріалів для карданних валів	24
2.2 Альтернативні матеріали для карданних валів	29
2.3 Типова технологія формування композитного валу	30
2.4 Технологія "чистого" формування композитного валу	35
2.5 Математична модель формування композиту	40
2.6 Моделювання процесу утворення композиту	43
3. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТАЛЕВОГО ТА КОМПОЗИТНОГО КАРДАННИХ ВАЛІВ	55
3.1 Початкові умови аналізу карданного валу	55
3.2 Результати моделювання сталюого порожнистого валу	57
3.3 Моделювання 3D CAD і 3D FE	60
3.4 Моделювання траєкторії руху тріщин	62
3.5 Порівняльний аналіз	64
ВИСНОВКИ	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	74
ДОДАТКИ	76

КвРМТВА. 21154.01.07.00				
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата
Виконав		Мамчур		
Перевір.		Посонський		
Н.контр.		Бабак		
Затвер.		Диха		
Модернізація карданної передачі автомобіля Toyota Qualis шляхом заміни матеріалу			Літера	Арквш
			4	76
ХНУ МТВА-21-1				

## ВСТУП

Карданний вал - це обертовий вал, який передає потужність від двигуна до диференціала повно привідних та задньопривідних транспортних засобів. Карданний вал повинен працювати через постійну зміну кутів між трансмісією та віссю. Високоякісна сталь (сталь SM45) є поширеним матеріалом для будівництва. Сталеві приводні вали зазвичай виготовляються двома частинами, щоб збільшити власну частоту вигину, оскільки власна частота вигину вала обернено пропорційна квадрату довжини балки та пропорційна квадратному кореню з конкретного модуля.

Двокомпонентний сталевий карданний вал складається з трьох універсальних шарнірів, центрального опорного підшипника та кронштейна, які збільшують загальну вагу автомобіля. Передача потужності може бути покращена за рахунок зменшення інерційної маси та легкої ваги. Заміна звичайних металевих конструкцій на композитні має багато переваг через вищу питому жорсткість і більшу питому міцність композитних матеріалів.

Композиційні матеріали можуть бути адаптовані для ефективного забезпечення міцності, жорсткості і ваги композитних приводних валів, ніж сталевих або алюмінієвих аналогічної міцності. Це досягається за рахунок можливості виготовлення одного суцільного шматка композиту.

Композиційні матеріали зазвичай мають нижчий модуль еластичності. У результаті, коли виникають піки крутного моменту в трансмісії, карданний вал може діяти як амортизатор і зменшити навантаження на частину трансмісії, збільшуючи її ресурс.

Композитні матеріали можна пристосувати для ефективного задоволення вимог конструкції щодо міцності, жорсткості та ваги композитних карданних валів, меншої, ніж сталь або алюміній аналогічної міцності. Можна виготовити одну частину композитного приводного вала,

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						5
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

щоб усунути весь вузол, що з'єднує двокомпонентний сталевий приводний вал. Крім того, композитні матеріали зазвичай мають нижчий модуль пружності. У результаті, коли в трансмісії виникають піки крутного моменту, карданний вал може діяти як амортизатор і зменшувати навантаження на частину трансмісії, подовжуючи термін служби. Багато дослідників досліджували гібридні приводні вали та методи приєднання гібридних валів до хомутів карданних шарнірів. Але це дослідження забезпечує аналіз дизайну в багатьох аспектах.

Мета роботи: виконати модернізацію карданної передачі автомобіля Toyota Qualis шляхом заміни сталевого карданного валу на композитний.

Завдання роботи:

- 1) Виконати аналіз умов роботи карданної передачі автомобіля Toyota Qualis.
- 2) Виконати аналіз технології виготовлення композитних валів.
- 3) Виконати порівняльний аналіз сталевого і композитного валу автомобіля Toyota Qualis шляхом застосування методів моделювання.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# 1 АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЇ ТА УМОВ РОБОТИ КАРДАННОЇ ПЕРЕДАЧІ АВТОМОБІЛЯ TOYOTA MARK QUALIS

## 1.1 Загальні відомості автомобіля Toyota Mark II

Toyota Mark II Qualis, рис. 1.1 – це повнопривідний 5 дверний автомобіль Е класу, представлений у кузові універсал. Модель оснащується бензиновим двигуном з робочим об'ємом від 2,2 до 3,0 літрів, потужністю від 140 до 215 к.с., з витратою палива від 15,6 літрів на 100 км. Автомобіль оснащується автоматичною коробкою передач. Технічні характеристики автомобіля наведено в таблиці 1.1 [1].

Таблиця 1.1 – Основні технічні характеристики автомобіля Toyota Qualis.

Тип двигуна	бензин	Коробка	автомат
Потужність	140 к.с.	Об'єм двигуна	2.2 л
Привід	повний	Паливо	АІ-95
Країна марки	Японія	Клас автомобіля	Е
Кількість дверей	5	Кількість місць	5
Довжина, мм	4790	Ширина, мм	1785
Висота, мм	1470	Колісна база	2670
Ширина передньої колії, мм	1545	Ширина задньої колії, мм	1520
Розмір коліс	205/65/R15	Кліренс, мм	145
Об'єм багажника мін/макс, л	-	Об'єм паливного бака, л	70
Споряджена маса, кг	1570	Коробка передач	автомат

					КВРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7



Рисунок 1.1 – Загальний вигляд Toyota Qualis.

Динаміка розгону автомобіля знаходиться у межах середніх показників. Великі розміри кузова та простір у салоні автомобіля роблять його зручним транспортним засобом для тривалих поїздок або подорожей. Запасу потужності двигуна цілком вистачає для повсякденних дорожніх ситуацій.

## 1.2 Конструкція та принцип роботи карданного валу.

Автомобільний карданний вал, або іноді відомий як карданний вал, використовується для передачі потужності від двигуна до диференціалу автомобіля з повним приводом. Двома основними вимогами до конструкції карданного вала є здатність передавати крутний момент (для легкових автомобілів, фургонів і невеликих вантажівок він має бути більшим, ніж 3500 Нм) і власна частота вигину (має бути вище, ніж 6500 об/хв), щоб уникнути вихрової вібрації. Вихрова вібрація насправді є резонансом через швидкість обертання приводного вала, яка дорівнює основній природній частоті згинання. Власна частота вигину обернено пропорційна квадрату довжини вала і пропорційна квадратному кореню з питомої жорсткості [2].

Карданний вал автомобіля Toyota Qualis виготовляють з високоякісної сталі SM45C, це аналог сталі 45. Марка сталі 45 – це одна з найбільш популярних та затребуваних марок конструкційних вуглецевих сталей, що

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідає вимогам ДСТУ 7809. Хімічний склад цієї сталі наведено в таблиці 1.2, а механічні властивості в таблиці 1.3. [3]

Таблиця 1.2 – Хімічний склад сталі 45 згідно ДСТУ 7809.

C	Fe	Mn	Cu	Ni	Si	P	Cr	S	As
0,42-0,5	~97	0,5-0,8	<0,25	<0,25	0,17-0,37	<0,035	<0,25	<0,04	<0,08

Таблиця 1.3 – Механічні властивості сталі 45 згідно ДСТУ 7809

Стан поставки	Межа короткочасної міцності, ReH (МПа)	Відносне звуження, %	Межа плинності, Rm(МПа)	Мінімальне відносне подовження $\sigma$ , %
Після нормалізації	600	40	355	16

Сталь марки 45 належить до конструкційних вуглецевих сталей і активно використовується для виготовлення гарячекатаних та холоднокатаних плоских і сортових заготовок, а також кованих елементів. Ці заготовки надалі застосовуються у виготовленні металевих конструкцій та компонентів машинобудування різноманітних форм і розмірів.

Цей тип сталі широко використовується у виробництві деталей з високими механічними навантаженнями, таких як шестерні, шпинделі, кулачки, вали, кріплення. Вона також підходить для створення відповідальних елементів конструкцій, до яких висуваються підвищені вимоги щодо міцності після проведення термічної обробки — зокрема, це можуть бути осі, штоки, плунжери, балки, консолі тощо.

В різних країнах світу використовують аналоги сталі 45, таблиця 1.4.

					КВРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		9

Таблиця 1.4 – Аналоги сталі 45.

США	G10450,1044, G10420, 1045, G10440, 1045H, G10430, M1044
Англія	C45, 060A47, 1449-50CS, 080M46, 1449-50HS, 080M, 50HS, C45E
Німеччина	Cq45, 1.1191, 1.0503, 1.1193, C45, Cm45, C45E, C45R, Ck45, Cf45
Євросоюз	C45EC, 1.1191, 2C45, C45E, C45, C46
Японія	S45C, SWRCH45K, S48C, SWRCH48K
Франція	1C45, XC42H1TS, 2C45, AF65, C40E, C45RR, C45, C45E, CC45, XC42H1, XC45, XC48, XC45H1, XC48H1
Іспанія	C45, C45k, C45E, F.1140, C48k, F.114, F.1142
Швеція	1672, 1650
Італія	C45E, 1C45, C45, C43, C45R, C46
Болгарія	C45, 45, C45E
Польща	45
Китай	45, ZG310-570, 45H, SM45, ML45, ZGD345-570
Бельгія	C45-2, C45-1, C46
Австралія	HK1042, 1045, K1042
Чехія	12056, 12050
Австрія	C45SW
Румунія	OLC45q, OLC45, OLC45X
Угорщина	A3, C45E
Південна Корея	SM48C, SM45C

Звичайний ведучий вал виготовлений зі сталі, а основна частота вигину сталевого ведучого вала не перевищує 6500 обертів на хвилину, таким чином, зробити один суцільний ведучий вал довжиною понад 1,0 м неможливо без зміни матеріалу. Така складна і важка конструкція створюватиме шум і

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		10

вібрацію, які передаються транспортному засобу через центральний підшипник. На рисунку 1.2 показаний вал приводу автомобіля, що складається з двох частин [2].

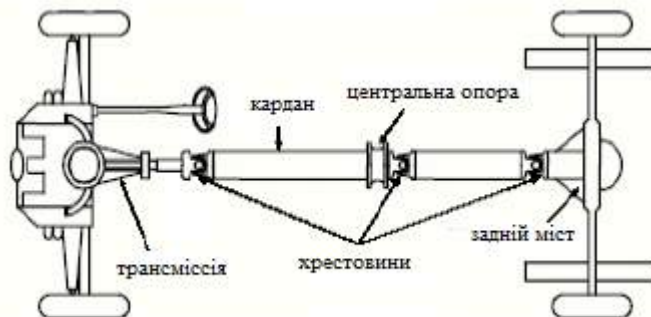


Рисунок 1.2 – Схематичне розташування карданної передачі автомобіля.

Прийнято вважати, що карданний вал складається з чотирьох елементів. Насправді їх більше, але гайки, фланці, кронштейни, обойми та сальники зазвичай не належать до основних елементів. Основою карданного валу є (рис. 1.3):

1) Центральний вал. Це порожня сталева труба. Порожнина потрібна для того, щоб зменшити масу виробу.

2) Хрестовини з наконечниками. Це шарніри специфічної хрестової форми, що призначені для передачі крутного моменту та дотримання змінності кутів (від 0 до 20 градусів). Якщо кут обертання хрестовини перевищує позначку 20 градусів то порушується балансування карданного валу.

3) Проміжний підшипник. Підтримує основний вал, що дозволяє вільно обертатися по осі. Якщо в карданному валі безліч секцій, то і проміжних підшипників буде два, три чи навіть більше.

4) Ковзна вилка. Даний елемент конструктивно з'єднує карданний та проміжний вали на їх кінцях. Водночас він компенсує зростаючу відстань по висоті між ними при їзді по пересіченій місцевості.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11



Класичним варіантом вважається застосування шарнірів нерівних кутових швидкостей (НКШ). Їх використовують не тільки в карданних передачах автомобілів, а і в кермових колонках автомобілів і навіть у деяких інструментах. Але, на сучасних позашляховиках вже частіше використовується система із шарнірами рівних кутових швидкостей (ШРКШ). Пружні шарніри також застосовуються досить часто. Особливість таких шарнірів у тому, що вони передають момент при вигинах, що не перевищують 8 градусів. Разом з тим, шарніри, що є пружними гумовими муфти, гарантують відсутність різких динамічних навантажень і, по суті, не вимагають технічного обслуговування. А ось жорсткі напівкарданні шарніри в автомобілебудуванні вже не застосовуються, хоча щодо успішні спроби були.

Карданний шарнір являє собою хрестовину, цапфи якої розташовані в голчастих підшипниках, встановлених у вушках виделок. У хрестовину ввернута прес маслянка, що закривається гумовим захисним ковпачком, через яку за свердлінням і канавкам на цапфах, що є в хрестовині, проводиться мастило голчастих підшипників і торців цапф.

Корпуси голчастих підшипників фіксуються у вушках стопорними кільцями, які при вставленій хрестовині щільно прилягають до внутрішньої точно обробленої поверхні вушків. Оскільки зазор між торцями хрестовини і денцями корпусів дуже малий (0,03 мм макс.), хрестовина не може переміщатися вздовж підшипників і точно центрується щодо виделок. У корпусі розташовані 20 голок товщиною 2 мм (розмірність 0,003 мм не більше) та запресована штампована обойма манжети, що є також голкотримачем, що запобігає переміщенню голок та їх контакту з торцем гумової манжети.

Діаметр голок підшипника та отвори для них у корпусі підібрані так, щоб голки після установки утворювали склепіння та не випадали в радіальному напрямку.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

Для запобігання витіканню мастила із підшипника встановлена гумова манжета з пружиною. Особливістю конструкції є те, що кромка манжети розташована не на утримання мастила як це зазвичай прийнято, а навпаки, що дозволяє мастилу при мастиллі шарніра виходити з-під кромки при створенні великих тисків і обійтися без застосування запобіжного клапана (рис. 1.4) [2].

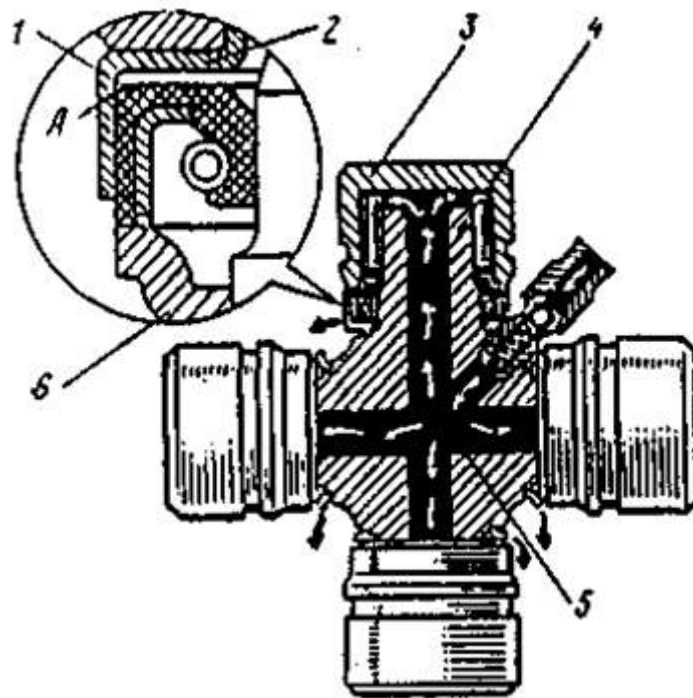


Рисунок 1.4 – Схема змащення карданного шарніра:

- 1) манжета, 2) обойми манжети, 3) голковий підшипник, 4) хрестовина, 5) масляні канали, А – фаска манжети.

Зусилля пружинки, що підтискає кромку манжети, підібрано таким, що забезпечує вихід повітря та надлишків мастила при її нагнітанні та підвищенні тиску, а також під дією відцентрових сил, але зберігає в підшипнику необхідну для нормальної роботи кількість мастила.

Для захисту манжети від попадання води, бруду та пилу служить напресований на хрестовину брудовідштовхувач 6, до якого притискається торець манжети.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Розвиток конструкцій карданних шарнірів нерівних кутових швидкостей пов'язане з безперервним покращенням їх експлуатаційних властивостей: надійності, можливості передачі обертання при підвищеному куті між валами, підвищення ККД.

Вимога забезпечення високого ККД карданного шарніра пов'язані з необхідністю збільшення його зносостійкості, отже, і довговічності.

Карданні шарніри, що застосовуються в сучасних автомобілях, нерівних кутових швидкостей на голчастих підшипниках задовольняють поставленим вимогам за умови, якщо шарнір має раціональну конструкцію, технологія виробництва суворо дотримується, а голчасті підшипники надійно змащуються.

ККД карданного шарніра залежить від кута між валами, що з'єднуються. Зі збільшенням кута у ККД різко знижується. У деяких автомобілях для зменшення цього кута двигун розташовують із нахилом 2...3 градуси. Іноді для тієї ж мети задній міст встановлюють так, що провідний вал головної передачі отримує невеликий нахил. Однак зменшувати кут між валами до нуля неприпустимо, оскільки це може призвести до швидкого виходу шарніра з ладу внаслідок бринелюючого впливу голок підшипників на поверхні, з якими вони стикаються.

Бринелююча дія голок збільшується при великому сумарному зазорі між голками, коли голки підшипника перекошуються і створюють високий тиск на шип хрестовини. Сумарний зазор між голками в карданних шарнірах різних автомобілів коливається в межах (0,1...1,5 мм). Вважається, що сумарний зазор між голками повинен бути меншим за половину діаметра голки підшипника. У більшості карданних шарнірів легкових і вантажних автомобілів застосовують підшипники, діаметр голок яких 2...3 мм (допуск діаметром не більше 5 мкм, а по довжині - не понад 0,1 мм). Голки для підшипника підбираються з однаковими розмірами за допусками. Перестановка чи заміна окремих голок не допускається [2].

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						15
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Хрестовина карданного шарніра має суворо центруватись. Це досягається точною фіксацією стаканчиків підшипників за допомогою стопорних кілець. Наявність зазору між торцями шипів хрестовини та днищами стаканчиків неприпустима, оскільки це призводить до змінного дисбалансу карданного валу при його обертанні. У той же час надмірна зтяжка стаканчиків може викликати задираки торців шипів та днища стаканчиків, а також перекіс голок.

Надійність карданного шарніра визначається насамперед надійністю голчастих підшипників, їх ресурсом. Крім бринелювання можливе також втомне викришування (піттинг) на поверхнях, що стикаються з голками, що пояснюється високими контактними напруженнями. У зв'язку з цим шипи хрестовини карданного шарніра виконуються із високолегованої сталі, а робоча поверхня стаканчиків та шипів цементується.

### 1.3 Аналіз умов роботи елементів карданної передачі.

Нерівномірний хід призводить до зміни крутного моменту протягом одного оберту вала автомобіля. Зміна крутного моменту призводить до зміни сил, що діють на шарнірні підшипники. Ця зміна сили може спричинити небажану вібрацію. Щоб визначити зміну крутного моменту, необхідно знати кінематичні залежності. Математична залежність між кутом повороту карданного валу та кутом повороту проміжного валу описується рівнянням (1.1). [4]

$$\alpha_2 = \arctan[\tan(\alpha_1) \cdot \cos(\beta_1)] , \quad (1.1)$$

Якщо виконати обчислення похідної за часом математичного співвідношення (1.1), отримаємо співвідношення, що визначають залежність кутової швидкості веденого вала від кутової швидкості ведучого вала. [4]

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Також кутова швидкість веденого вала залежить від кута відхилення та кута повороту ведучого вала. Для розрахунку кутова швидкість ведучого вала вважається постійною.

$$\dot{\alpha}_2 = \frac{d\alpha_2}{dt} = \omega_2 = \frac{\omega_1 \cdot \cos(\beta_1)}{\sin^2(\alpha_1) \cdot \cos^2(\beta_1) + \cos^2(\alpha_1)} \quad (1.2)$$

Якщо нам відома кутова швидкість і крутний момент, що прикладаються до валу, ми можемо розрахувати потужність. Ми припустили передачу потужності без втрат, див. рівняння (1.3). [4]

$$T_1 \cdot \omega_1 = T_2 \cdot \omega_2. \quad (1.3)$$

Математичний опис (1.4) крутного моменту, що діє на проміжний вал, отримано з формули (1.3).

$$T_2 = \frac{T_1 \cdot [\sin^2(\alpha_1) \cdot \cos^2(\beta_1) + \cos^2(\alpha_1)]}{\cos(\beta_1)} \quad (1.4)$$

На рисунку 1.5 показано розташування карданного валу в цьому застосуванні. Рівняння (1.4) описує еволюцію в часі, а саме залежність крутного моменту веденого вала від кута повороту карданного валу. У цьому застосуванні рівняння (1.4) описує крутний момент, прикладений до частини карданного валу, яка називається проміжною частиною, як функцію кута повороту карданного валу.

Математичний опис крутного моменту на веденій частині можна оцінити аналогічним чином. Остаточне формулювання цього математичного співвідношення наведено в рівнянні (1.5).

