

Хмельницький національний університет
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Пояснювальна записка до дипломної роботи бакалавра

Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»

Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»

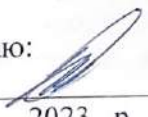
Освітньо-професійна програма: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

на тему: «Підвищення надійності кузовів транспортних засобів
застосуванням класмеханічних з'єднань»

Шифр: ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ

Виконав: студент 3 курсу, група МТВАс -20-2  А.О. Федорчук

Керівник  д.т.н., проф. О.В. Диха

До захисту допускаю:
Зав. кафедри ТАМ  Диха О.В.

8 06 2023 р.

Хмельницький, 2023 р.

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
Факультет інженерії, транспорту та архітектури
Кафедра трибології, автомобілів та матеріалознавства

Освітньо-кваліфікаційний рівень: бакалавр
Галузь знань: 13 «Механічна інженерія»
Спеціальність: 132 «Матеріалознавство»
Освітня програма: «Відновлення та технічний сервіс автомобілів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав.кафедрою ТАМ
Диха О.В.
" 20 " березня 2023 р.

ЗАВДАННЯ
НА ДИПЛОМНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА

Федорчуку Артему Олександровичу

1. Тема проекту:

«Підвищення надійності кузовів транспортних засобів застосуванням клеємеханічних з'єднань»

керівник проекту: Диха Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

Затверджено наказом університету від 1.03 2023р. № 5

2. Строк подання студентом проекту на кафедру: 10.06.2023 р.

3. Вихідні дані до проекту:

- 1) Технічні умови на виготовлення клеємеханічних з'єднань.
- 2) Річна програма ремонту.
- 3) Результати літературного огляду і патентного пошуку.

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

1. Аналіз конструкцій кузовів транспортних засобів та перспективні матеріали у транспортному машинобудуванні
2. Методика проектування каркасно-панельного кузова з макрогеометричними відхиленнями
3. Аналіз механічної поведінки клеємеханічних сполук з композитними елементами
4. Інженерна методика оцінки довговічності клеємеханічних сполук

5. Консультанти розділів роботи

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

6. Дата видачі завдання: 20 березня 2023р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз конструкцій кузовів транспортних засобів та перспективні матеріали у транспортному машинобудуванні	1.05.2023	
2	Методика проектування каркасно-панельного кузова з макрогеометричними відхиленнями	15.05.2023	
3	Аналіз механічної поведінки клеємеханічних сполук з композитними елементами	25.05.2023	
4	Інженерна методика оцінки довговічності клеємеханічних сполуків	5.06.2023	
5	Оформлення пояснювальної записки	15.06.2023	

Студент



Федорчук А.О.

Керівник роботи



Диха О.В.

РЕФЕРАТ

Обсяг пояснювальної записки – 84 сторінок, кількість рисунків – 32, таблиць – 12, додатків – 1, кількість джерел згідно із переліком посилань – 74
Студент гр. МТВАс-20-2 Федорчук А.О.

Тема «Підвищення надійності кузовів транспортних засобів застосуванням клеємеханічних з'єднань»

Дана бакалаврська дипломна робота присвячена підвищенню довговічності каркасно-панельних кузовів транспортних засобів з макрогеометричними відхиленнями з використанням клейових сполук з керованою жорсткістю за рахунок армування гвинтами.

Для досягнення поставленої мети вирішені наступні





Завдання дослідження.

1. Проведений аналіз напружено-деформованого стану каркасно-панельної конструкції із змінними зазорами між панелями та каркасом.
2. Розвинутий інструментарій керування жорсткістю клейових з'єднань каркасно-панельного кузова.
3. Розроблена методика проектування довгомірних композитних каркасно-панельних кузовів заданої довговічності із застосуванням клеємеханічних з'єднань.
4. Розроблена інженерна методика оцінки міцності клейових з'єднань типу «композит-сталь» із застосуванням гвинті

Перелік ключових слів: кузов автомобіля, клеємеханічне з'єднання, самонарізні гвинти