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						17
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$T_3 = \frac{T_2 \cdot [\cos^2(\beta_2) \cdot \cos^2(\alpha_2) + \sin^2(\alpha_2)]}{\cos(\beta_2)} \quad (1.5)$$

Вважаючи кутову швидкість та крутний момент на приводному валу постійною при однакових кутах між валами, крутний момент, що прикладається до проміжного валу, є змінним, але крутний момент, що прикладається до веденого валу, має бути постійним та таким самим, як крутний момент на приводному валу [5].

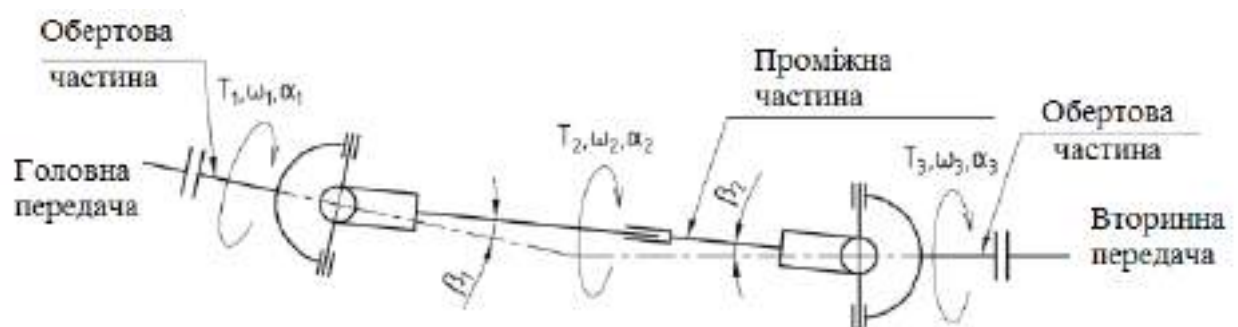


Рисунок 1.5 – Розташування карданного валу.

Рисунок 1.6 показує, що кут між валами або кут між веденим валом та проміжним валом, а також кут між проміжним валом та веденим валом не однакові. Це призводить до різного крутного моменту та кутової швидкості на ведучому, проміжному та веденому валах. Часова еволюція крутного моменту показано на рис. 1.7.

Через нерівні кути між валами крутний момент на веденому валу є змінним і не такий, як крутний момент на веденому валу, що можна побачити на рис. 1.7. Це спричиняє змінні в часі навантаження на кріплення вала та коробки передач, а також інші деталі. Ці деталі можуть створювати вібрації, які поширюються по всій конструкції. На рисунку 1.7 показано, що амплітуда крутного моменту на проміжному валу дуже мала, приблизно 15 Нм. У випадку веденого валу амплітуда становить близько 7 Нм.

					КВРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

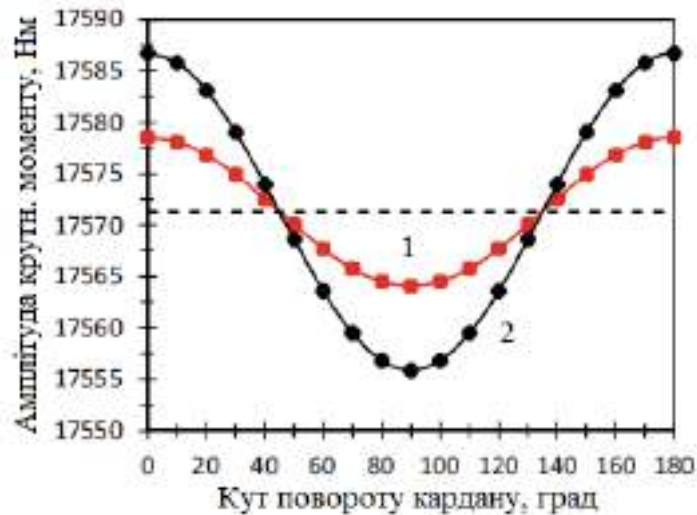


Рисунок 1.6 – Теоретичні функції залежності крутного моменту від кута повороту карданного валу:

1 – крутний момент, що діє на ведений вал, 2 – крутний момент, що діє на проміжний вал.

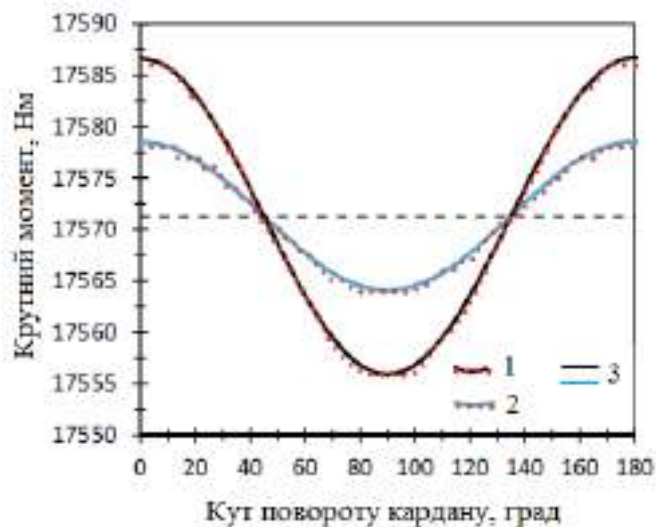


Рисунок 1.7 – Порівняння аналітичних результатів та результатів динаміки твердого тіла:

1 – крутний момент, що діє на проміжний вал, 2 – крутний момент, що діє на ведений вал, 3 – аналітичні результати.

Якщо порівняти величину амплітуди з величиною крутного моменту на веденому валу, то амплітуди дуже малі, але крутний момент і сили, що діють

на поперечні підшипники, досить великі. Незрозуміло, чи може це явище спричинити високу вібрацію трансмісії. Це основна причина, чому проведення цього експерименту є необхідним. Інша причина полягає у виключенні впливу інших частин трансмісії.

Зміна довжини валу призведе до зміни власної частоти. Щоб краще зрозуміти, як змінюватиметься власна частота, необхідний розрахунок. Для початкових міркувань обрано аналітичний метод.

Оскільки оцінка результатів аналітичним методом є дуже складною для трансмісії, необхідно ввести деякі спрощення. Спрощена система кручення називається редукованою системою кручення. По суті, це зменшення маси та довжини. Спрощені умови можна визначити згідно з [5] наступним чином:

- Маса є постійною та не залежить від часу;
- Довжина є постійною та не залежить від часу;
- Система однорідна.

Також необхідно було спростити модель карданного валу. Це означало, що всі криві та фаски були знехтовані. Результатом редукції став вал з постійним діаметром  $d_{red} = 97,1$  мм з довжиною редукції  $L_{red} = 172,4$  мм.

Знаючи довжину та діаметр редукції, а також момент інерції, жорсткість редукованого карданного валу оцінювали за рівнянням (1.6):

$$c = \frac{G \cdot \pi \cdot d_{red}^4}{32 \cdot L_{red}} \quad (1.6)$$

Момент інерції маси для редукованого карданного валу:

$$I_{red} = \frac{1}{2} \cdot m_{red} \cdot \left(\frac{d_{red}}{2}\right)^2 \quad (1.7)$$

Незатухаюча власна частота коливань:

					КВРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

$$\Omega_o = \sqrt{\frac{c}{I_{red}}} \quad (1.8)$$

Згодом було оцінено залежність довжини карданного валу від його власної частоти. З рис. 1.8 видно, що власна частота дуже висока. Можна припустити, що реальна власна (власна) частота буде нижчою, оскільки результуюча жорсткість буде зменшена через податливість перехрестя карданного валу, кріплення валу та інші фактори. Цей факт підтверджується модельним аналізом даного карданного валу, з якого можна спостерігати ці факти (рис. 1.9 та 1.10).

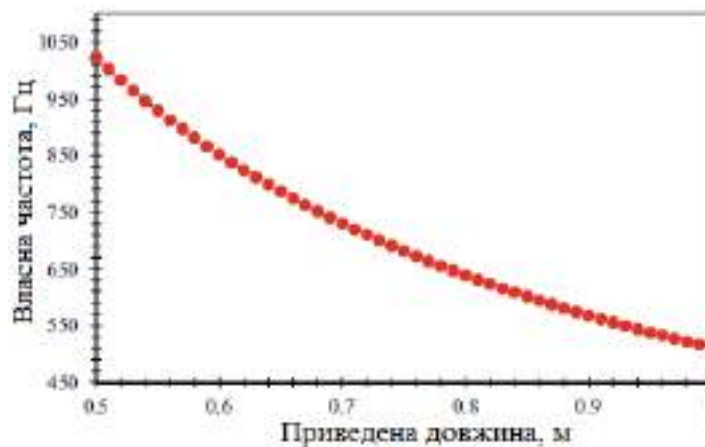


Рисунок 1.8 – Залежність власної частоти від приведеної довжини.

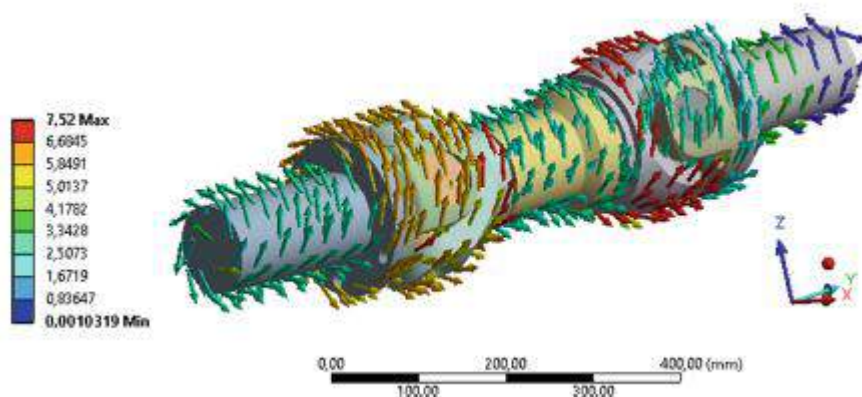


Рисунок 1.9 – Напрямок деформації на першій власній частоті.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

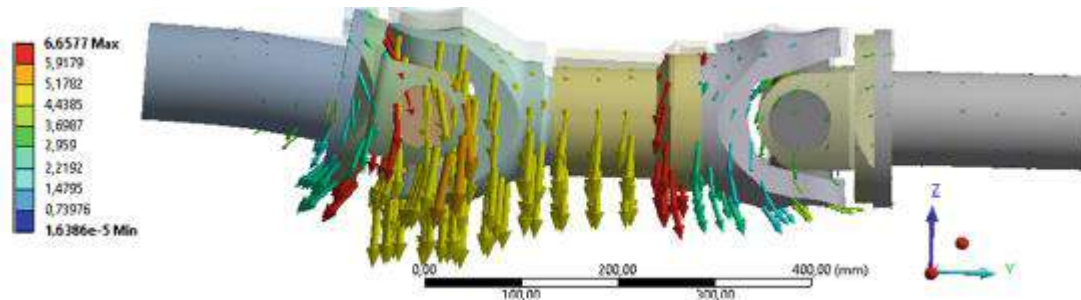


Рисунок 1.10 – Напрямок деформації на другій власній частоті.

На основі результатів модельного аналізу, виконаного за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ), було встановлено аналогічну залежність, яка показана на рис. 1.11.

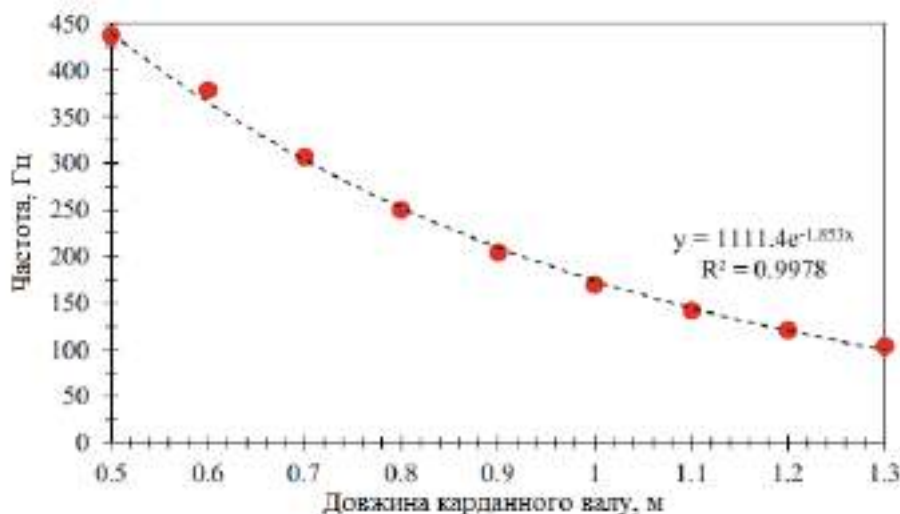


Рисунок 1.11 – Залежність довжини карданного валу від першої власної частоти.

Крім того, можна визначити амплітуду крутильних коливань.

Згідно з [2], крутний момент двигуна внутрішнього згорання визначається наступним чином:

$$T(t) = T_a \cdot \sin(\omega_m \cdot t) \quad (1.9)$$

Амплітуда визначалася за рівнянням (1.10):

$$\phi_a = \frac{M_a}{I_{red}} \cdot \frac{1}{\sqrt{(\Omega_0^2 - \omega_0^2)^2 + (2 \cdot \delta \cdot \omega_0)^2}} \quad (1.10)$$

У рівнянні (1.10)  $\omega_0$  представляє частоту збудження. Отримані амплітудні характеристики наведені на рис. 1.12. На рис. 1.12 показано порівняння результатів, отриманих за допомогою аналізу скінченних елементів (1, синя лінія) та аналітичного методу (2, червона лінія). На рисунку також показано, що результати скінченних елементів знаходяться ліворуч. Це пояснюється тим, що аналітичний розрахунок не враховує жорсткість підшипника, поперечну жорсткість гакового з'єднання та інші деталі, оскільки їх аналітичне рішення є складним.

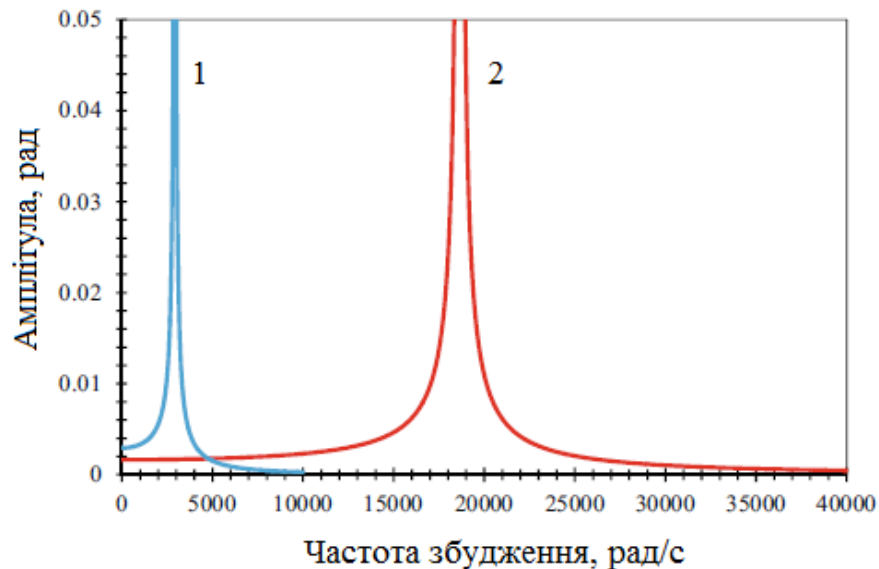


Рисунок 1.12 – Амплітудні характеристики.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		23

## 2 КОМПОЗИТНИЙ КАРДАННИЙ ВАЛ АВТОМОБІЛЯ

### 2.1 Аналіз композитних матеріалів для карданних валів.

Композитний матеріал поєднує два або більше хімічно різноманітних матеріалів з чітко вираженою межею розділу. Складові матеріали зберігають свою окрему ідентичність у композиті, але не в складових. Один з компонентів утворює безперервну фазу і називається матрицею. Тоді їх комбінація створює властивості та характеристики, що перевершують інші важливі компоненти. Це армування у вигляді волокон, термічно доданих до матриці для покращення властивостей матриці. У більшості випадків армування є складнішим, суттєвішим і міцнішим, ніж матриця. Армування - це міцні матеріали з певною морфологією, включені в матрицю для покращення фізичних властивостей композиту. Різні армування, що використовуються в композиті, по-різному впливають на властивості композиту. Отже, властивості композитів залежать від властивостей цієї дисперсної фази, її відносної кількості та морфології, що означає, що композитні матеріали можна класифікувати за типами армування. Матричний матеріал у композиті може бути полімером, металом або керамікою, залежно від того, які композитні матеріали класифікуються як полімерно-матричний композит (ПМК), металоматричний композит (ММК) або керамоматричний композит (КМК). Полімери класифікуються як терморезистивні (епоксидні, поліефірні, фенольні, поліамідні тощо) та термопласти (поліетилен, полістирол, поліефір-ефір-кетон (PEEK) тощо). Прикладами металевих матриць є алюміній, магній та титан, а прикладами керамічних матриць – оксид алюмінію та алюмосилікат кальцію [3].

Порівняно з гомогенними металопластиками, композити є гетерогенними матеріалами, що є важливою особливістю. У композитних структурах існує багато видів руйнувань та пошкоджень. Одним з них є

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

міжшарове руйнування, відоме як розшарування, яке одночасно є найважливішим режимом руйнування. Зростання розшарування залишається критичним режимом руйнування в шаруватих композитних структурах. Міжшарова фракція композитного матеріалу дуже інтенсивно досліджувалася. Розшарування означає деградацію між сусідніми шарами матеріалу. Було знайдено багато способів протидії розшаруванню, наприклад, переплетення волокон збільшує в'язкість, але вводить мікрОВигин, що негативно впливає на міцність на стиск; Зміцнення смоли пригнічує розшарування, але часто зменшує модуль пружності, що є невід'ємним компромісом у збільшенні в'язкості смол. Армовані смоли зазвичай використовуються в попередньо просочених матеріалах для аерокосмічної промисловості, щоб протистояти розшаруванню. Однак вартість використання препрегів у виробництві вітрових турбін може бути високою. Тому для виготовлення лопатей вітрових турбін шукають недорогі композитні матеріали, такі як скловолокно, де розшарування ще не вивчено детально [3].

Композитні матеріали мають ряд переваг перед звичайними монолітними металами, такі як легка вага, висока питома міцність, високий питомий модуль пружності, корозійна стійкість, стійкість до втоми та ударів, стійкість до високих температур. Завдяки цим перевагам композитні матеріали знаходять широке застосування в різних промислових секторах, де легкі конструкції мають першорядне значення. Наприклад, в аерокосмічному секторі композитні матеріали використовуються для крил, фюзеляжу, лопатей вертольотів, шасі, антен тощо; в автомобільній промисловості композитні матеріали використовуються для панелей кузова, приводних валів, листових ресор, шестерень, приладових панелей тощо; у хімічній промисловості композитні матеріали використовуються для труб, резервуарів, посудин під тиском, бункерів, клапанів тощо; В електротехнічному секторі їх використовують для панелей, корпусів,

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розподільчих пристроїв, ізоляторів, а в побуті композитні матеріали використовуються для внутрішніх та зовнішніх панелей, стільців, столів, ванн, драбин, душових кабін тощо.

Натуральні волокна можна поділити на рослинні, тваринні та мінеральні. Мінеральні волокна більше не використовуються або використовуються лише в невеликих кількостях у нових технічних розробках через їх канцерогенну дію. Волокна тваринного походження складаються з білків (наприклад, волосся, шовк, вовна тощо).

Натуральні волокна рослинного походження складаються з целюлози (природної полімерної речовини, що утворюється з молекул глюкози), лігніну та пов'язаних з різною кількістю іншої сировини. 4 Рослинні волокна (також відомі як целюлоза, луб'яні або рослинні волокна) зручно класифікують за частиною рослини, де вони зустрічаються та з якої їх видобувають. Луб'яні волокна видобувають з луб'яної тканини або кори стебла рослини. До них належать льон, джут, коноплі, рамі, кенаф, арека катеху тощо. Листові волокна видобувають з листя рослин. До них належать сизаль, ананас, банан, оболонка ареки тощо, а насінневі або фруктові волокна видобувають з насіння або плодів. До них належать койра, бавовна, олійна пальма тощо. Луб'яні волокна представляють більшість натуральних волокон з потенціалом для використання в композитах.

Переваги та недоліки натуральних волокон.

- Низька щільність – що призводить до питомої жорсткості, порівнянної з жорсткістю Е-скла.
- Екологічно чистий – відновлюваний ресурс, виробництво використовує CO<sub>2</sub> та повертає кисень, для виробництва потрібно менше енергії порівняно з Е-склом.
- Хороші тепло- та звукоізоляційні властивості
- Менш абразивний характер волокон – зменшений знос інструментів та менше подразнення шкіри

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

- Подразнення для працівників порівняно зі склом.
- Вартість сировини нижча або порівнянна з Е-склом
- Утилізація відходів – надлишки волокна біорозкладні або їх можна спалити для утилізації.
- Естетичний вигляд натурального матеріалу. Однак натуральні волокна мають певні недоліки, такі як:
  - Нижчі міцнісні властивості, зокрема ударна в'язкість.
  - Змінна якість, залежно від непередбачуваних впливів, таких як погода.
  - Поглинання вологи, що викликає набухання волокон.
  - Обмежена максимальна температура обробки.
  - Нижча довговічність, обробка може її покращити.
  - Погана вогнестійкість.

Гібридні композити з натурального скловолокна [6].

Окрім модифікації поверхні, ще однією технікою, що застосовується для покращення характеристик препрегів у виробництві вітрових турбін, може бути використання дорогого синтетичного волокна (наприклад, скла) як армуючого матеріалу в тому ж матричному матеріалі. Це призводить до отримання гібридного композиту. Скловолокно, будучи набагато міцнішим і жорсткішим, ніж натуральне волокно, має покращити характеристики отриманого гібридного композиту. Однак величина покращення залежить від відносної ваги або об'ємної частки волокна, розташування двох волокон, сумісності обох волокон зі смолою, геометрії волокон (однонаправлені, рубані, матові), міжфазного з'єднання тощо. Окрім покращення ударних характеристик, включення скловолокна знижує вартість, що є обмеженням для застосування графітових волокнистих композитів.

Різноманітні типи гібридних композитів [6]:

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						27
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Інтершарові гібридні композити: ламінат, що складається з шарів різних волокон. Наприклад, графіт/епоксидна смола, графіт/епоксидна смола та арамідна/епоксидна смола.

Внутрішньшарові гібридні композити: шар, що складається з двох або більше волокон, змішаних між собою.

Внутрішньшарові гібридні композити: комбінація внутрішньшарових та інтершарових гібридних. Сендвіч-гібриди (ядро-оболонка): в яких один матеріал розміщений між двома шарами іншого.

Потреба в гібридних композитах з натуральних та синтетичних волокон.

Незважаючи на привабливість полімерних матричних композитів, армованих натуральним волокном, вони мають низьку міцність; нижчий модуль пружності порівняно з композитами, армованими синтетичним волокном, такими як склопластики. Також показано, що гідрофільна природа натуральних волокон негативно впливає на гідрофобну матрицю, що призводить до низької міцності. Крім того, натуральні волокна чутливі до навколишнього середовища та мають відносно низьку вологостійкість, що призводить до зниження міцності композитів з натуральних волокон. Отже, використання лише натурального волокна в полімерній матриці є недостатнім для задовільного вирішення всіх технічних потреб композиту, армованого волокном. Це чудовий, але економічний композит, який можна поєднувати із синтетичним волокном в одному матричному матеріалі, щоб найкраще використати властивості обох волокон. Це призводить до гібридного композиту з натуральних та синтетичних волокон.

Синтетичним волокном, яке використовується в цих гібридних композитах, є скловолокно через низьку вартість та легкість доступності порівняно з іншими синтетичними волокнами.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## 2.2 Альтернативні матеріали для карданних валів.

Алюміній – поширений матеріал, який використовується в дослідженнях щодо карданних валів для заміни сталі у виготовленні карданних валів. Алюміній легший, тому він більш паливно-ефективний. Питома жорсткість, яку іноді називають питомим модулем пружності (основний вплив власної частоти згинання, крім довжини), – це значення модуля Юнга, поділене на густину. Модуль Юнга – це міра опору матеріалу пружній (відновлюваній) деформації під навантаженням. Алюміній має значення питомої жорсткості  $26 \times 10^6 \text{ м}^2 \text{ с}^{-2}$ , а сталь –  $25 \pm 0,5 \times 10^6 \text{ м}^2 \text{ с}^{-2}$ . Різниця між цими двома значеннями занадто мала. Таким чином, навіть якщо цей новий карданний вал виготовлений з використанням алюмінію, він не може мати значного значення власної частоти згинання. Але добре те, що завдяки використанню алюмінію вага карданного валу значно зменшилася. Деякі конструкції композитних карданних валів, розроблені дослідником Lee, [7], мають зниження маси на 75 відсотків. Це призведе до паливної ефективності, а також меншого шуму та вібрації.

М.А. Badie та ін. [8] стверджують, що «шаровані композити, завдяки своїй перевазі у вигляді вищої питомої жорсткості, отримали стійкість у сфері конструкцій, що переносять крутний момент, завдяки багатьом застосуванням». М.А. Badie та ін. [8] зазначили, що «композитні карданні вали пропонують потенціал легшої та довговічнішої трансмісії з вищою критичною швидкістю». Через численні переваги, які пропонує композитний матеріал, багато коштів було вкладено в дослідження та розробки, щоб створити дешеву, надійну, високопродуктивну та екологічну конструкцію карданного вала.

Складність деталей карданного вала також зменшується, якщо вал можна виготовити як одне ціле. На рисунку 2.1 показано компонент, який є вирішальним у карданному валу для його належної роботи. Він чітко

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

показує, що композитний карданний вал потребує менше компонентів порівняно зі сталевим валом.

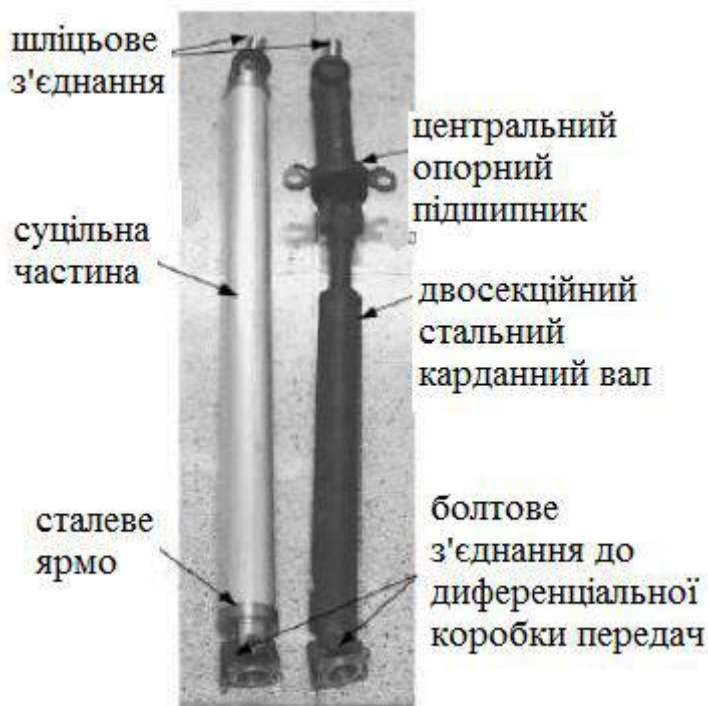


Рисунок 2.1 – Звичайний карданний вал та композитний карданний вал.

### 2.3 Типова технологія формування композитного валу.

Звичайним волокном, що використовується для формування композитного карданного валу, є скловолокно та вуглецеве волокно. Ці волокна проходять процес, який називається намотуванням ниткою, змоченим ниткою. Намотування ниткою полягає в намотуванні безперервного ровінгу волокна на обертову оправку за заздалегідь визначеними схемами. Існує два типи намотування: мокре та сухе. При методі мокрого намотування волокно набирає смолу або шляхом проходження через ванну зі смолою, або з дозованої системи нанесення. З іншого боку, при методі сухого намотування компонент затвердіває після кількох шарів і знімається з оправки. На рисунку 2.2 показано графічне пояснення процесу намотування ниткою, змоченою ниткою.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



З іншого боку, скловолокно використовується в деяких дослідницьких роботах для усунення гальванічної корозії між алюмінієм та вуглецевим волокном (шар скловолокна між вуглецевим волокном та алюмінієм). Висока вартість матеріалу та складна виробнича практика спонукають цю дослідницьку роботу дослідити новий матеріал, який би був набагато дешевшим, мав екологічні характеристики та просту методологію виробництва.

Традиційне намотування нитками – це усталена технологія виробництва, яка використовується для виробництва композитних компонентів, армованих волокном, таких як труби, валики та резервуари під тиском. Існує ряд варіацій, пов'язаних з цією технологією виробництва, включаючи наступні: (I) просочення на основі ванни зі смолою; [9] (II) сухе намотування стрічки; [9] (III) електростатичне осадження; [12] та (IV) лазерне просочення [9-11]. Метод просочення на основі ванни зі смолою є переважним методом, що використовується в промисловості, і зазвичай передбачає використання термореактивних смоляних систем. Термін «система смоли» використовується тут для опису ретельно змішаної смоли та затверджувача.

Схематичне зображення традиційного методу мокрого намотування нитками показано на рисунку 2.3. Пучки армуючого волокна зі шпулярників або бобін (A) подаються через ряд напрямних (B) та систему натягу (C); Додатковий набір напрямних штифтів (D) контролює траєкторію руху волокон на барабанний просочувальний пристрій (E), розташований у ванні зі смолою (F). Окремі компоненти системи смол (наприклад, епоксидна смола та амін) змішуються вручну в необхідному стехіометричному співвідношенні пропорції перед заливанням у ванну зі смолою. Просочені волокна (G) спрямовуються до пересувної каретки (H) та «D-подібного отвору» (I), який збирає просочені пучки волокон у стрічку перед намотуванням їх на обертову оправку (J). Каретка переміщується

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

горизонтально уздовж довжини обертової оправки, укладаючи просочені смолою волокна заздалегідь визначеним способом на оправку. Бажаний кут намотування волокон досягається шляхом керування швидкістю переміщення каретки та швидкістю обертання оправки.

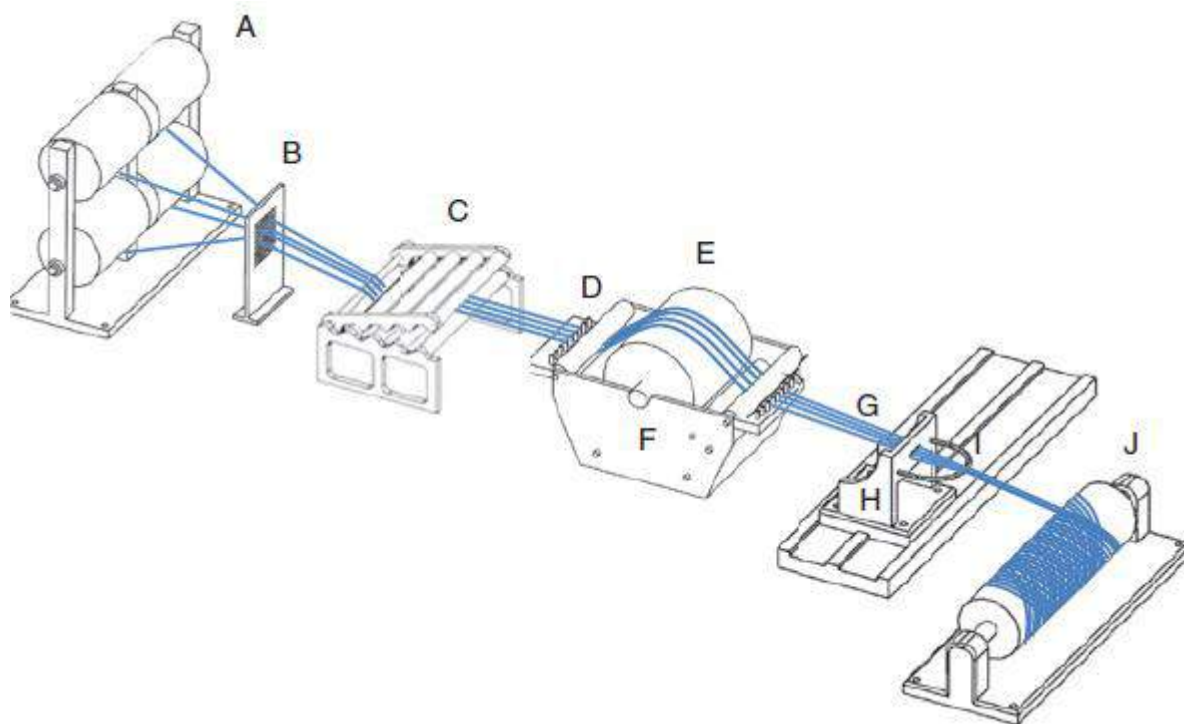


Рисунок 2.3 – Схематичне зображення звичайного процесу намотування нитки мокрим способом. Ключові компоненти кодуються наступним чином: (А) шпулярники для волокон; (В) напрямна для волокон; (С) системи натягу; (D) напрямні штифти; (Е) барабан-просочувач з ракелем; (F) ванна зі смолою; (G) просочені пучки волокон; (H) пересувна каретка; (I) D-образне око; та (J) обертовий дорн.

(I) Термін придатності попередньо змішаної смоляної системи: Загалом, термореактивні смоляні системи, що використовуються у мокрому намотуванні мають обмежений «термін придатності». Термін «термін придатності» стосується періоду, протягом якого змішана смола та затверджувач (і каталізатор) залишаються придатними для використання.

										Арк.
										33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КвРМТВА. 21154.01.07.00					

Після цього періоду поступове зшивання смоли призводить до супутнього збільшення в'язкості; отже, змочування волокон та процес просочення стають дедалі складнішими, зі збільшенням в'язкості смоляної системи.

(II) Смоляна ванна: Обмежений термін придатності також означає, що смоляна система може «застигнути» або перейти у тверду речовину у смоляній ванні; наслідки цього будуть серйозними, оскільки це вимагатиме видалення зшитої смоли перед відновленням виробництва. Обмежений термін придатності також означає, що швидкотвердіючі смоляні системи зазвичай не підходять для звичайного намотування мокрим способом.

(III) Розчинники: Основною проблемою звичайного намотування мокрим способом за допомогою термореактивних смоляних систем є необхідність ретельного очищення обладнання після кожного виробничого циклу. Загалом, залежно від розмірів ванни зі смолою, під час очищення може витратитися кілька літрів розчинника. Законодавство або місцеві протоколи вимагають необхідності відновлення розчинника перед утилізацією осаду. Очевидно, що всі ці проблеми можуть сприяти загальній вартості виробництва.

(IV) Ручне змішування та заливання: При традиційному мокрому намотуванні ниток смола та затверджував зважуються в необхідному стехіометричному співвідношенні та змішуються вручну. Дегазація змішаної системи смол зазвичай не проводиться. Потім змішану систему смол заливають у ванну зі смолою. Під час намотування нитки, ванну зі смолою необхідно поповнювати вручну система змішаної смоли. Необхідні витратні матеріали включають одноразові контейнери та мішалки, а також абсорбуючий папір для очищення будь-яких крапель смоли. Ці предмети також необхідно утилізувати.

(V) Надлишок смоли: Незалежно від способу просочення волокнистих джгутів, занурення чи у барабані, надлишок системи смоли, що залишається у ванні зі смолою після закінчення виробництва, переноситься в одноразовий

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

контейнер; цій системі смоли дають змогу зшити її до твердої речовини перед утилізацією.

Оскільки реакції зшивання в термореактивних смолах є екзотермічними, необхідно вжити запобіжних заходів, щоб уникнути екзотермії системи смоли. Іншими словами, тепло, що виділяється під час зшивання, може призвести до само прискорення реакцій. Це може призвести до термоокислювальної деградації системи смоли. Тому у великих ваннах зі смолою систему відпрацьованої смоли необхідно розділити на менші об'єми перед затвердінням, щоб мінімізувати ймовірність екзотермії. У ситуаціях, коли армуючі волокна надмірно просочені, надлишок смоли на волокнах на оправці видаляється вручну; це також сприяє збільшенню загального об'єму відходів смоли під час виробництва.

(VI) Аерація: У випадку просочення на основі барабана, обертання барабана може призвести до аерації системи смоли. Це, у свою чергу, може потенційно призвести до поганого просочення волокон та збільшення порожнистості.

З огляду на вищезазначені проблеми, розглянемо технологію "чистого" намотування мокрим способом.

#### 2.4 Технологія "чистого" формування композитного валу.

У процесі чистого мокрого намотування нитки ванна зі смолою замінюється блоком просочення смолою, який просочує армуючі волокна. Ручне змішування смоли та затверджувача уникається завдяки використанню звичайного блоку дозування смоли разом зі статичним змішувачем. Також представлено основу проектування блоку просочення смолою.

Схема ключових компонентів процесу чистого мокрого намотування нитки представлена на рисунку 2.4.

Наведемо опис компонентів, зазначених на рисунку 2.4.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(a) Система утримання та подачі смоли / затверджувача: Тут смола та затверджувач містяться в окремих резервуарах та перекачуються за потреби за допомогою прецизійних шестеренчастих насосів у спеціально виготовлений колектор. У цьому колекторі два потоки рідини спрямовуються у звичайний статичний змішувач «Kenics TM». Прецизійні насоси, що використовувалися, були здатні подавати 10–110 г/хв смоли та затверджувача та перекачувати рідини з в'язкістю 20–10 000 мПа·с. [9].

Дозатор смоли був виготовлений компанією СТМ, Велика Британія. Балончик із силікагелем (осушувачем) закріплений на кришках резервуарів зі смолою та затверджувачем, щоб мінімізувати поглинання атмосферного вологості. Система утримання та подачі смоли, описана тут, усуває необхідність ручного змішування компонентів смоли та затверджувача.

(b) Колектор: Незалежні потоки рідини (смола та затверджувач) від прецизійних насосів спрямовуються до колектора (шириною 50 мм, висотою 42,5 мм та товщиною 25 мм), який підключений до статичного змішувача.

(c) Змішування смоли та затверджувача: У процесі намотування чистого філаменту смола та затверджувач ретельно «змішуються» за допомогою статичного змішувача. Статичний змішувач складається з серії спіральних елементів, які закріплені всередині трубчастого корпусу. Послідовні елементи розташовані один навпроти одного та зварені разом таким чином, що сусідні краї перпендикулярні. Як наслідок, це рідина розділяється щоразу, коли вона виходить з одного елемента та входить в інший. Цей процес продовжується вздовж довжини статичного змішувача. Товщина смуг зменшується в  $2^N$ , де  $N$  = кількість розділювальних елементів. Завдяки відповідному вибору кількості спіральних елементів у статичному змішувачі можна досягти гарної гомогенізації системи смоли [9]. Розгортання статичного змішувача усуває необхідність змішувати смолу та затверджувач вручну. Захоплення повітря є проблемою при ручному

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

змішуванні, але це не так у випадку з підходом на основі статичного змішувача.

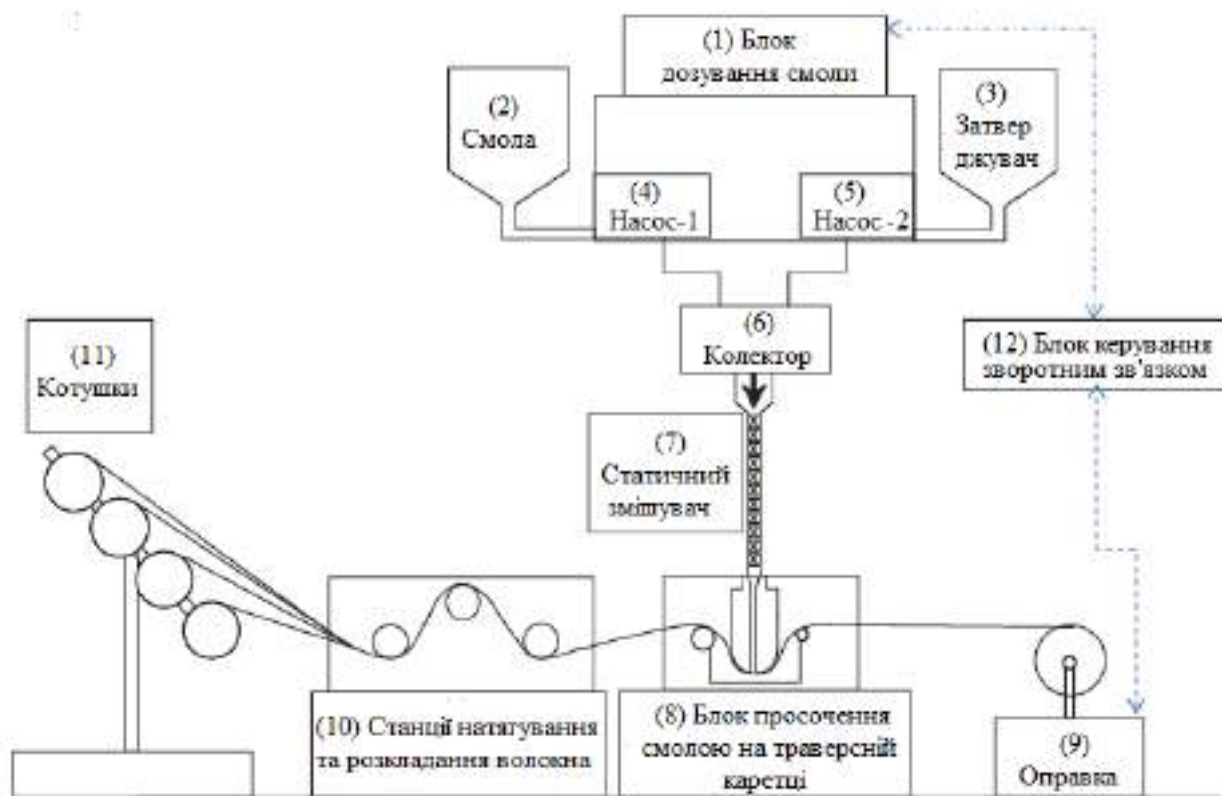


Рисунок 2.4 – Схематичне зображення концепції чистого намотування волокна:

(1) блок дозування смоли; (2) резервуар для смоли; (3) резервуар для затверджувача; (4 та 5) прецизійні шестеренні насоси; (6) колектор; (7) статичний змішувач; (8) блок просочення смолою, розташований на траверсній каретці; (9) обертовий дорн; (10) станції натягу та розподілу волокна; (11) шпулярники або бобіни; та (12) система керування зі зворотним зв'язком для забезпечення синхронізації між дорном та блоком дозування смоли.