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1.АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ КУЗОВІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ТА ПЕРСПЕКТИВНІ МАТЕРІАЛИ У ТРАНСПОРТНОМУ МАШИНОБУДУВАННІ.....	8
1.1.Концепція проектування високонавантажених кузовів наземних довгомірних транспортних засобів.....	8
1.1.1.Сучасні вимоги до конструкцій транспортних засобів та перспективні матеріали у транспортному машинобудуванні.....	8
1.1.2.Огляд концепцій виконання довгомірних кузовів пасажирських транспортних засобів.....	13
1.1.3.Методики проектування та розрахунку кузовів транспортних засобів.....	21
1.2.З'єднання волокнистих полімерних композитних матеріалів та металів.....	21
1.2.1.Особливості композитних матеріалів та їх вплив на міцність з'єднань.....	22
1.2.2.Клейові сполуки.....	22
1.2.3.Клеємеханічні сполуки.....	26
1.2.4.Особливості застосування різних армуючих елементів у клеємеханічних з'єднаннях каркасно-панельного кузова транспортного засобу.....	28
1.3.Методи оцінки багаточислової втоми на основі короткочасних випробувань.....	33

ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ				
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
		Федорчук		
		Диха		
		Бабак		
		Диха		
Підвищення надійності кузовів транспортних засобів застосуванням клеємеханічних з'єднань			Літ.	Аркуш
			4	84
			ХНУ, гр. МТВАс-20-2	

1.4.Вплив кліматичних факторів на працездатність клеємеханічних сполук.....	34
2. МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ КАРКАСНО-ПАНЕЛЬНОГО КУЗОВА З МАКРОГЕОМЕТРИЧНИМИ ВІДКЛОНЕННЯМИ.....	37
2.1.Спосіб керування жорсткістю клейових з'єднань каркасно-панельного кузова.....	37
2.2.Методика проектування каркасно-панельної конструкції.....	39
3. АНАЛІЗ МЕХАНІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ КЛЕЕМЕХАНІЧНИХ СПОЛУК З КОМПОЗИТНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ.....	44
3.1.Експериментальне дослідження механічних характеристик елементів нахлесткових сполук.....	44
3.1.1.Випробування зразків із ХАСП.....	44
3.1.2.Випробування зразків еластичної клейової композиції.....	48
3.1.3.Випробування самонарізних гвинтів.....	53
3.1.4.Випробування механічних з'єднань типу "композит-сталь".....	55
3.3.Розрахунково-експериментальний аналіз механічної поведінки клеємеханічних сполук з композитними елементами при квазістатичному навантаженні.....	57
4. ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ КЛЕЕМЕХАНІЧНИХ СПОЛУКІВ.....	61
4.1.Спосіб підвищення довговічності клеємеханічних з'єднань, армованих гвинтами.....	61
4.2.Експериментальне дослідження механічного поведінки клеємеханічних сполук при циклічному навантаженні.....	63
ВИСНОВКИ.....	69
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	70
Додатки.....	78

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВСТУП

Каркасно-панельні конструкції широко застосовуються виготовлення модулів операторів управління промисловими машинами (вантажні крани, екскаватори, прокатні стани), кузовів наземних транспортних машин, на водному транспорті та інших областях. Найбільш характерною сферою застосування каркасно-панельних конструкцій є наземні пасажирські перевезення у транспортних засобах, що мають високу пасажиромісткість, де сучасні тенденції підвищення економічної та екологічної ефективності використання транспортних машин вимагають розробки нових концепцій проектування полегшених довгомірних кузовів із розширеним застосуванням тришарових панелей. Особливий інтерес представляють тришарові конструкції у вигляді композитних сендвіч-панелей, які більш технологічні в дрібносерійних виробках з високими вимогами до естетичності та точності виготовлення, ніж традиційні металеві штампування. Додаткова технологічність досягається за рахунок більш простого та економічного оснащення для виготовлення композитних виробів (за літературними даними до 40-60%), суміщення їх функцій як силових, так і звуко-, теплоізолюючих та декоративних елементів.

В результаті складання/зварювання каркаса ці недосконалості призводять до наявності відхилень у зовнішній геометрії, які при вклеюванні сендвіч-панелей компенсуються, але призводять до клейових швів змінної товщини від 1 до 6 мм. Тут розглядаються лише низькомодульні клейові композиції, здатні заповнити такі проміжки без зниження механічних властивостей. Макрогеометричні відхилення геометрії каркасу раніше не враховувалися в методиках проектування, що призводило до необхідності застосування таких нетехнологічних методів, як виправлення каркасу або застосування технології монтажу обшивок з листа, що компенсує місцеві недосконалості.