(d) Станція розподілу волокон: Унікальною складовою методики чистого мокрого намотування ниток є контрольоване розміщення пучків волокон перед просоченням. Розподіл волокон ефективно збільшує ширину

джгута з одночасним зменшенням номінальної товщини. Це покращує поперечне просочення змішаної смоляної системи у волокна.

(e) Блок просочення смолою: Схематичне зображення блоку просочення смолою показано на рисунку 2.5. Останнім ключовим компонентом блоку просочення смолою є ролик, який «збирає» просочені джгути і дозволяє їх наносити на обертовий оправлення у вигляді стрічки. Цей аплікатор смоли служить комбінованим штифтовим, мініатюрним ванночним та інжекційним просочувальним пристроєм.

(f) Розташування аплікатора смоли або блоку просочення смолою: У процесі намотування чистого філаменту аплікатор смоли розташований на поперечній каретці, а останній ролик аплікатора смоли (див. рис. 2.4) розташований над оправленням.

Отже, на відміну від звичайного процесу намотування мокрим способом, тут виключається можливість стікання смоли з просочених джгутів на підлогу.

(g) Керування зі зворотним зв'язком: Система керування зі зворотним зв'язком між обертовим оправником та блоком дозування смоли використовується для керування відносною продуктивністю смоли та затверджувача.

Критерії проектування установки просочення смолою.

Загальні вимоги до проектування були такими:

(I) Мінімізація використання розчинника та втрат смоли: Аспекти проектування, що розглядалися тут, полягали в мінімізації об'єму ванни або резервуара зі смолою. Обґрунтування полягало в тому, що значно зменшений резервуар вимагатиме меншого об'єму розчинника для очищення в кінці виробничого циклу. Зменшення об'єму резервуара зі смолою також призведе до меншого об'єму змішаної смоли, яку потрібно буде утилізувати. Крім того, існувала необхідність мінімізувати кількість точок контакту між просоченими волокнистими джгутами та обробним обладнанням. Загалом,

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



(III) Модульна збірка: Загалом, більшість комерційно доступних ванн зі смолою, як правило, є системами з фіксованим об'ємом. Іншими словами, діаметр барабана для захоплення смоли та об'єм резервуара, як правило, фіксовані. Тому в поточній конструкції, була розглянута модульна конструкція, де об'єм резервуара можна змінювати залежно від розмірів джгутів та кількості використовуваних джгутів.

(IV) Розподіл волокон: Попередні дослідники продемонстрували, що відносні розміри пучка волокон можуть суттєво впливати на час просочення. Тому в конструкцію було інтегровано спеціальну установку для розподілу волокон [9-14]

(V) Ефективність просочення: Основною передумовою в чистому процесі намотування мокрого філаменту було забезпечення ретельного зволоження та просочення джгутів волокон. Ключові параметри, що впливають на ефективність просочення, такі: (a) в'язкість смоли; (b) пористість пучка волокон; (c) тиск впорскування смоли; (d) натяг волокон; та (e) архітектура волокон у пучку волокон.

## 2.5 Математична модель формування композиту.

Більшість моделей просочення смолою, що вивчають потік смоли через волокнисту арматуру, походять із закону Дарсі Фолі та Гіллеспі [9] виразили закон Дарсі, використовуючи циліндричну систему координат, для прогнозування часу інфільтрації через круглий пучок волокон з будь-яким захопленням повітрям та без нього. Рівняння, запропоноване Фолі та Гіллеспі, було адаптовано для представлення пучка з прямокутним поперечним перерізом, оскільки воно імітує профіль пучка в блоці просочення смолою. Адаптуючи рівняння, розроблені Фолі та Гіллеспі, [9], тут припускалося, що просочення відбувається при довільній зміні товщини інфільтрації від  $T_1 = s_1 T_0$  до  $T_2 = s_2 T_0$ , де  $s_1$  та  $s_2$  можна змінювати в діапазоні від 1 (для

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

порожнього джгута) до  $r_f/T_o$  (для повністю просоченого пучка волокон),  $r_f$  – радіус волокна:

$$\Delta t = \eta(1 - V_f)T_o^2 \left[ \frac{s_1^2 \left( \ln\left(\frac{1}{s_1}\right)^2 + 1 \right) - s_2^2 \left( \ln\left(\frac{1}{s_2}\right)^2 + 1 \right)}{4K_{(Т,Н)}(P_c + P_{app})} \right] \quad (2.1)$$

де  $\Delta t$  – час інфільтрації,  $\eta$  – в'язкість смоляної системи,  $V_f$  – об'ємна частка волокон,  $T_o$  – загальна товщина джгута, а  $K_{(Т,Н)}$  – поперечна проникність. Т позначає поперечну проникність, а Н означає «гексагональне» укладання волокон у джгуті,  $P_c$  – це капілярний тиск, а  $P_{app}$  – прикладений тиск. Тут прикладений тиск  $P_{app}$  у визначеному місці уздовж шляху просочення приймається як сума будь-яких зовнішніх тисків, які можуть включати: тиск ( $P_w$ ), що створюється в шарі смоли, що знаходиться між пучком волокон і поверхнею інжекційного штифта (це називається клином смоли в подальшому тексті) та тиск інжекції ( $P_i$ ) вхідного потоку смоли в інжекційну щілину, який залежить від насосів, що подають компоненти систем смол, та перепаду тиску в трубках подачі та статичному змішувачі (див. рисунок 2.4).  $P_w$  можна оцінити за «рівнянням Лапласа». Рівень  $P_i$  смоли можна виміряти експериментально за допомогою датчика тиску поблизу точки ін'єкції.

Рівняння (2.1) було використано для оцінки часу просочення для пучка волокон з прямокутним поперечним перерізом припускаючи, що основний напрямок просочення - по всій товщині.

Пучки волокон Е-скла, що використовувалися в цьому дослідженні, були ЕС 15 1200 TEX (PPG Industries, Велика Британія) з щільністю 2550 кг·м<sup>3</sup>. Радіус волокна ( $r_f$ ) становив 8,5 мікрометрів, а кількість ниток (N) у

					КВРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пучку волокон становила приблизно 2000. Площа поперечного перерізу пучка волокон була визначена як:

$$A = \frac{NA_f}{V_f} \quad (2.2)$$

де  $V_f$  – об'ємна частка волокна, а  $A_f$  – площа поперечного перерізу окремої нитки.

Вважаючи, що поперечний переріз розгорнутого пучка волокон є прямокутним, товщину волокна ( $T_o$ ) можна оцінити, використовуючи наступне співвідношення:

$$T_o = \frac{A}{W} \quad (2.3)$$

Капілярний тиск,  $P_c$ , можна розрахувати за допомогою рівняння Юнга-Лапласа: [14]

$$P_c = \frac{4\zeta \cos \theta}{D_E} \quad (2.4)$$

де  $\zeta$  - поверхневий натяг смоли,  $\theta$  - кут контакту між смолою та волокном, а  $D_E$  - це (змочений діаметр) для масиву односпрямованих волокон: [14]

$$D_E = \frac{8r_f \varepsilon}{F(1 - \varepsilon)} \quad (2.5)$$

де  $r_f$  - радіус волокна,  $\varepsilon$  - пористість пучка волокон, а  $F$  - форм-фактор, який залежить від архітектури волокна та напрямку потоку смоли. Форм-фактор « $F$ » має значення 2 та 4 для поперечного та осевого потоку відповідно.

Значення  $P_c$  у пучку волокон з електричного скловолкна було розраховано за допомогою рівняння (3.4), де об'ємна частка волокна

					КВРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

приймалася рівною 0,7, а кут контакту та поверхневий натяг – 57 та 0,044 Н/м відповідно. Значення  $P_c$  було розраховано як 6,58 кПа.

Тиск ( $P_w$ ) було розраховано за допомогою рівняння Лапласа: 18

$$P_w = \frac{T}{WR} \quad (2.6)$$

де  $P_w$  – максимальний тиск, що діє на шар смоли, що знаходиться між поверхнею штифта для інжекції смоли та перетинаючим пучком волокон,  $T$  – це натяг у пучку волокон, а  $R$  – радіус кривизни пучка, який вважається таким самим, як радіус штифта. Розрахунковий тиск смоли становив 83,3 кПа для випадку, коли ширина волокна ( $W$ ), натяг у пучку волокон ( $T$ ) та радіус кривизни ( $R$ ) становили 8 мм, 10 Н та 15 мм відповідно.

Поперечна проникність пучка волокон була передбачувана за допомогою моделі, запропонованої Гебартом: [9]

$$K_{(TH)} = \frac{16r_f^2}{9\pi\sqrt{6}} \left( \sqrt{\frac{V_A}{V_f}} - 1 \right)^{5/2} \quad (2.7)$$

де  $r_f$  – радіус волокна,  $V_A$  – максимальна об'ємна частка волокна, якої можна досягти, коли волокна дотикаються. Для гексагонального пакування волокон у пучку,  $V_A$  визначається як  $\pi/2\sqrt{3} = 0,907$ . Використовуючи розміри пучка Е-скла, представлені раніше, та припускаючи об'ємну частку волокна 0,7, поперечна проникність з рівняння (2.7) була розрахована як  $1,12 \times 10^{-13} \text{ м}^2$ .

## 2.6 Моделювання процесу утворення композиту.

Режими просочення. У Таблиці 2.1 представлено зведену інформацію про відомі (або припущені) та розраховані значення для заданих параметрів,

					КВРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						43
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

пов'язаних з конструкцією інжектора смоли. Щодо блоку просочення, проілюстрованого на рисунку 2.6, робота цієї системи базується на комбінації чотирьох режимів просочення. Режим I представляє випадок, коли волокнисті джгути потрапляють у сопло для просочення смолою, клин смоли між поверхнею аплікатора смоли та пучком волокон втискається в джгут (через товщину). Режим II означає, коли смола впорскується у пучок волокон через сопло для просочення через  $P_1$ . Режим III представляє ситуацію, коли мініатюрна пастка або резервуар для смоли, розташована під соплом для просочення, служить точкою збору смоли, а тут капіляр вважається фактором, що сприяє просоченню. Нарешті, Режим IV представляє випадок, коли скребок, розташований нижче за течією від інжекційної форсунки, служить для сприяння просоченню по всій товщині. Схематичне зображення аплікатора смоли та чотирьох зон просочення показано на рисунку 2.7.

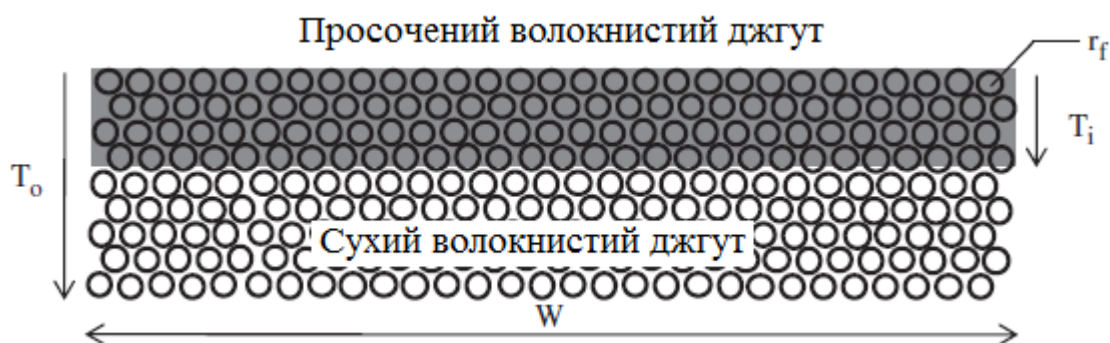


Рисунок 2.6 – Схематичне зображення поперечного перерізу прямокутного розгорнутого пучка волокон під просочувальним штифтом:

$r_f$  – радіус волокна,  $T_0$  – початкова товщина пучка, а  $T_i$  – товщина, просочена смолою.

Щодо параметрів процесу, які впливають на процес просочення, для моделювання, показаного на рисунках 2.8–2.13, були зроблені такі припущення [9-14]:

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- (1) пучок волокон є нерухомим, а смола проникає в пучок волокон з одного боку;
- (2) кожен режим просочення (див. Рисунок 5) діє незалежно;
- (3) просочення відбувається поперечному перерізу пучка  $0,65 \text{ мм}^2$ , як показано на рисунку 2.6, та
- (4) розглядається лише поперечне просочення.

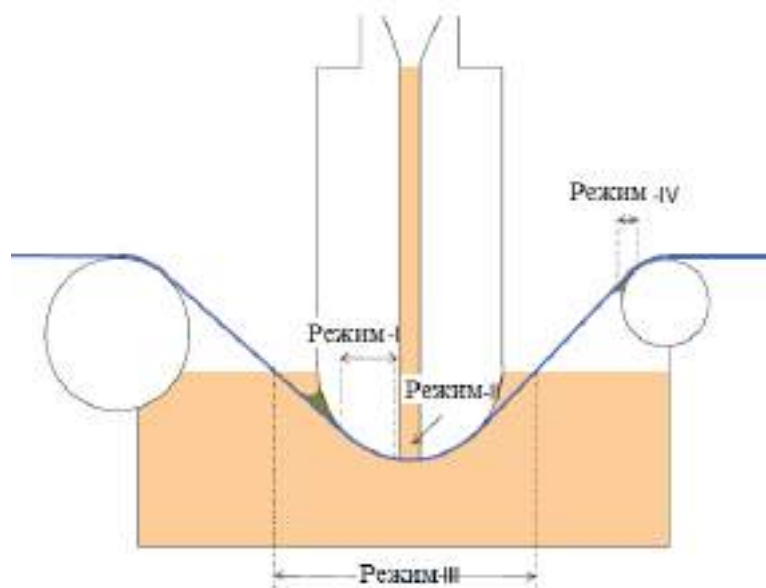


Рисунок 2.7 – Схематичне зображення зон в аплікаторі смоли, що відповідають чотирьом режимам просочення.

Порівняння чотирьох режимів просочення, описаних вище, показано на рисунку 2.8. У наступному тексті термін «ступінь просочення» означає площу поперечного перерізу джгута ( $0,65 \text{ мм}^2$ ), яка була повністю просочена.

На рисунку 2.8 видно, що просочення відбувається швидше за допомогою режимів I та IV. Це пояснюється тим, що в плівці смоли, яка присутня в клиноподібній ділянці між пучком та поверхнею штифта, створюється вищий тиск, що сприяє стисканню смоли через волокнистий джгут. У процесі просочення на основі штифта просочення відбувається

					КВРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

протягом відносно невелика частина штифта порівняно з довжиною контакту. Ця ділянка була названа «зоною просочення» [9].

Таблиця 2.1 – Зведення відомих (або припущених) та розрахованих значень для заданих параметрів, пов'язаних з конструкцією інжектора смоли.

В'язкість смоли	Пас	0,35
Об'ємна частка волокна ( $V_f$ )	%	70
Пористість пучка волокон	%	30
Товщина джгута	мм	80
Ширина джгута ( $W$ )	мм	8
Радіус волокна ( $r_f$ )	мм	8,5
Лінійна густина пучка ( $T_{EX}$ )	г/км	1200
Кількість волокон у пучку ( $N$ )	–	2000
Поверхневий натяг смоли ( $\sigma$ )	Н/м	0,044
Кут змочування між волокном та смолою	Градуси	57
Форм-фактор напрямку потоку смоли в пучку (безрозмірний)	–	2
Натяг у пучку волокон ( $T$ )	Н	10
Кривизна пучка волокон, що контактує з просочувальним штифтом ( $R$ )	мм	15
Максимальне ущільнення волокон ( $V_A$ )	%	90,7
Архітектура волокна	–	Шестикутна
Площа пучка волокон ( $A$ )	мм <sup>2</sup>	0,65
Змочений діаметр ( $D_E$ )	мм	0,0145
Поперечний капілярний тиск ( $P_c$ )	кПа	6,58
Прикладений тиск у шарі смоли між волокном та просоченням штифтом ( $P_{app}$ )	кПа	83,3
Поперечна проникність ( $KT, H$ )	м <sup>2</sup>	$1,12 \times 10^{-13}$
Час просочення ( $\Delta t$ )	с	0,0152

					КВРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		46



просочення, він є найповільнішим. Просочення на основі  $P_c$  також важливе, оскільки час перебування для цього режиму просочення може бути значно довшим, ніж для інших механізмів, обговорених раніше.

Додаткове просочення, коли просочені джгути намотуються на оправку, також можливе.

Вплив  $P_i$  на час просочення представлено на рисунку 2.9. З рівняння (2.1) видно, що час просочення обернено пропорційний прикладеному тиску. Як і очікувалося, збільшення  $P_i$  з 20 кПа до 140 кПа призводить до значного скорочення часу повного просочення пучка волокон. Повідомлялося про вищі тиски інжекції, в діапазоні від 300 кПа до 1000 кПа, для систем інжекції із закритою формою. Просочення скловолокна 2400 Tex розплавленим поліпропіленом збільшилося на 10% при збільшенні тиску з 17,6 кПа до 20,6 кПа. Однак просочення зменшилося на 18% при збільшенні тиску з 20,6 кПа до 25,5 кПа. Зазначене зниження просочення було зумовлене зменшенням проникності при вищих тисках. Моделювання, показане на рисунку 2.9, припускало, що проникність не залежить від  $P_i$ .

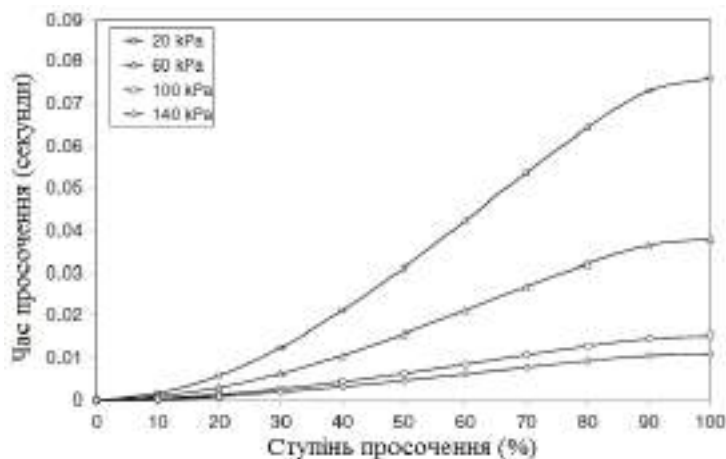


Рисунок 2.9 – Вплив тиску ін'єкції на час просочення. Тут ширина пучка була взята рівною 8 мм, а натяг у пучку становив 10 Н.

### Вплив товщини пучка волокон.

Схема, представлена на рисунку 2.4, показує розташування станції розподілу волокон (пункт з кодом (X)), де волокна піддаються поперечному розподілу; волокна також піддаються додатковому розподілу в точці входу установки просочення смолою (пункт з кодом VIII). Зі зменшенням товщини пучка волокон час поперечного просочення зменшується, як описано в рівнянні (2.1). Моделювання впливу збільшення ширини пучка  $i$ , отже, зменшення товщини пучка на час просочення показано на рисунку 2.10. З практичної точки зору, необхідно досягти балансу між ступенем розподілу волокон (для сприяння просоченню) та пошкодженням та сегментацією волокон. Пошкодження волокон може спричинити негативний вплив на механічні властивості композитів, тоді як надмірна сегментація може призвести до утворення повітря, що призводить до утворення пустот у композитах.

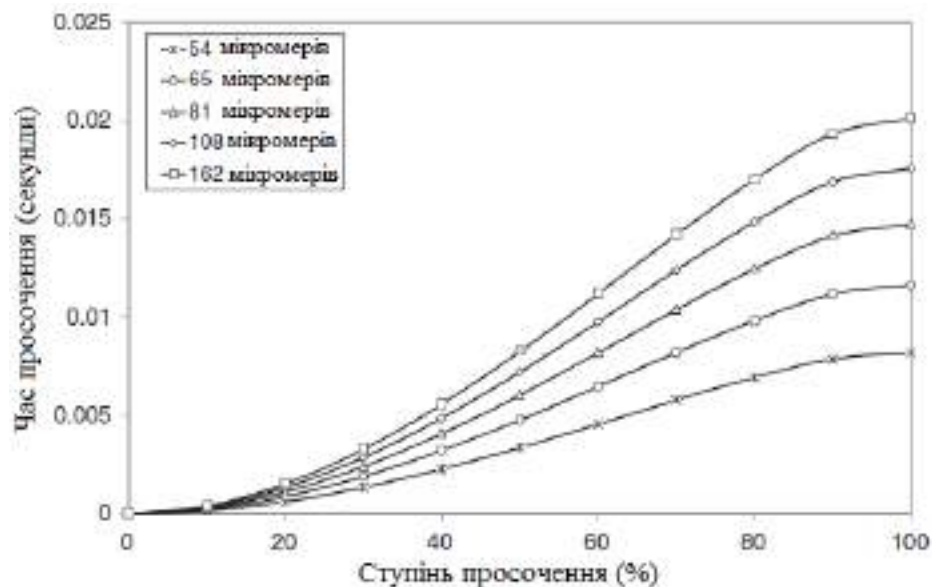


Рисунок 2.10 – Вплив товщини пучка волокон на ступінь просочення. Тут натяг у пучку волокон був фіксований на рівні 10 Н, а ширина волокна змінювалася з 4 мм до 12 мм.