Таким чином, необхідна корекція існуючих методик проектування

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						7
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

каркасно-панельних кузовів за рахунок обліку макрогеометричних відхилень каркасу та управління жорсткістю клейових сполук змінної товщини, що забезпечують вирівнювання навантажень на каркас та задану довговічність в експлуатації. Одним з найбільш перспективних видів армуючих елементів є сталеві гвинти, що самонарізають, що поєднують в собі технологічність і високий рівень несучої здатності.

Таким чином, актуальним є розвиток методу управління жорсткістю клейових з'єднань за допомогою трансверсальних елементів – самонарізаючих гвинтів, на основі якого в даній роботі запропонована нова методика підвищення довговічності високонавантажених елементів довгомірного кузова транспортного засобу зі сталевим каркасом, що мають макрогеометричні відхилення, і силовими, що вклеюються. панелі.

Мета дипломної роботи: підвищення довговічності каркасно-панельних кузовів транспортних засобів з макрогеометричними відхиленнями з використанням клейових сполук з керованою жорсткістю за рахунок армування гвинтами.

Для досягнення поставленої мети пропонується вирішити наступні **Завдання дослідження.**

1. Провести аналіз напружено-деформованого стану каркасно-панельної конструкції із змінними зазорами між панелями та каркасом.
2. Розвинути інструментарій керування жорсткістю клейових з'єднань каркасно-панельного кузова.
3. Розробити методику проектування довгомірних композитних каркасно-панельних кузовів заданої довговічності із застосуванням клеємеханічних з'єднань.
4. Розробити інженерну методику оцінки міцності клейових з'єднань типу «композит-сталь» із застосуванням гвинтів

1.АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ КУЗОВІВ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ТА ПЕРСПЕКТИВНІ МАТЕРІАЛИ У ТРАНСПОРТНОМУ

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						8
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

МАШИНОБУДУВАННІ

1.1 Концепція проектування високонавантажених кузовів наземних довгомірних транспортних засобів

1.1.1 Сучасні вимоги до конструкцій транспортних засобів та перспективні матеріали у транспортному машинобудуванні

До сучасних виробів транспортного машинобудування пред'являються підвищені вимоги щодо економічності, вагової ефективності, технологічності, надійності та зовнішнього вигляду.

Паливна, енергетична економічність транспортних засобів є одним із основних критеріїв ефективності їх експлуатації. При цьому маса транспортного засобу безпосередньо впливає на його економічність: для залізничних поїздів зниження маси на 1% дозволяє знизити енергоспоживання на 0,5% [1]; для автомобілів - на 0,7-0,8% [2-5]. Таким чином, на подолання втрат, пов'язаних із вагою зазначених транспортних засобів, витрачається до 50-75% їх палива (або електроенергії) [6].

Паливна економічність також необхідна зниження викидів в атмосферу низки шкідливих речовин, які у вихлопі силових установок внутрішнього згорання. Існують різні міжнародні програми щодо зниження викидів парникових газів в атмосферу, наприклад, Кіотський протокол [7],

та Європейська програма щодо зниження викидів вуглекислого газу в атмосферу [8].

Вагова ефективність сприяє зменшенню інерційних навантажень і сил опору в процесі експлуатації транспортних засобів, що призводить не тільки до поліпшення паливної економічності, але і до підвищення безпеки, поліпшення таких важливих функціональних характеристик, як тягово-швидкісні властивості та керованість [9, 10].

Ще однією важливою характеристикою транспортного засобу є вартість його життєвого циклу [9, 11]. В основному вона формується за

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

рахунок собівартості експлуатації та виготовлення. У зв'язку з цим, підвищення технологічності, що економічно оцінюється за допомогою технологічної собівартості виготовлення, є важливою вимогою сучасного транспортного машинобудування. До складу технологічної собівартості входять вартість матеріалів, праці, енергоресурсів, частка вартості інструменту та устаткування, необхідні процесу виготовлення та інших. [2, 12].

Економічна сторона процесу експлуатації – другий складник вартості життєвого циклу, пред'являє вимоги до високої надійності та ремонтпридатності виробів [9, 11], а також змушує шукати зовнішній вигляд, що характеризується високою аеродинамічною досконалістю та естетичністю [3-15].

Існують різні рішення, що дозволяють досягати зазначених вище вимог за рахунок заміни традиційних вуглецевих сталей у несучих елементах кузова на перспективні матеріали, що мають кращі технологічні та експлуатаційні властивості.

В таблиці 1 показано порівняння перспективних конструкційних матеріалів, що використовуються в автомобілебудуванні, включаючи композити та метали. Як видно з таблиці, найкраще відношення «зниження маси/відносна вартість» мають магній, алюміній, склопластик і нержавіюча сталь. Використання зазначених матеріалів, у середньому, дозволяє знизити масу виробів на 20-30% зі збільшенням собівартості виготовлення у 1,5-1,7 разів.

Таблиця 1 - Порівняння основних конструкційних матеріалів, що використовуються в автомобілебудуванні [6, 17]

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Матеріал	Замінний матеріал	Відносне зниження маси (%)	Відносна вартість* (часткою)
Вуглецева сталь	-	-	1
Високоміцна сталь ($\sigma_B > 550$ МПа)	М'яка сталь	10-25	1,15
Алюміній	Вуглецева сталь, чавун	40-60	1,3-2,0
Магній	Вуглецева сталь, чавун	60-75	1,5-2,5
Склопластик	Вуглецева сталь	25-35	1-1,5
Вуглепластик	Вуглецева сталь	50-60	2-10
Титан	Легована сталь	40-55	1,5-10
Нержавіюча сталь	Вуглецева сталь	20-45	1,2-1,7

* З припущення про великосерійне виробництво (60 000 шт./рік)

Порівняння механічних характеристик перспективних конструкційних матеріалів показано у таблиці 2.

Справжня дипломна робота присвячена проблемам застосування конструкційних композитних матеріалів – склопластиків, які мають низку важливих переваг у порівнянні з іншими зазначеними перспективними матеріалами:

- поряд з нержавіючої сталі їх застосування вимагає найменших витрат (таблиця 1);
- будучи полімерним композитним матеріалом, склопластик має додаткові переваги щодо нержавіючої сталі [4, 5]: на 40-60% менш дороге оснащення для виготовлення виробів, підвищені віброізоляційні характеристики, підвищене енергопоглинання при навантаженні до руйнування, що важливо для безпеки пасажирів при виникненні аварій ситуацій.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						11
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Таблиця 2 – Механічні характеристики конструкційних матеріалів, що використовуються під час виготовлення наземних транспортних засобів [5, 17-19]

Матеріал	Густина, кг/м ³	Модуль пружності, ДПа	Межа міцності, МПа
Сталь 20 (прокат)	7800	210	410
АМг 5 (алюмінієві) пресовані профілі)	2650	71	255
AZ61 (магнієві) пресовані профілі)	1800	44	350
Тканинний склопластик (псевдоізотропне укладання)	1500	18	310
Тканинний вуглепластик	1100	37	504
Хаотично армована склоплатка	1550	11	210

Найбільшого поширення серед силових конструкцій з композитних матеріалів, що застосовуються в галузі транспортного машинобудування, набули конструкції, які використовують сендвіч-панелі [5, 21-24].

Сендвіч-панель традиційно складається із двох композитних обшивок.

завтовшки

t_{fi} , між якими розміщується низькомодульний заповнювач

завтовшки

$t_c \gg \tau_{fi}$

(рисунок 1). При згині панелей основним виглядом

деформування заповнювача, що забезпечує спільну роботу несучих шарів, є зсув. Композитні обшивки при цьому піддаються розтягуванню/стиску. При навантаженні зосередженими силами в напрямку перпендикулярному серединній поверхні панелі заповнювач стискається або розтягується в цьому напрямку, а обшивки локально згинаються.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Широке поширення сендвіч-панелей обумовлено їхньою високою несучою здатністю, довговічністю та жорсткістю в порівнянні з традиційним каркасним або оболонковим виконанням. Крім того, вони поєднують у собі не тільки несучі, а й функціональні властивості: хорошу звуко- та теплоізолюючу здатність, високий коефіцієнт внутрішнього поглинання енергії, невисоку трудомісткість виготовлення та збирання внаслідок меншого числа деталей проти звичайними конструкціями [24-25]. Невисока трудомісткість складання є однією з визначальних переваг при дрібносерійному виробництві.