Вплив натягу.

Загальний натяг у пучку волокон виникає в результаті попереднього натягу, сил тертя у смоляній ванні та контактних поверхнях. Поступове нарощування натягу для пучка волокон, що перетинає його та контактує з штифтом, можна апроксимувати як функцію параметри процесу. [9] Натяг у пучку волокон впливає на процес просочення двома протилежними способами: (i) він збільшує тиск у плівці смоли ( $P_w$ ) згідно з рівнянням (2.6) та (ii) він зменшує проникність ( $K$ ) пучка. Зі збільшенням натягу в джгуті волокна всередині пучка упаковуються щільніше, що призводить до зменшення проникності пучка. [10] Ряд моделей просочення, про які повідомлялося раніше, були отримані з урахуванням стаціонарних умов, коли зміни проникності в результаті зміни параметрів обробки не враховуються. Це пояснюється тим, що потрібні дані про зміни, що відбуваються в об'ємній частці волокна під час процесу просочення. Бренан та Уолрат [9] повідомили про числову модель, де проникність враховувалася як функція змін в архітектурі упаковки пучка. Їхнє дослідження було проведено на спеціально виготовленій колісці з полікарбонатного волокна з використанням води як змочувальної рідини в закритій системі прес-форм. У цьому випадку динамічні зміни проникності на мікрорівні не враховуються. Вплив натягу на пучок волокон на просочення показано на рисунку 2.11. Тут припускалося, що поперечна проникність не залежить від прикладеного натягу.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

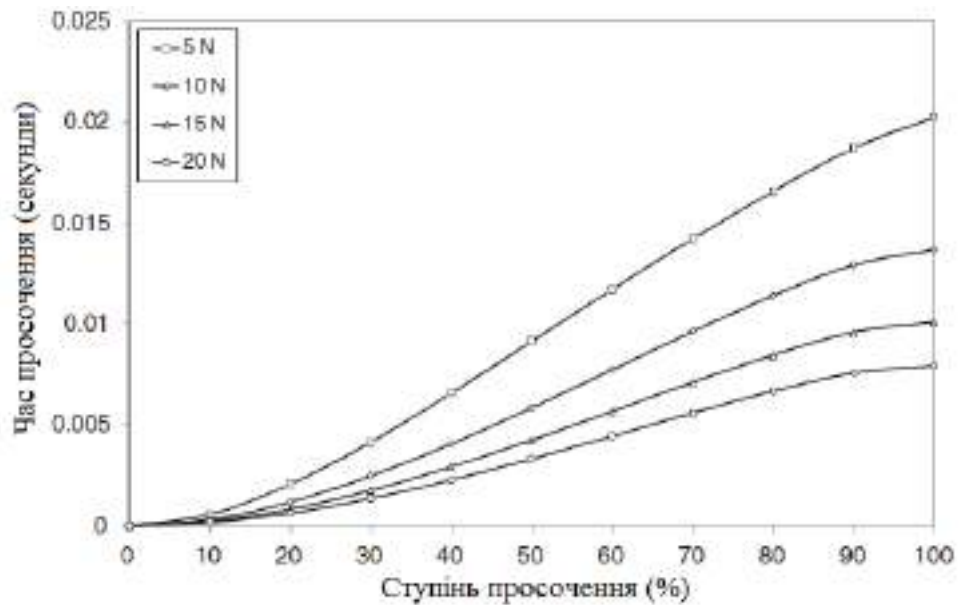


Рисунок 2.11 – Вплив натягу волокна на час просочення та ступінь просочення. Тут ширина волокна становить 8 мм, а капілярний тиск ( $P_c$ ) становив 6,6 кПа.

#### Вплив в'язкості смоли на просочення.

Відповідно до рівняння (2.1), час просочення збільшується зі збільшенням в'язкості смоли. Що стосується ванни зі смолою, то в'язкість системи смоли може збільшуватися з часом, як обговорювалося раніше. Це може посилитися, якщо всередині ванни зі смолою є області, де система смоли може застоюватися. Вплив в'язкості системи смоли на час просочення показано на рисунку 2.12.

#### Вплив пучка волокон Тех на просочення.

Вплив Тех волокон (лінійна густина пучка волокон, виражена в г/км) на ступінь просочення показано на рисунку 2.13. Видно, що для просочення джгута волокон з вищим значенням Тех потрібно більше часу. [9]

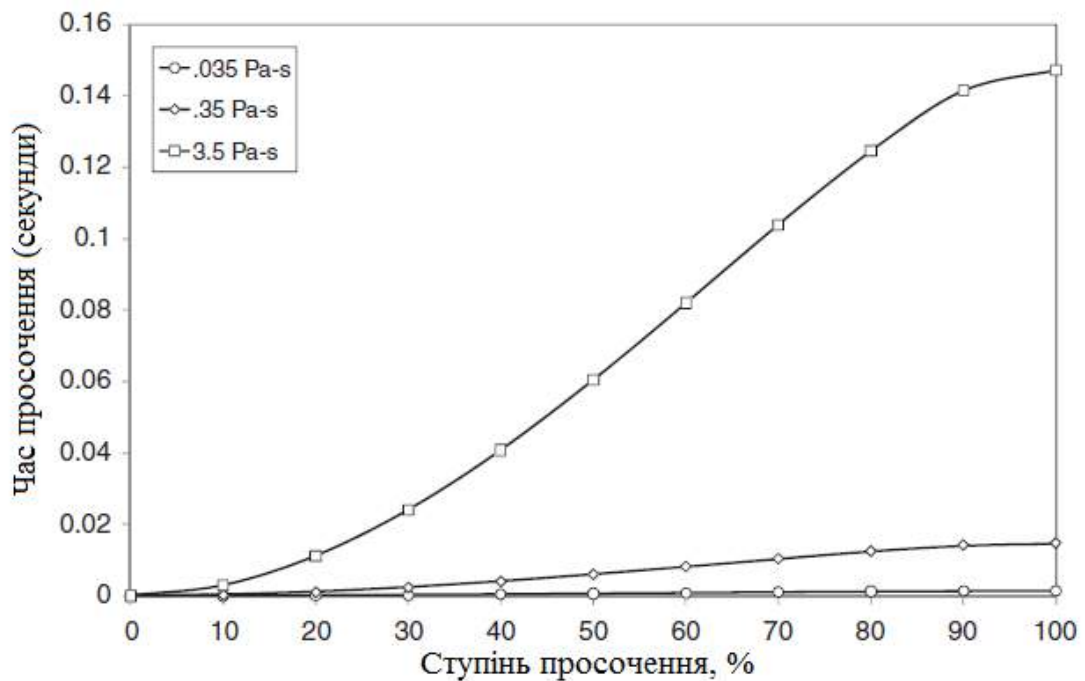


Рисунок 2.12 – Вплив в'язкості смоли на час та ступінь просочення. Тут ширина пучка становить 8 мм, а натяг у пучку — 10 Н.

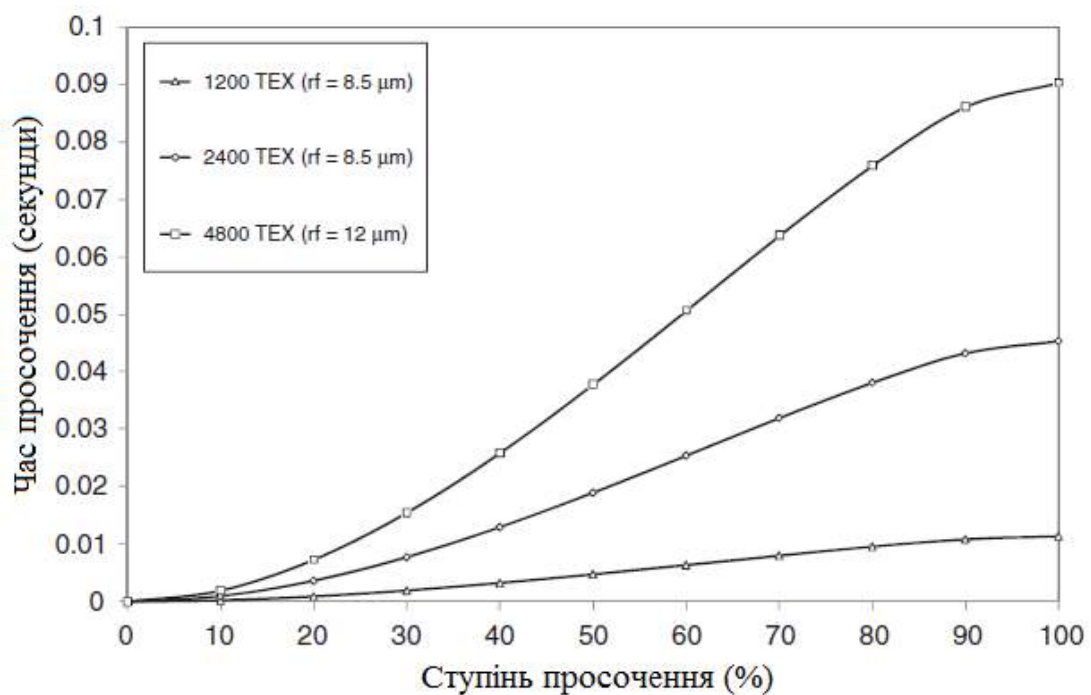


Рисунок 2.13 – Вплив лінійної щільності (Tex) пучка на час просочення та ступінь просочення. Тут ширина пучка становить 8 мм, а натяг у пучку 10 Н.

Вплив швидкості намотування на ступінь просочення.

Схема аплікатора смоли разом з доступними довжинами контакту в кожній із зон просочення представлена на рисунку 2.7. Зведена інформація про довжини контакту та пов'язані з ними режими просочення наведена в таблиці 2.2. Час перебування пучка волокон у кожній із зон просочення був отриманий шляхом співвіднесення доступної довжини контакту для кожного режиму просочення зі швидкістю намотування або швидкістю витягування пучка волокон.

Таблиця 2.2 – Зведена інформація про довжину контакту, доступну для аплікатора смоли, як показано на рисунку 2.7.

Режим просочення	Довжина контакту (мм)
Режим I (клин смоли)	15
Режим II (впорскування смоли)	2
Режим III (ванна смоли)	35
Режим IV (скребок)	3

Як видно з рисунку 2.14, процес просочення був розділений на чотири зони просочення, що відповідають нахилам кривих просочення.

(1) Перша зона відповідає області, де пучок волокон потрапляє в мініатюрний резервуар зі смолою; тут просочення відбувається за допомогою капілярної дії. Хоча швидкість просочення за Режимом III відносно повільна, просочення відбувається на більшій довжині.

(2) Друга зона, де спостерігається збільшення швидкості просочення, відповідає одночасному просоченню за допомогою тиску, що створюється в клиноподібній секції інжекторної форсунки ( $P_w$ ),  $P_c$  та смоли  $P_i$ .

(3) Третя зона відповідає області, де пучок волокон залишає інжекторну форсунку і досягає скребка. Тут режим просочення переважно відбувається за допомогою капілярної дії.

(4) Нарешті, пучок волокон зазнає просочення за допомогою клиноподібної дії на скребку (Режим IV).

З рисунка 2.14 видно, що нижчі швидкості намотування сприяють ступеню просочення пучка волокон. Це пояснюється збільшенням часу перебування, доступного для пучка волокон, який рухається з нижчими швидкостями.

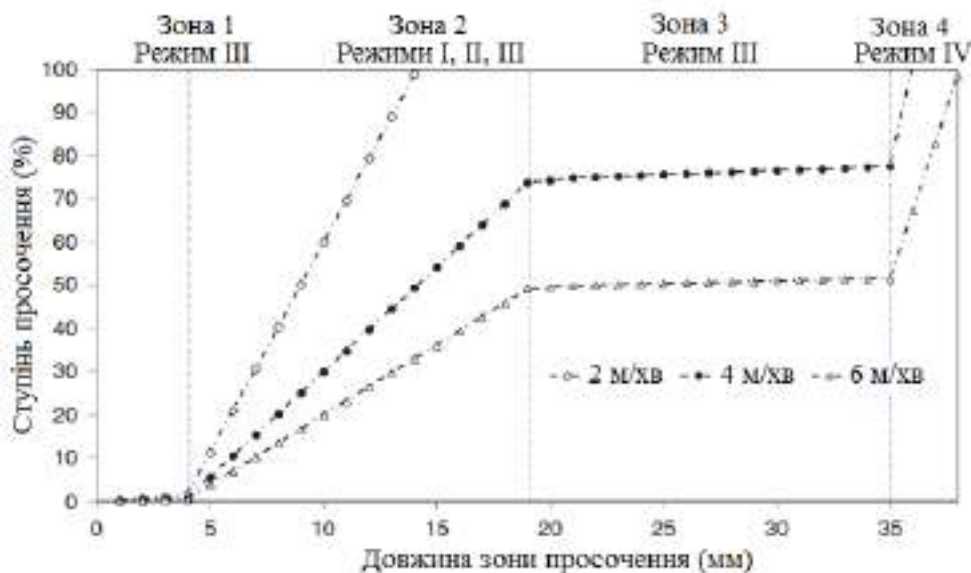


Рисунок 2.14 – Вплив швидкості намотування на ступінь просочення. Тут тиск у клиноподібній частині сопла для введення смоли ( $P_w$ ) становив 166,6 кПа, капілярний тиск ( $P_c$ ) – 6,6 кПа, тиск на скребку ( $P_{sc}$ ) – 833 кПа, тиск введення смоли ( $P_i$ ) – 13,8 кПа, ширина пучка була прийнята рівною 8 мм, а натяг у пучку – 20 Н.

## 3 ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ СТАЛЕВОГО ТА КОМПОЗИТНОГО КАРДАННИХ ВАЛІВ

### 3.1 Початкові умови аналізу карданного валу.

Основна власна кількість обертів карданного валу для легкового автомобіля, невеликої вантажівки та фургона має бути не вище 2400 об/хв щоб уникнути вихрової вібрації. Передача крутного моменту приводного вала повинна бути більше 154 Нм. Зовнішній діаметр приводного вала не повинен перевищувати 100 мм через обмеження простору. Враховуючи можливість передачі крутного моменту 154 Нм орієнтовно приймаємо зовнішній діаметр валу 0,072 відповідно. Для моделювання приймаються наступні припущення [15].

Вал обертається з постійною швидкістю навколо своєї поздовжньої осі. Вал має рівномірну, круглу форму поперечного перерізу. Вал ідеально збалансований, всі демпфування та нелінійні ефекти виключені.

Співвідношення напруження - деформація для композиційного матеріалу є лінійно-пружні; отже, закон Гука може бути застосовний для композитного матеріалу. Оскільки пластинка тонка і не прикладені площинні навантаження, розглядається як підплощинне напруження.

Привідний вал для простоти спочатку був ідеалізований як порожнистий циліндричний вал, який закріплений на одному кінці а на іншому кінці прикладається крутний момент 151 Нм як показано на рис. 3.1.

З врахуванням початкових даних таких як  $R_o$  - зовнішній радіус валу,  $R_i$  - внутрішній радіус валу,  $L$  - довжина валу,  $E$  - модуль Юнга сталі (SM45C),  $T$  - Прикладений крутний момент маємо:  $R_o = 0,036$  м;  $R_i = 0,011$  м;  $L = 1,5$  м ;  $E = 207e9$ ;  $T = 151$  Нм. [15]

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

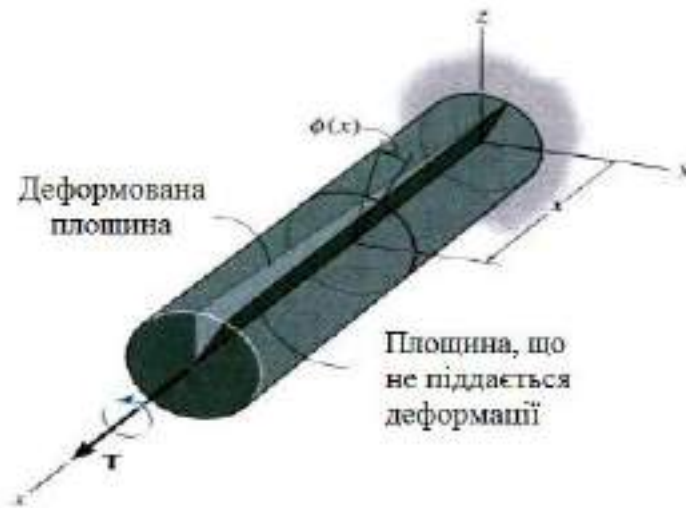


Рисунок 3.1 – Вал з прикладеним крутним моментом.

Визначаємо прогин валу  $y_{\max}$  [15]:

$$y_{\max} = \frac{ML^2}{2EI}, \quad (3.1)$$

$$y_{\max} = \frac{151 \cdot 1,5^2}{2(207 \cdot 10^9)(1,178 \cdot 10^{-6})} = 0,00069 \text{ м, або } 0,69 \text{ мм.}$$

Максимальні напруження прогину [15]:

$$\tau_Y = \frac{T \frac{d_0}{2}}{I}, \quad (3.2)$$

$$\tau_Y = \frac{151 \cdot 0,036}{(\pi/2)[(0,036^4 - 0,011^4)]} = 66,5 \text{ МПа.}$$

Максимальні напруження зсуву:  $\tau_Z = \frac{Tr_0}{J} = 20,78 \text{ МПа.}$

					КВРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

### 3.2 Результати моделювання сталюого порожнистого валу.

Результати деформації можемо побачити на рисунку 3.2. З наведених результатів аналізу деформації значення для сталюого валу становить 0,59 мм.

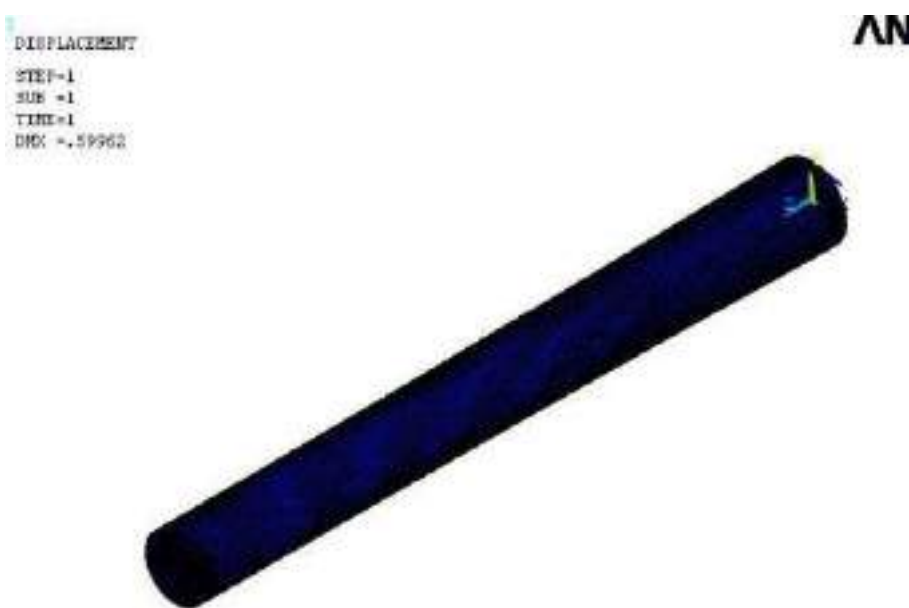


Рисунок 3.2 – Результат деформації сталюого валу.

Значення напружень зсуву можемо побачити на рисунку 3.3. З наведених результатів напружень зсуву значення для сталюого валу становить 28 МПа.