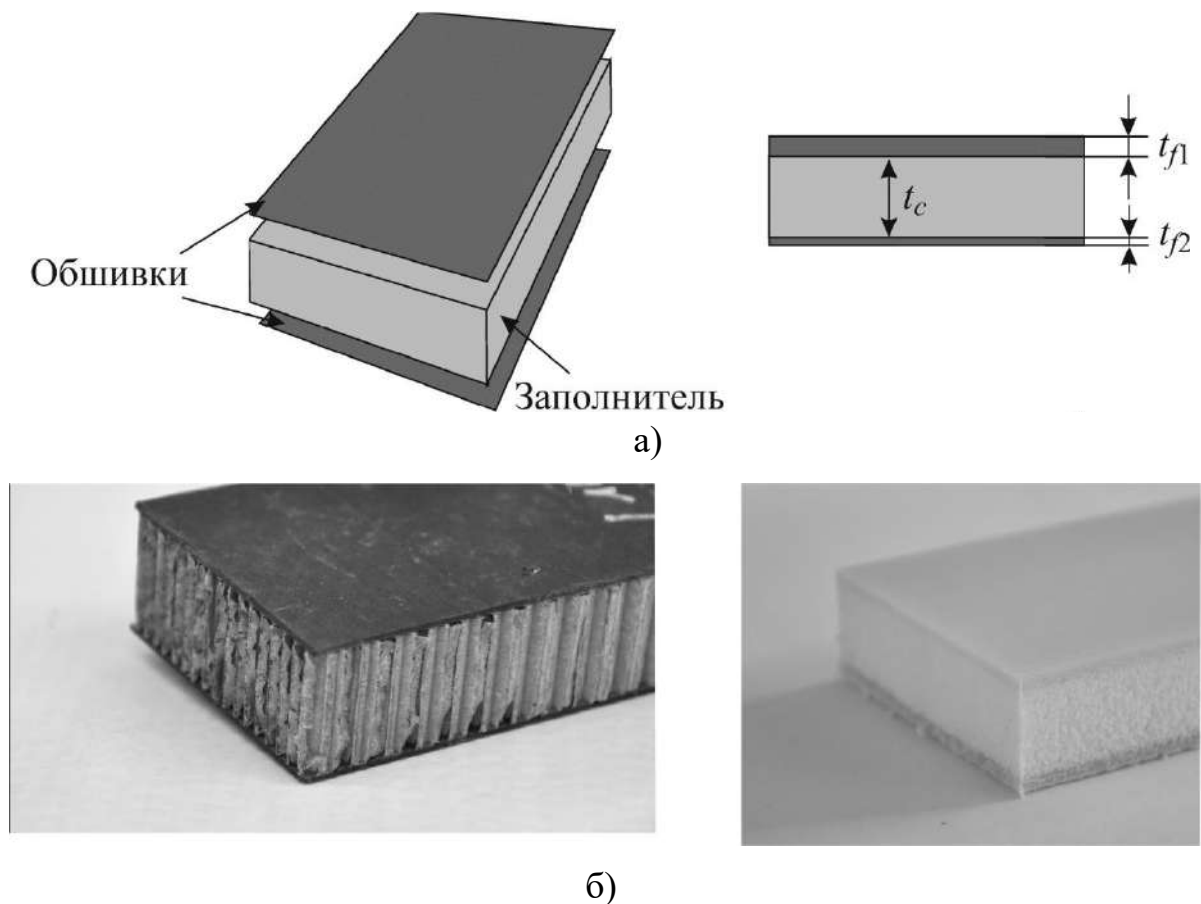


Рисунок 1 – Будова (а) та приклади (б) сендвіч-панелей []

1.1.2 Огляд концепцій виконання довгомірних кузовів

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

пасажирських транспортних засобів

Кузови транспортних засобів прийнято розділяти на кілька груп за різними ознаками. У цій роботі кузова зручно класифікувати за типом конструкції та навантаженістю.2)