Значення напружень фон-Мізера можемо побачити на рисунку 3.4. З наведених результатів напружень фон-Мізера значення для сталюого валу становить 96 МПа.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

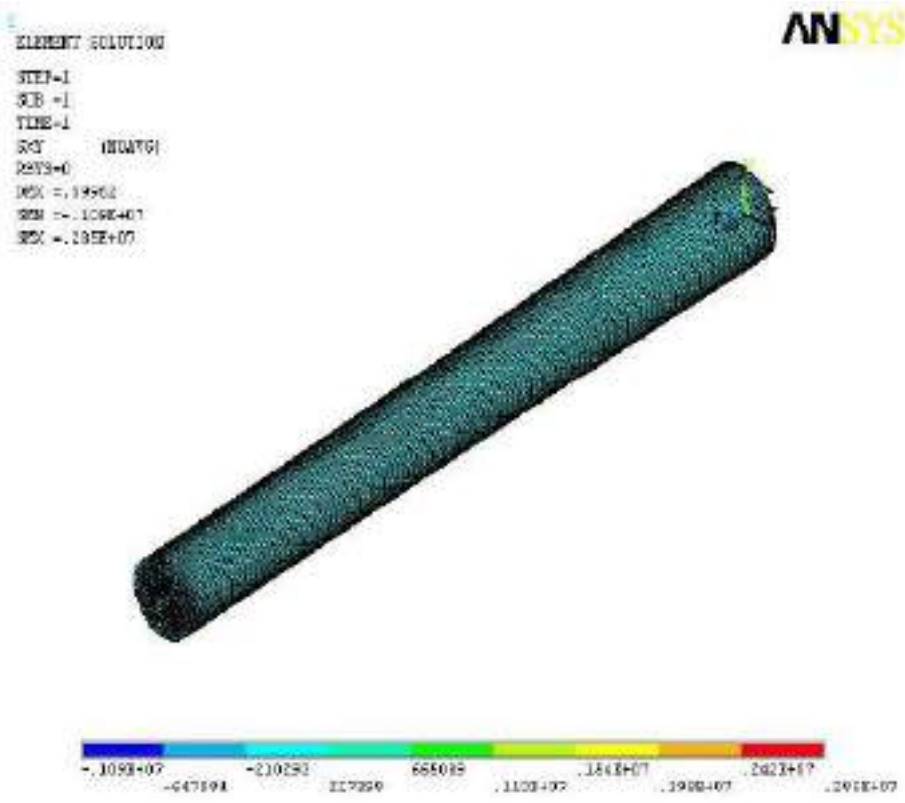


Рисунок 3.3 – Результат напружень зсуву сталевго валу.

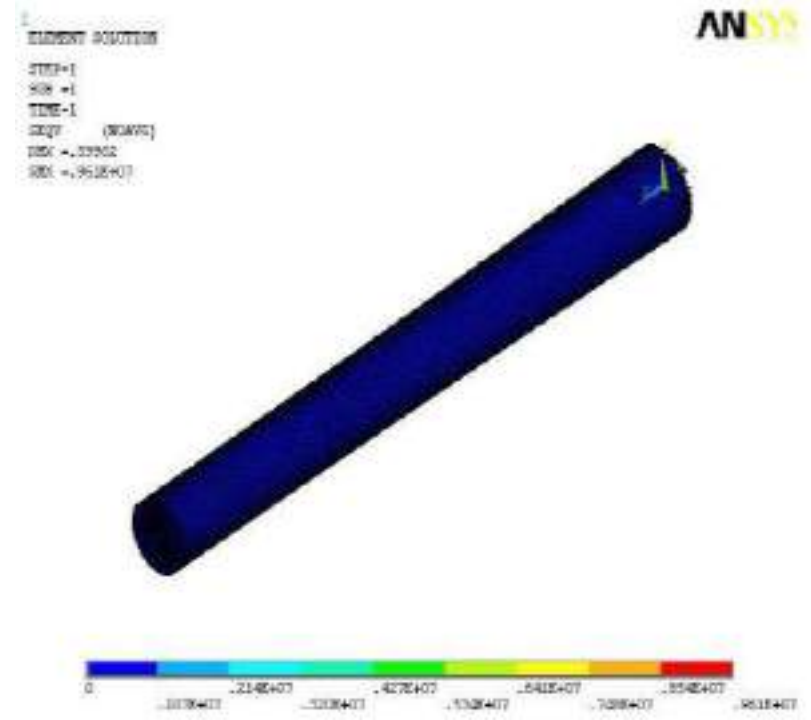


Рисунок 3.4 – Результат напружень фон-Мізеса сталевго валу.

Шляхом порівняння теоретичних значень і значень моделювання порожнистого вала спостерігається наступні співвідношення (рис. 3.5 – 3.7) встановимо похибку моделювання.

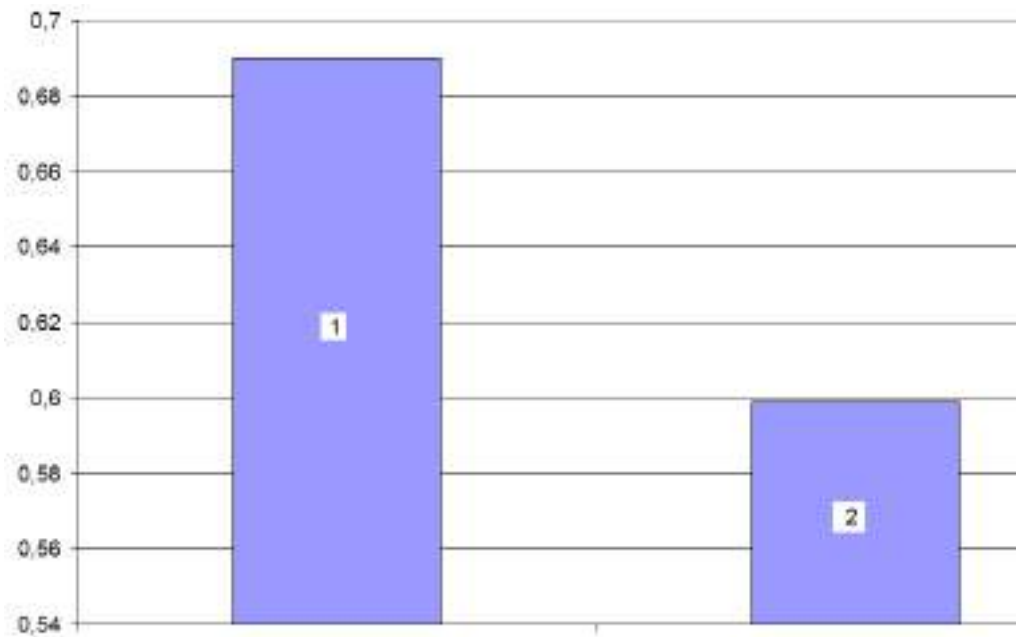


Рисунок 3.5 – Порівняльний аналіз деформації валу:

1 – розрахункове значення; 2 – значення в результаті моделювання.

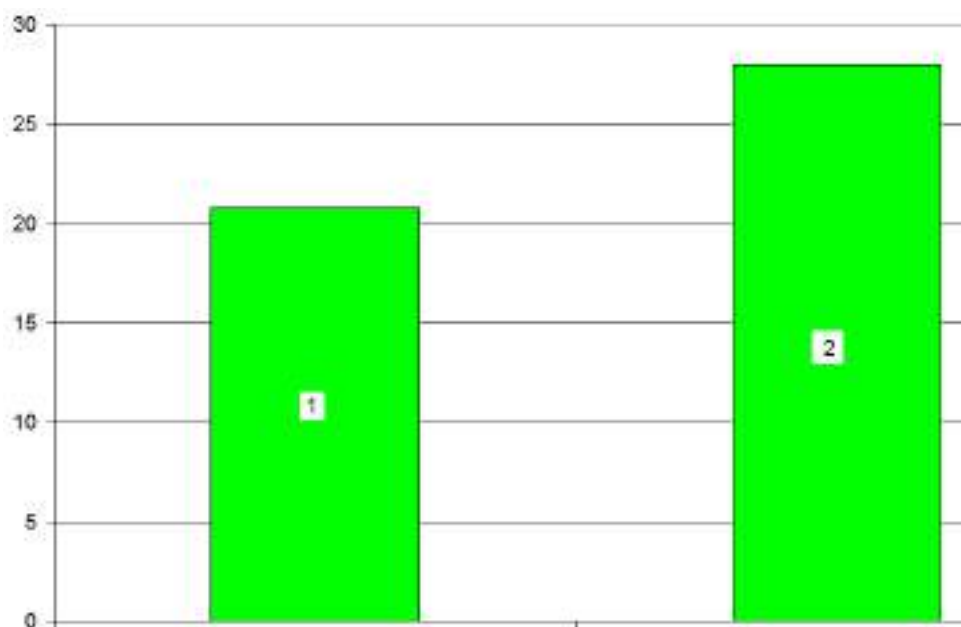


Рисунок 3.6 – Порівняльний аналіз напружень зсуву валу:

1 – розрахункове значення; 2 – значення в результаті моделювання.

Розрахункове значення деформації становить 0,69 мм а змодельоване значення деформації становить 0,599 мм, значення напружень зсуву розраховане 20,78 МПа, а змодельоване було 28 МПа, для напружень фон-Мізеса ці значення становлять 66 МПа і 96 МПа. Ці результати показують різницю між теоретичними та змодельованими значеннями лише 5,4 %, що знаходиться в допустимих межах.

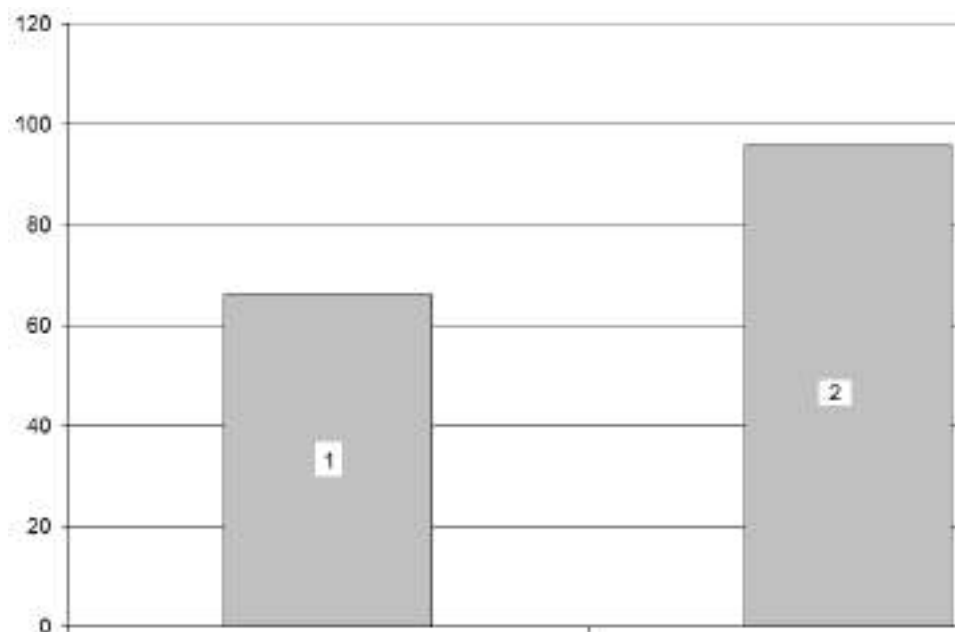


Рисунок 3.7 – Порівняльний аналіз напружень фон-Мізеса валу:  
1 – розрахункове значення; 2 – значення в результаті моделювання.

### 3.3 Моделювання 3D CAD і 3D FE.

Розглянемо моделі разом із навантаженнями та граничними умовами.

Крок 1: Створення 3D моделі САПІА виконано на основі розглянутих технічних характеристик зі специфікацій Toyota Qualis, рисунок 3.8

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

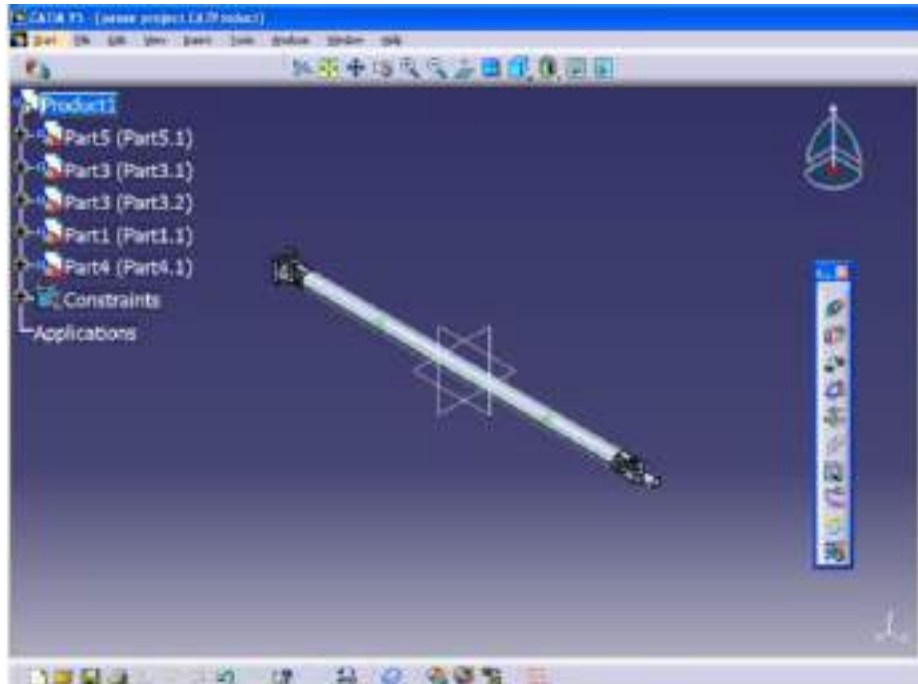


Рисунок 3.8 – Модель Catia.

Крок 2: Створення моделі 3D FE Модель 3D FE для карданного валу. Сітка генерується з використанням шестигранних елементів 2-го порядку (Solid 95 і Solid 186), рисунок 3.9.

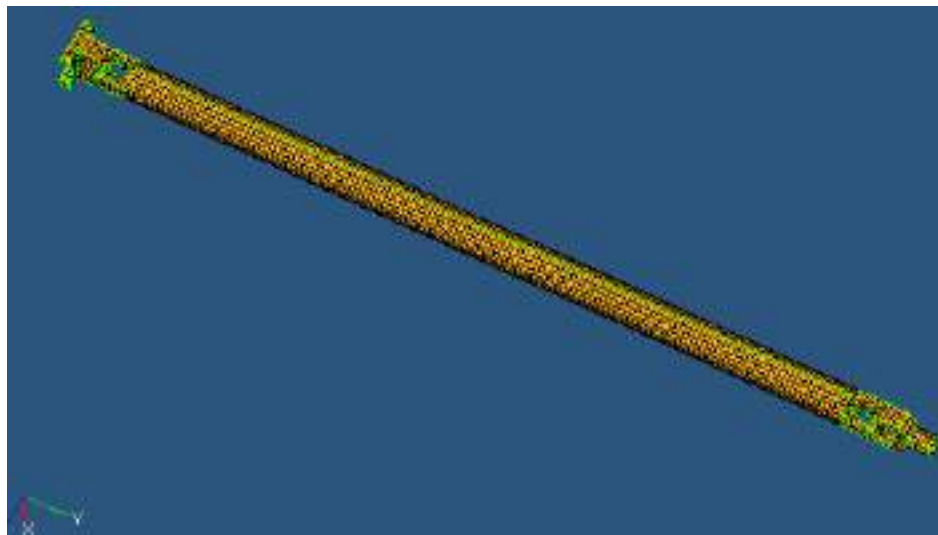


Рисунок 3.9 – 3D – модель.

Крок 3: Використання наведеної вище моделі гіперсітки з межею умови в ansys 12.0 передбачені необхідні результати, рисунок 3.10.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

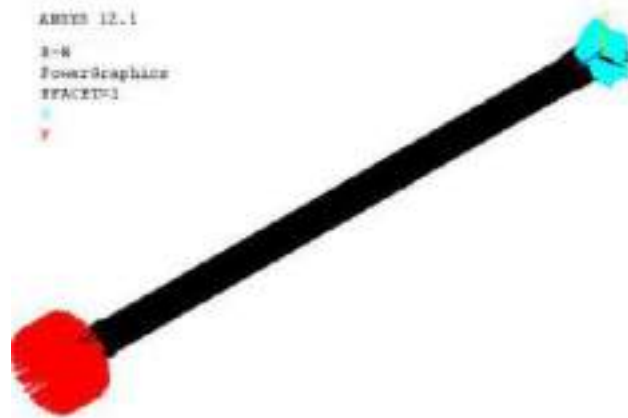


Рисунок 3.10 – Модель валу в Ansys з обмеженнями і умовами.

Крок 4: Шляхом застосування граничних умов і навантаження, отримані результати будуть порівнюватися між собою і буде запропонований відповідний матеріал, який забезпечує меншу величину кручення та частоту, ближчу до сталі.

### 3.4 Моделювання траєкторії руху тріщин.

Можливість передбачити траєкторію тріщини допомагає проектувальнику включити адекватну геометричну толерантність у структурний проект для збільшення терміну служби деталі. Методологія, яка використовується для дослідження механіки поширення тріщини, складається з наступних етапів:

Крок 1: Введення тріщини шириною 1 мм і 3 мм глибиною в геометричній моделі Catia, рисунок 3.11.

Крок 2: Створення 3D моделі FE і створення дрібної сітки в області тріщини. Використання контактних елементи в місцях карданного з'єднання.

Крок 3: Застосування граничних умов і вирішення для отримання значення напружень зсуву в різних місцях ближче до вершини тріщини, рисунок 3.12.

					КВРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Крок 4. Використання передбачених вище значень для побудови графіків для визначення значень інтенсивності напружень для сталевого та композитного валів.

Крок 5: Інтерпретація результатів як для сталевого, так і для композитного валів.

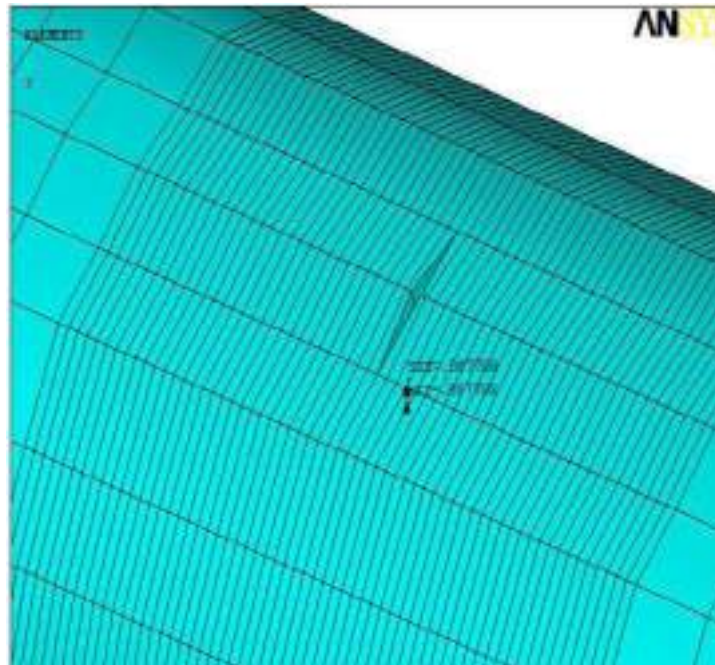


Рисунок 3.11 – Вал з тріщиною.

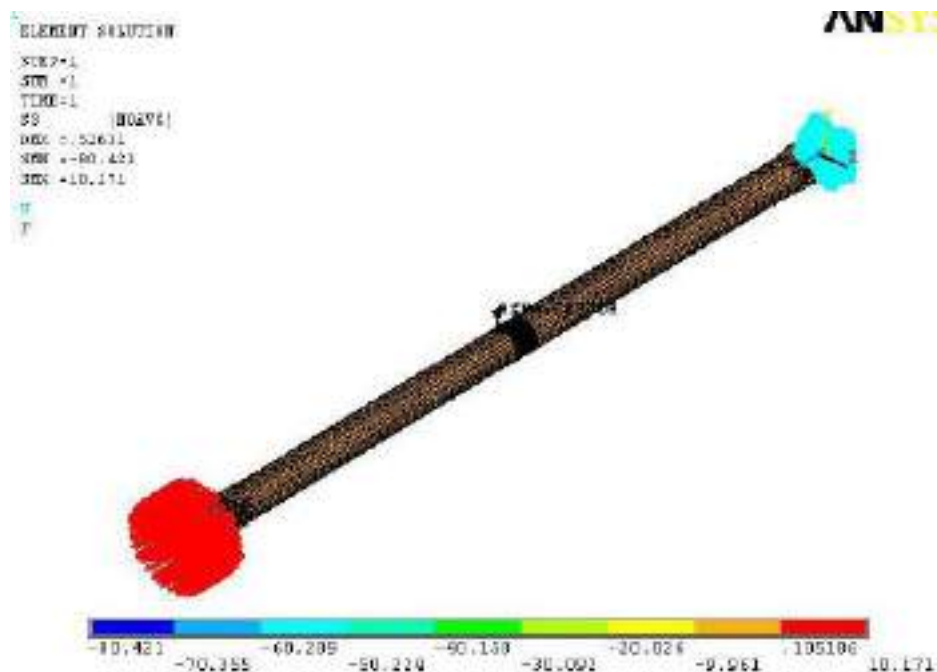


Рисунок 3.12 – Аналіз на кручення валу з тріщиною.

										КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
											63
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата							

Властивості матеріалів, які використовуються для аналізу, наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Механічні властивості дослідних матеріалів.