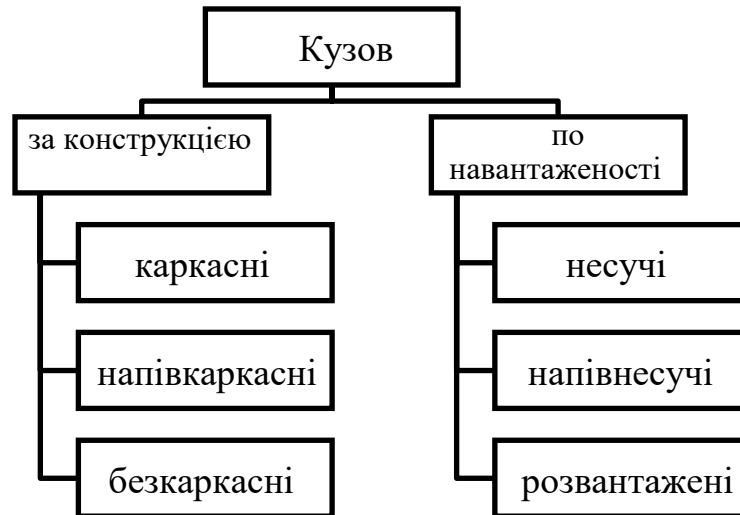


Рисунок 2 – Класифікація кузовів наземних транспортних засобів [9]

Каркасні кузови. Каркасні кузови є історично першими кузовами транспортних засобів. У більшості випадків вони являють собою зварні конструкції із сталевих та алюмінієвих профілів різного поперечного перерізу [9-10, 26-30]. Як було зазначено вище, каркасні кузови можуть бути розділені на розвантажені, напівнесучі та несучі. Розвантажений каркасний кузов немає жорсткого з'єднання з рамою. Він встановлюється на рамі на пружних подушках і крім ваги пасажирів і вантажу, що перевозиться, ніяких інших навантажень не сприймає. Розвантажені кузови (кузов на шасі) характерні для пасажирських автобусів.3) [30-33].

При розвантаженому кузові автобус може бути скомпонований із шасі (включаючи раму, силову установку, основні пристрої автобуса) та кузови різних марок. Тим самим реалізується більш гнучкий підхід до вимог ринку, ніж у напівнесучих або несучих кузовів, хоча останні й дозволяють забезпечити кращу питому здатність конструкції.

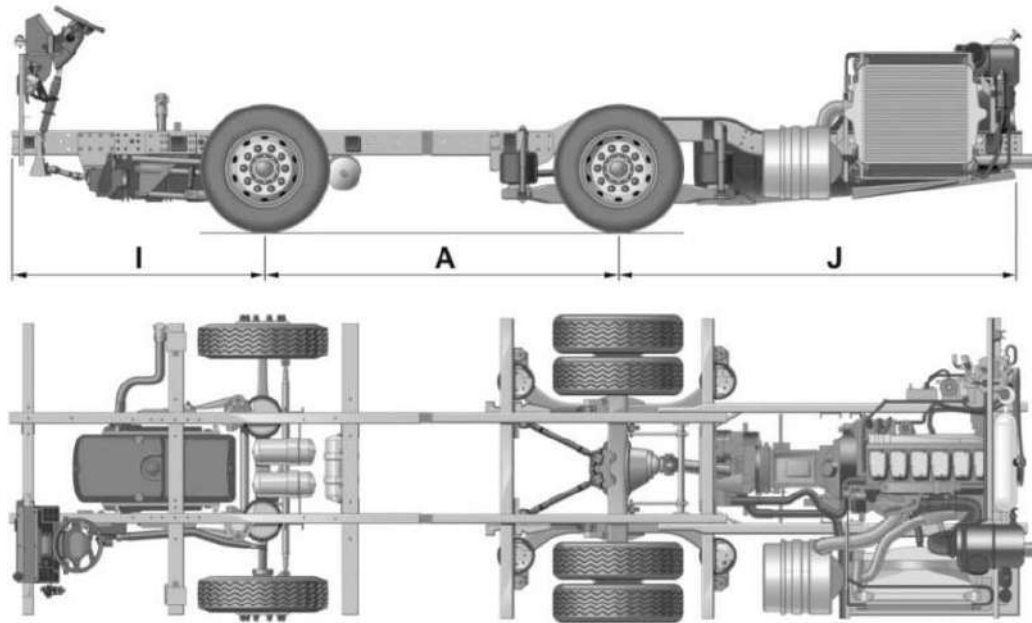
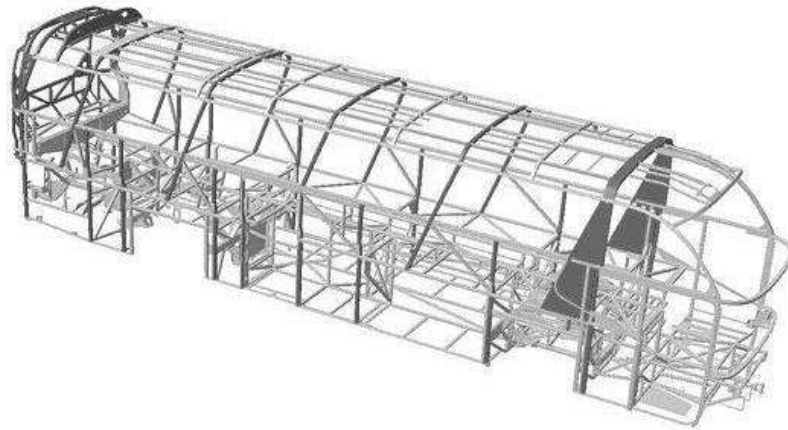