№	Властивість	Сталь SM45C	Композит	Розмірність
1	модуля Юнга напрямок X	2,07e11	95,71e9	Па
2	модуля Юнга напрямок Y	-	10,45e9	Па
3	модуля Юнга напрямок Z	-	10,45e9	Па
4	коефіцієнт Пуассона, XY	0,3	0,34	
5	коефіцієнт Пуассона, YZ	-	0,37	
6	коефіцієнт Пуассона, XZ	-	0,34	
7	модуль зсуву, XY	-	25,08 e9	Па
8	модуль зсуву, YZ	-	25,08 e9	Па
9	модуль зсуву, XZ	-	25,08 e9	Па
10	щільність	7600	1402	кг/м <sup>3</sup>

### 3.5 Порівняльний аналіз.

Деформація сталевого та композитного валу порівняння має наступні значення. Результат деформації сталевого карданного валу наведено на рисунку 3.13, а композитного на рис. 3.14.

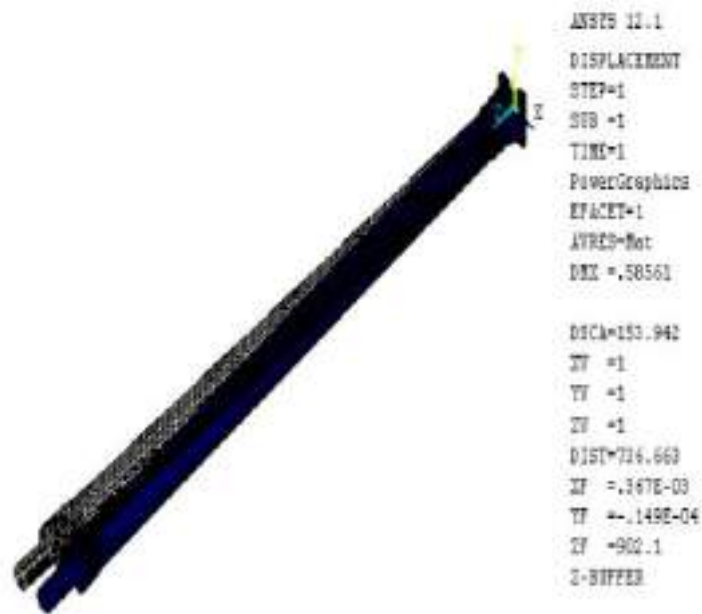


Рисунок 3.13 – Результати деформації сталевого валу.



Рисунок 3.14 – Результати деформації композитного валу.

Розглядаючи наведені вище результати, виявлено, що сталевий вал має значення деформації 0,589 мм, а композитний приводний вал має значення деформації 8,1 мм.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Порівняння напружень кручення. На рисунку 3.15 і 3.16 показано результати аналізу. Сталевий вал із максимальним значенням напружень в напрямку ХУ 53,80 МПа та композитний вал із скловолокна / епоксидної смоли з максимальним значенням напружень зсуву в напрямку ХУ становить лише 49,82 МПа. Змодельовані значення ANSYS наведені нижче.



Рисунок 3.15 – Аналіз кручення сталевого валу.

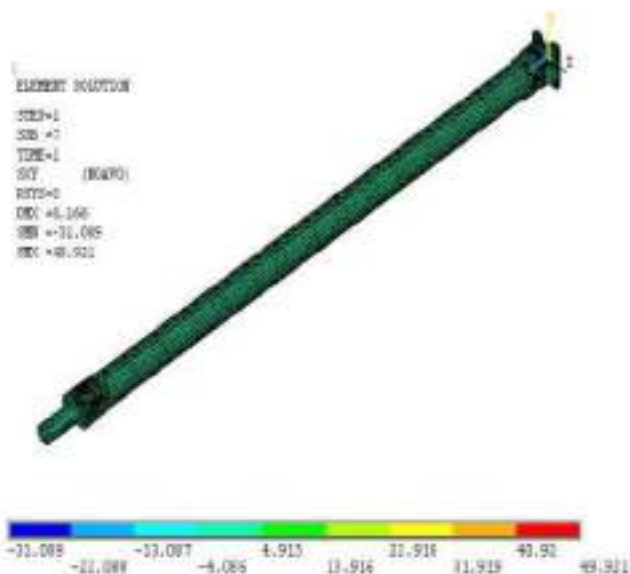


Рисунок 3.16 – Аналіз кручення композитного валу.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		66

Результати модельного аналізу наведено на рисунках 3.17 і 3.18.



Рисунок 3.17 – Аналіз моделі сталевго валу.



Рисунок 3.18 – Аналіз моделі композитного валу.

За результатами аналізу моделі AVOE встановлено, що власна частота сталевго вала становить 3,7 Гц і 2,78 Гц для композитного, тому з прогнозованих значень можна спостерігати, що значення власної частоти є дуже близьке до сталевго та композитного вала.

Результат власного вигину (напрямок всередину) наведено на рисунках 3.19 і 3.20.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

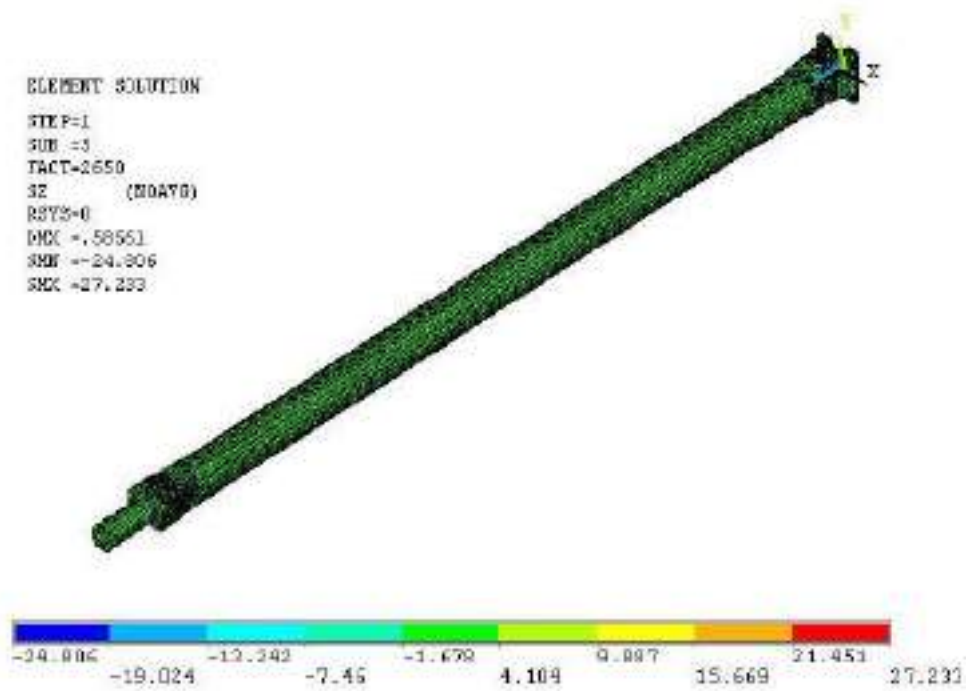


Рисунок 3.19 – Вигин сталевго валу.

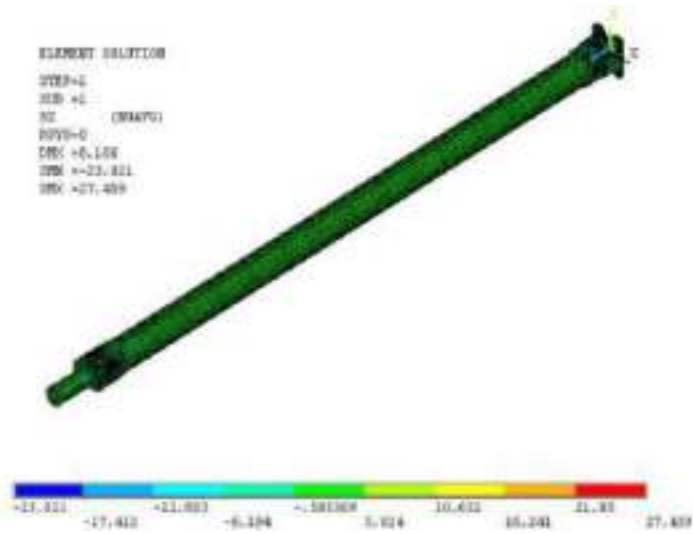


Рисунок 3.20 – Вигин композитного валу.

З вищенаведеного аналізу результатів прогину видно, що обидва вали мають значення прогину 27 МПа.

Розподіл значень інтенсивності напружень для валу з тріщиною наведено на рисунку 3.21.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		68



Прогнозовані значення інтенсивності концентрації напружень сталевого валу наведено в таблиці 3.2 і на рисунку 3.23.

Таблиця 3.2 – Значення інтенсивності концентрації напружень сталевого валу.

№	Відстань, r	Значення напружень зсуву у напрямку XY, ( $\sigma$ )	значення КІ, ( $\sigma\sqrt{r}$ )
1	29,51	0,08770	0,472
2	28,93	0,00904	0,09
3	30,59	-0,000055	-0,0003

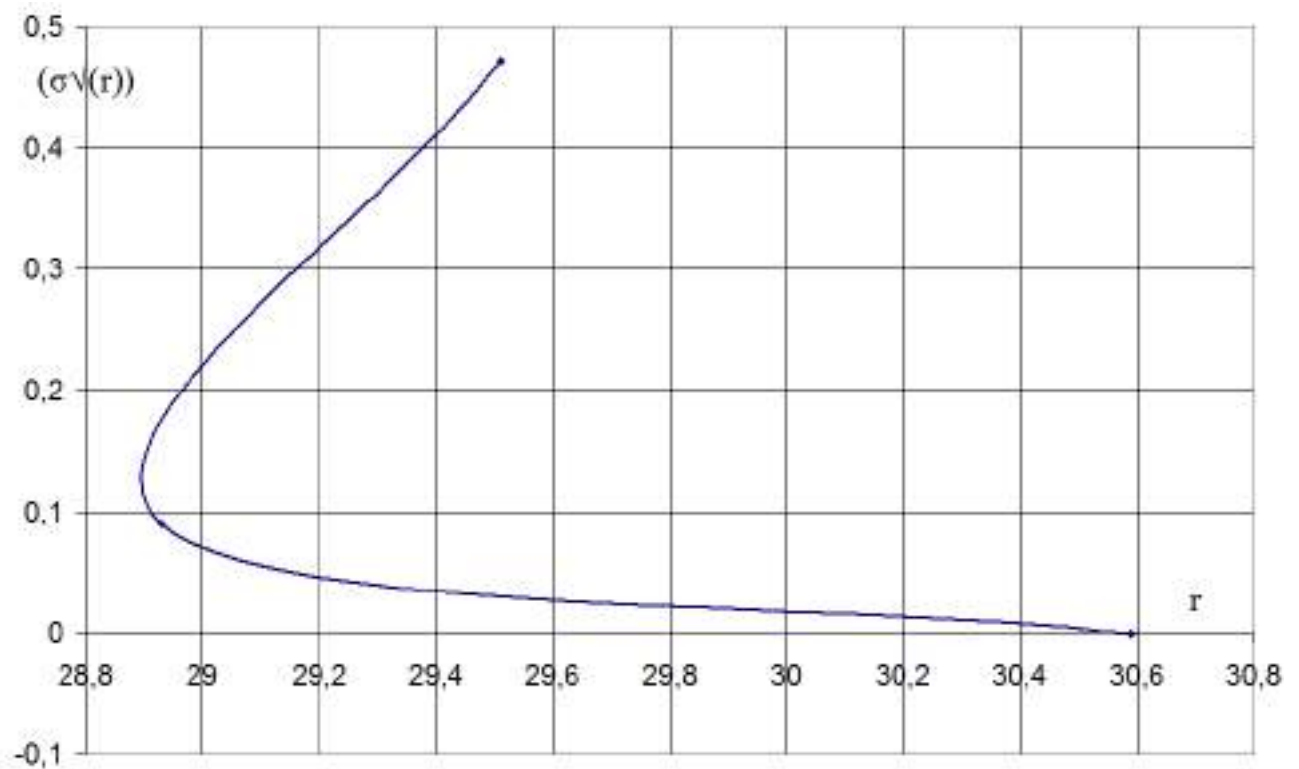


Рисунок 3.23 – Графік інтенсивності концентрації напружень сталевого вала.

Розглядаючи графік, побудований між відстанню ( $r$ ) і напругою  $\sigma\sqrt{r}$  від вершини тріщини, значення коефіцієнта інтенсивності напруги  $K_{III}$  для сталевого вала спостерігається як  $0,13 \text{ МПа}\sqrt{\text{мм}}$ .

Композитний вал із вирізаною частиною з напруженнями на вершині тріщини зображено на рисунку 3.24.

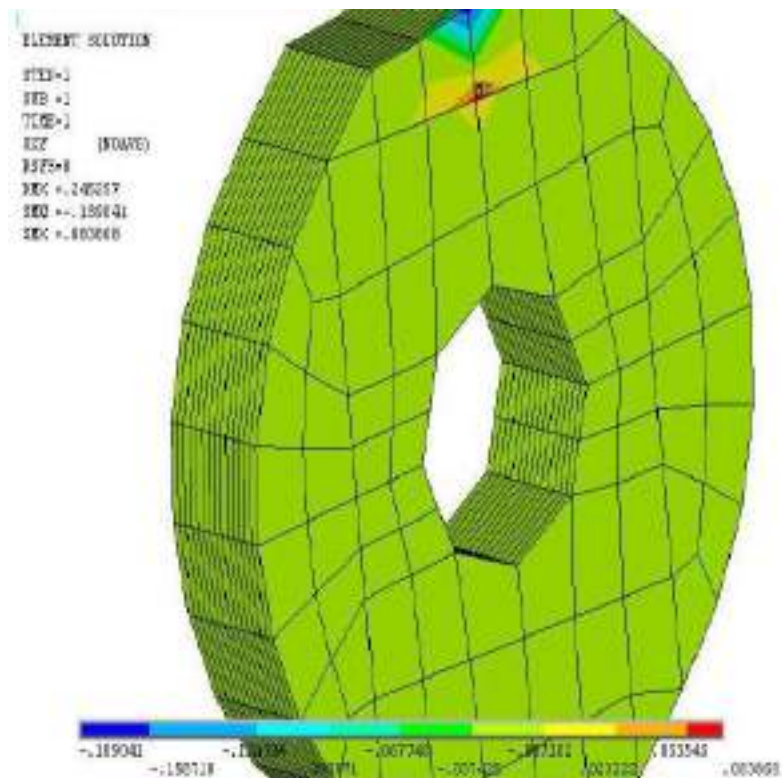


Рисунок 3.24 – Композитний вал з поперечним перерізом вершини тріщини.

Прогнозовані значення інтенсивності концентрації напружень композитного валу наведено в таблиці 3.3 і на рисунку 3.25.

Таблиця 3.3 – Значення інтенсивності концентрації напружень композитного валу.

№	Відстань, r	Значення напружень зсуву у напрямку XY, ( $\sigma$ )	значення КІ, ( $\sigma\sqrt{r}$ )
1	29,51	0,000741	0,003993
2	28,93	0,0001126	0,0007
3	30,59	-0,000056	-0,0003

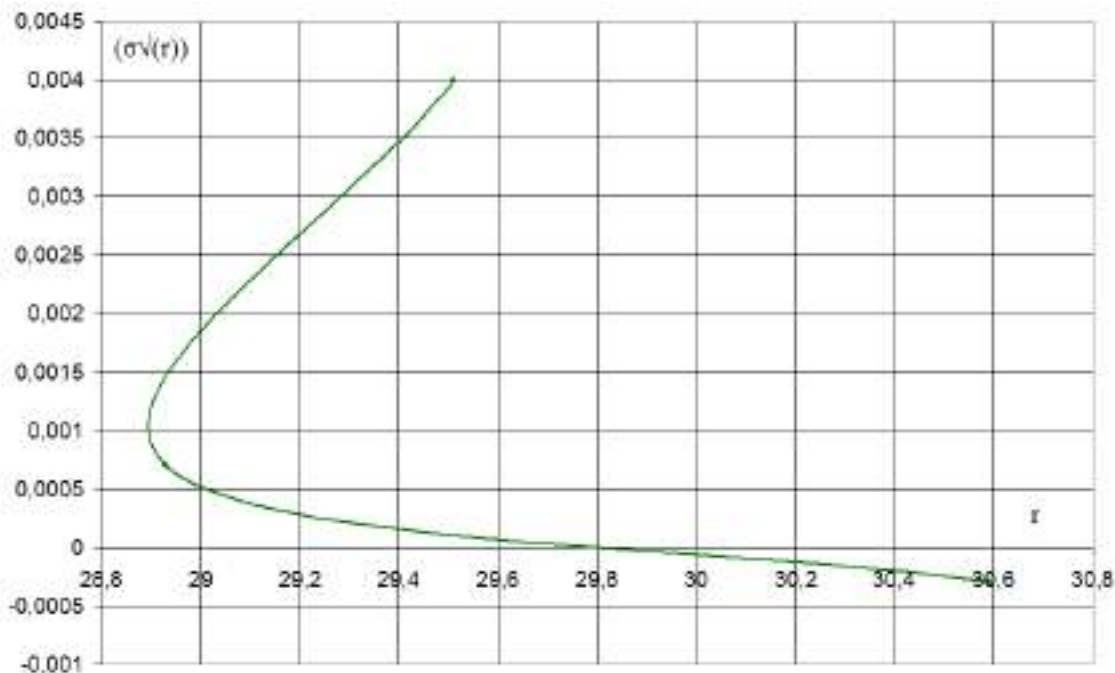


Рисунок 3.25 – Графік інтенсивності концентрації напружень композитного вала.

Розглядаючи графік, побудований між відстанню ( $r$ ) і напругою  $\sigma\sqrt{r}$  від вершини тріщини, значення коефіцієнта інтенсивності напружень  $K_{III}$  для композитного вала спостерігається як  $0,012 \text{ МПа}\sqrt{\text{мм}}$ .

Загальний аналіз порівняння зведено в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 – Результати порівняльного аналізу.

Матеріал	Сталь	Композит
Деформація, мм	0,5816	8.16
Кут нахилу	-	$\pm 45$
Власна частота, Гц	3,76	2,04
Значення напружень кручення, МПа	53,80	49,82
Значення напружень прогину, МПа	27,45	27,23
Значення інтенсивності напружень, МПа√мм	0,13	0,012
Зниження маси в %	-	23

## ВИСНОВКИ

1. Виконано аналіз умов роботи карданного валу автомобіля Toyota Qualis з визначенням НДС в залежності від власної частоти від його приведеної довжини.

2. Було представлено модифікований процес мокрого намотування нитки скловолокна для виготовлення композитного валу, де смола та затверджувач зберігаються в окремих відсіках, і за потреби перекачуються до статичного змішувача, де вони ретельно змішуються. Потім змішана смоляна система подається до спеціально розробленого блоку просочення, де просочуються волокнисті джгути.

3. Методом скінченних елементів вдалось встановити, що використання композитного матеріалу призвело до економії ваги в 28 % у порівнянні зі звичайним сталевим. Беручи до уваги зниження ваги, деформацію, напруження зсуву та резонансні частоти, очевидно, що композит має найбільш обнадійливі властивості для заміни сталі з двох розглянутих матеріалів.

4. Застосування композиту дає можливість оптимізації конструкції, тобто перетворення ведучого вала, що складається з двох частин (звичайного сталевого валу), у однокомпонентний легкий композитний вал.

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Електронний ресурс:  
[https://www.automoli.com/uk/vehicles/toyota/mark-ii/mark-ii-wagon-qualis-957/#google\\_vignette](https://www.automoli.com/uk/vehicles/toyota/mark-ii/mark-ii-wagon-qualis-957/#google_vignette) (дата звернення 6.06.2025)
2. Будова автомобіля: Навчальний посібник / А. І. Панченко, А. А. Волошина, О. В. Болтянський, І. І. Мілаєва, І. А. Панченко, А. А. Волошин. – Мелітополь: ВПЦ «Люкс», 2021. – 247 с.
3. Матеріалознавство : навч. посіб. / В.І. Бузило, В.П. Сердюк, А.В. Яворський, О.А. Гайдай / М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2021. – 243 с .
4. AN, K. a W. WANG. Transmission performance and fault analysis of a vehicle universal joint. Advances in Mechanical Engineering [online]. 2017, 9(5), 1–10.
5. VLK, František. Transmissions of motor vehicles. Brno: František Vlk, 2006. ISBN isbn80–239–6463–1.
6. Технологія композиційних матеріалів: Навчальний посібник / Гончаренко В.В., Коваленко І.В. –К.:, 2007.-131 с.
7. Lee, D.G., Kim, H.S., Kim, J.W., and Kim, J.K. 2014. Design and manufacture of an automotive hybrid aluminum/composite drive shaft.
8. M.A. Badie, A. Mahdi, A.R. Abutalib, E.J. Abdullah and R. Yunos, 2016. Automotive composite driveshaft: investigation of the design variable effects.
9. Sad Pandita, Mas Irfan, Var Machawar, N Shotton-Gla, Ras Mahendran1, Cuff Wait, Ma Paget, The Harris, K Lick and Gift Fernando. Clean wet-filament winding – Part 1: design concept and simulations. Journal of Composite Materials, 2012, 47(3) 379–390.

					КВРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		74

10. Toso YMP, Ermanni P and Poulidakos D. Thermal phenomena in fiber-reinforced thermoplastic tape winding process: computational simulations and experimental validations. J Compos Mater 2016; 38: 107–135.

11. Kim J, Moon TJ and Howell JR. Transient thermal modelling of in-situ curing during tape winding of composite cylinders. J Heat Transf 2023; 125: 137–146.

12. Irfan MS, Machavaram VR, Mahendran RS, et al. Lateral spreading of a fibre bundle via mechanical means. J Compos Mater 2012; 46(3): 311–330.

13. Amico SC and Lekakou C. Axial impregnation of a fiber bundle Part 1: capillary experiments. Polymer Compos 2022; 23: 249–263.


14. Ahn KJ and Seferis JC. Simultaneous measurements of permeability and capillary pressure of thermosetting matrices in woven fabric reinforcements. Polymer Compos 2021; 12: 146–152.

15. R.P.Kumar, K. Rambabu. Design And Optimization Of Drive Shaft With Composite Materials. International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT) ISSN: 2278-0181, 2012, Vol. 1 Issue 7: P. 1-9.

					КВРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТКИ

					КвРМТВА. 21154.01.07.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		76



# ***Модернізація карданної передачі автомобіля Toyota Qualis шляхом заміни матеріалу***

Виконав ст. гр. МТВА-21-1:

***Мамчур Сергій Леонідович***

Науковий керівник: к.т.н., доц. каф. ТАМ:

***Посонський Сергій Феліксович***



Одним із таких автомобілів є Toyota Mark II Qualis, – це повнопривідний 5 дверний автомобіль Е класу, представлений у кузові універсал.

Карданний вал - це обертовий вал, який передає потужність від двигуна до диференціала повнопривідних та задньопривідних транспортних засобів.

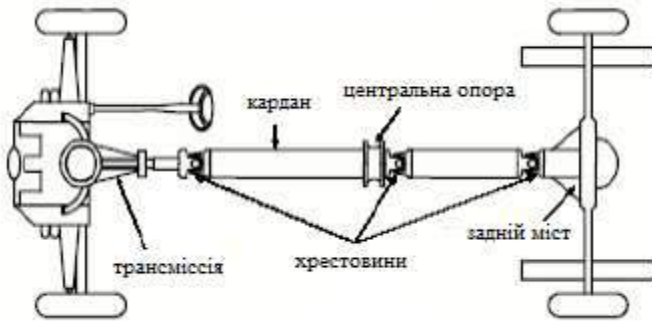
Тип двигуна	бензин	Коробка	автомат
Потужність	140 к.с.	Об'єм двигуна	2.2 л
Привід	повний	Паливо	АІ-95
Країна марки	Японія	Клас автомобіля	Е
Кількість дверей	5	Кількість місць	5
Довжина, мм	4790	Ширина, мм	1785
Висота, мм	1470	Колісна база	2670
Ширина передньої колії, мм	1545	Ширина задньої колії, мм	1520
Розмір коліс	205/65/R15	Кліренс, мм	145
Об'єм багажника мін/макс, л	-	Об'єм паливного бака, л	70
Споряджена маса, кг	1570	Коробка передач	автомат

**Мета роботи:** виконати модернізацію карданної передачі автомобіля Toyota Qualis шляхом заміни сталевого карданного валу на композитний.

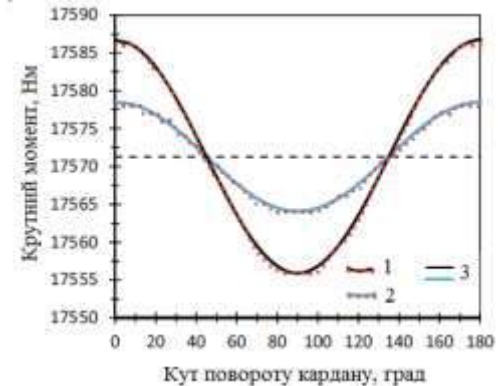
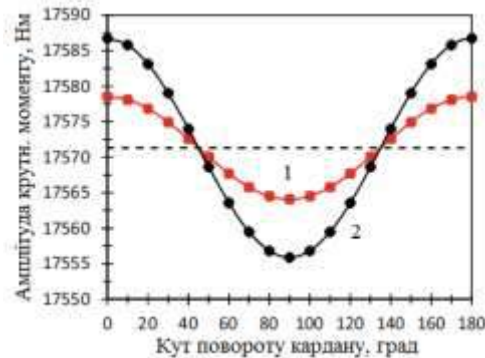
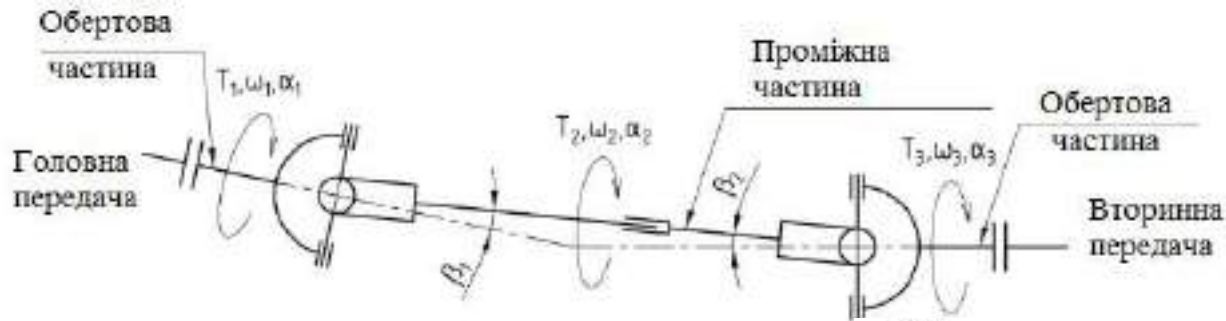
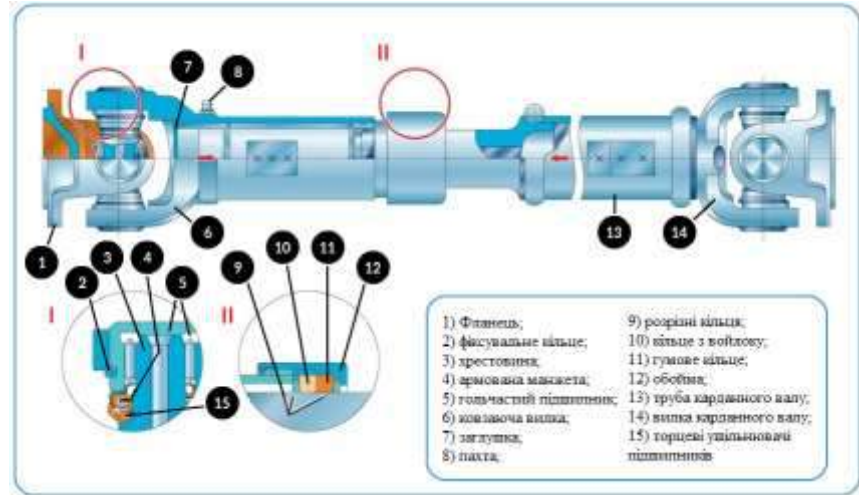
**Завдання:**

- 1) Виконати аналіз умов роботи карданної передачі автомобіля Toyota Qualis.
- 2) Виконати аналіз технології виготовлення композитних валів.
- 3) Виконати порівняльний аналіз сталевого і композитного валу автомобіля Toyota Qualis шляхом застосування методів моделювання.

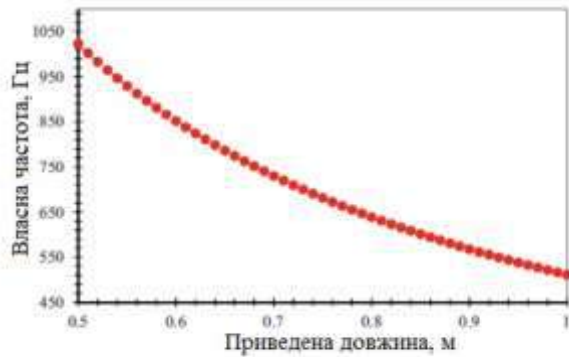
# Аналіз конструкції та умов роботи карданного валу



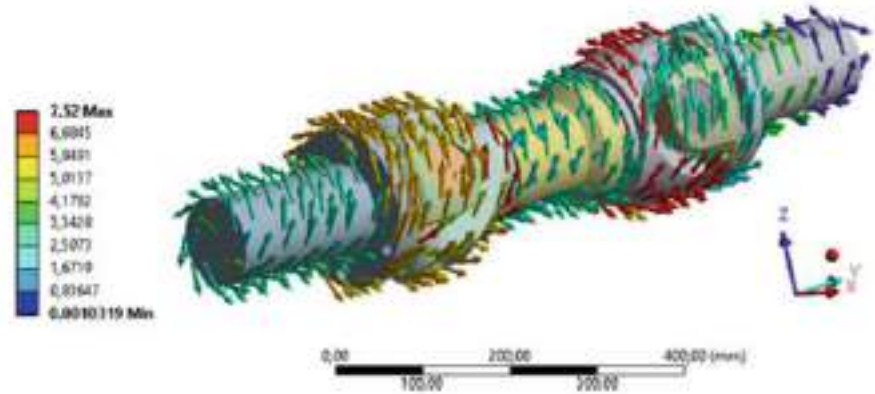
Схематичне розташування карданної передачі автомобіля



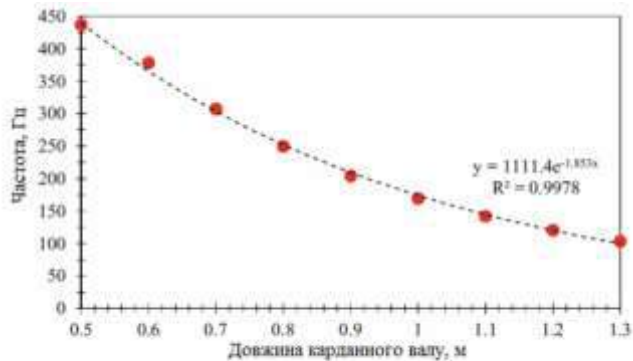
## Аналіз НДС



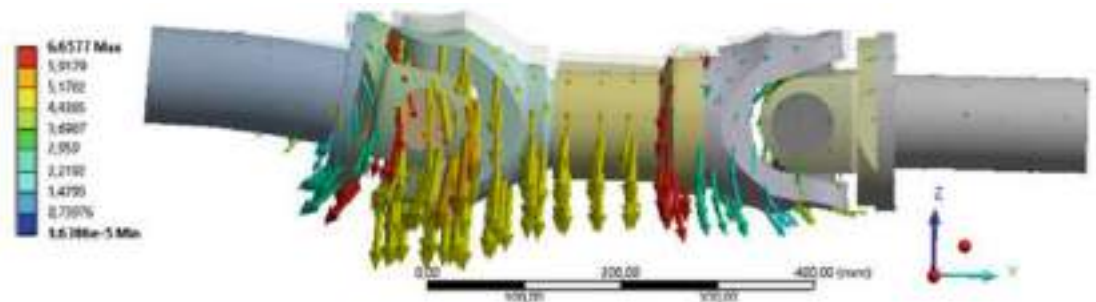
Залежність власної частоти від приведеної довжини.



Напрямок деформації на першій власній частоті.



Залежність довжини карданного валу від першої власної частоти.



Напрямок деформації на другій власній частоті.

# Аналіз матеріалів для карданних валів

Хімічний склад сталі 45 згідно ДСТУ 7809.

C	Fe	Mn	Cu	Ni	Si	P	Cr	S	As
0,42-0,5	~97	0,5-0,8	<0,25	<0,25	0,17-0,37	<0,035	<0,25	<0,04	<0,08

Механічні властивості сталі 45 згідно ДСТУ 7809

Стан поставки	Межа короточасної міцності, ReH (МПа)	Відносне звуження, %	Межа плинності, Rm(МПа)	Мінімальне відносне подовження $\sigma_r$ , %
Після нормалізації	600	40	355	16

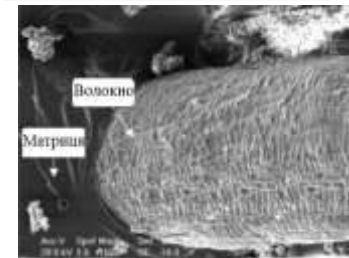
США	G10450,1044, G10420, 1045, G10440, 1045H, G10430, M1044
Англія	C45, 060A47, 1449-50CS, 080M46, 1449-50HS, 080M, 50HS, C45E
Німеччина	Cq45, 1.1191, 1.0503, 1.1193, C45, Cm45, C45E, C45R, Ck45, Cf45
Євросоюз	C45EC, 1.1191, 2C45, C45E, C45, C46
Японія	S45C, SWRCH45K, S48C, SWRCH48K
Франція	1C45, XC42H1TS, 2C45, AF65, C40E, C45RR, C45, C45E, CC45, XC42H1, XC45, XC48, XC45H1, XC48H1
Іспанія	C45, C45k, C45E, F.1140, C48k, F.114, F.1142
Швеція	1672, 1650
Італія	C45E, 1C45, C45, C43, C45R, C46
Болгарія	C45, 45, C45E
Польща	45
Китай	45, ZG310-570, 45H, SM45, ML45, ZGD345-570
Бельгія	C45-2, C45-1, C46
Австралія	HK1042, 1045, K1042
Чехія	12056, 12050
Австрія	C45SW
Румунія	OLC45q, OLC45, OLC45X
Угорщина	A3, C45E
Південна Корея	SM48C, SM45C

Типовий діапазон властивостей епоксидних смол.

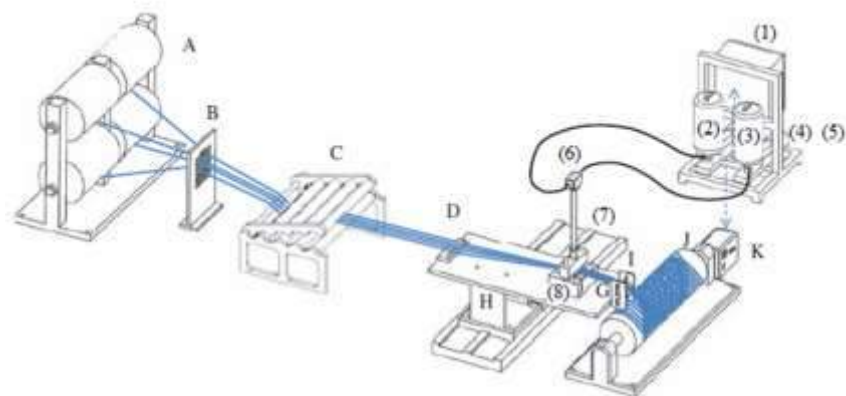
Питома вага	1,2 – 1,3
Модуль міцності (МПа)	2500 – 4500
Міцність на розрив (МПа)	50 – 150
Коефіцієнт теплового розширення, $10^{-6}$ мм/°C	45 – 70
Вологопоглинання (% за 24 години)	0,05 – 0,15

Властивості композитних армуючих волокон.

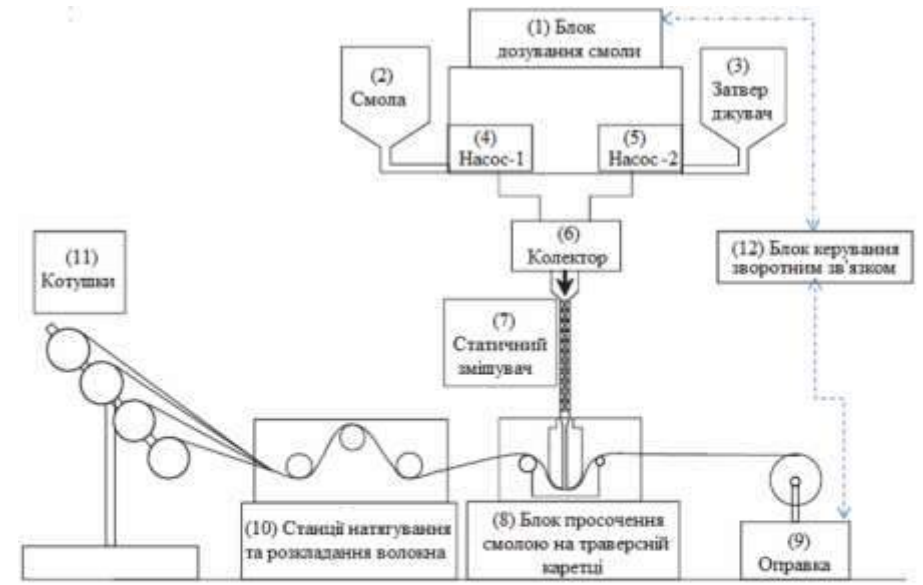
Матеріал	Модуль міцності на розтяг (E) (ГПа)	Міцність на розрив ( $\delta$ ) (ГПа)	Подовження ( $\epsilon$ ) (%)	Щільність ( $\rho$ ) (мг/м <sup>3</sup> )	Питомий модуль (E/ $\rho$ ) (мг/кг)	Вартість (\$/кг)
E-glass	72,4	2,4	2,6	2,54	28,5	1,1
S-glass	85,5	4,5	2,0	2,49	34,3	22...33



# Типовий процес виготовлення композитного валу



**Схематичне зображення процесу намотування «чистого» волокна:**  
 (А) Шпулі для волокон. (В) Направляюча для волокон. (С) Система натягу.  
 (D) Направляючі штифти. (G) Пучки волокон, просочені смолою. (H) Пересувна каретка з платформою/адаптером для розміщення інтегрованого блоку розподілу волокон та імпрегатора смоли (VIII). (I) Роллик «колектор» або D-подібне кільце, (J) Оберткова оправка. (K) Блок керування зі зворотним зв'язком для синхронізації блоку розподілу смоли зі швидкістю витягування волокон або швидкістю обертання оправки.



**Схематичне зображення концепції чистого намотування волокна:**  
 (1) блок дозування смоли; (2) резервуар для смоли; (3) резервуар для затверджувача; (4 та 5) прецизійні шестеренні насоси; (6) колектор; (7) статичний змішувач; (8) блок просочення смолою, розташований на траверсній каретці; (9) обертний дорі; (10) станції натягу та розподілу волокна; (11) шпулярники або бобіни; та (12) система керування зі зворотним зв'язком для забезпечення синхронізації між дорном та блоком дозування

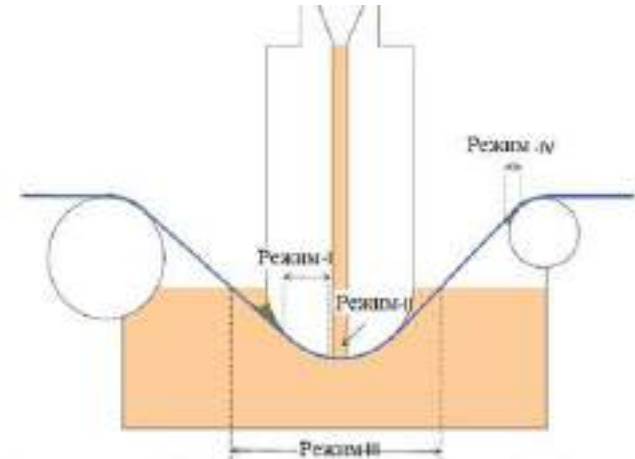


**Схематичне зображення поперечного перерізу прямокутного розгорнутого пучка волокон під просочувальним штифтом:**  
 $r_f$  – радіус волокна,  $T_o$  – початкова товщина пучка, а  $T_i$  – товщина, просочена смолою.

## Параметри процесу просочення

Зведення значень для заданих параметрів, пов'язаних з конструкцією інжектора смоли.

В'язкість смоли	Пас	0,35
Об'ємна частка волокна ( $V_f$ )	%	70
Пористість пучка волокон	%	30
Товщина джгута	мм	80
Ширина джгута ( $W$ )	мм	8
Радіус волокна ( $r_f$ )	мм	8,5
Лінійна густина пучка ( $T_{EX}$ )	г/км	1200
Кількість волокон у пучку ( $N$ )	–	2000
Поверхневий натяг смоли ( $\gamma$ )	Н/м	0,044
Кут змочування між волокном та смолою	Градуси	57
Формфактор напрямку потоку смоли в пучку (безрозмірний)	–	2
Натяг у пучку волокон ( $T$ )	Н	10
Кривизна пучка волокон, що контактує з просочувальним штифтом ( $R$ )	мм	15
Максимальне ущільнення волокон ( $V_A$ )	%	90,7
Архітектура волокна	–	Шестикутна
Площа пучка волокон ( $A$ )	мм <sup>2</sup>	0,65
Змочений діаметр ( $D_E$ )	мм	0,0145
Поперечний капілярний тиск ( $P_c$ )	кПа	6,58
Прикладений тиск у шарі смоли між волокном та просоченням штифтом ( $P_{app}$ )	кПа	83,3
Поперечна проникність ( $KT, H$ )	м <sup>2</sup>	$1,12 \times 10^{-13}$
Час просочення ( $\Delta t$ )	с	0,0152



Схематичне зображення зон в аплікаторі смоли, що відповідають чотирьом режимам просочення.