Рисунок 3 – Шасі автобуса Scania [31]

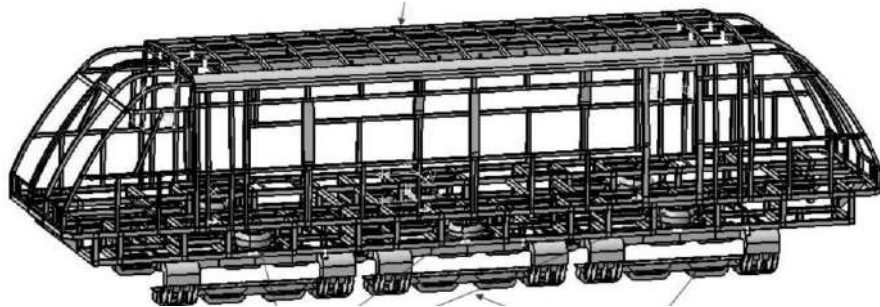
Напівнесучі та несучі кузови на даний момент є найбільш поширеними типами кузовів наземних транспортних засобів, починаючи з автобусів [9, 30, 34-39] (рисунок4а), вагонів трамваю [40-43], та закінчуючи іншими видами рейкових транспортних засобів [43] (рисунок4б).

Каркас кузова підрозділяється на раму підлоги, боковини та дах. Зазначені складові частини каркаса зварюються на окремих стапелях і потім збираються на загальному стапелі в єдину конструкцію, що несе.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15



а)



б)

Рисунок 4 – Несучі каркаси автобуса (а) та секції вагона на магнітній подушці (б) [43]

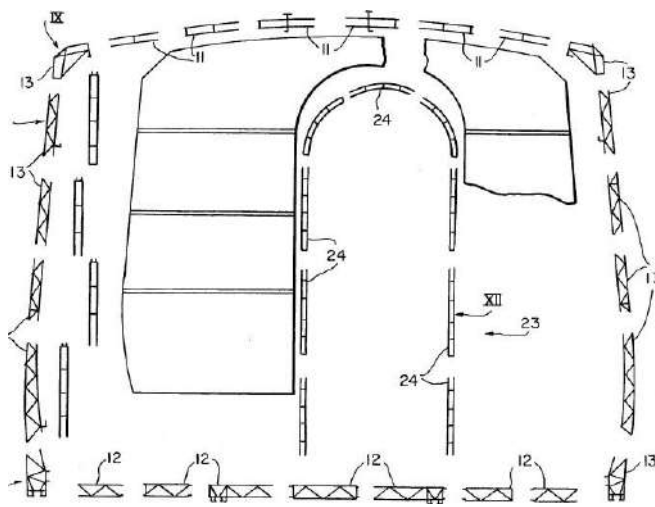
Каркасні кузови мають ненесучу обшивку у вигляді алюмінієвих, сталевих або композитних листів/панелей, з'єднаних з каркасом заклепками, зварюванням або за допомогою клейових з'єднань.

В даний час поширені так звані гібридні каркаси кузовів, що поєднують у собі несучі труби, профілі з традиційних конструкційних вуглецевих сталей та перспективних матеріалів, наприклад, алюмінію [42, 43] та нержавіючої сталі [40, 41].

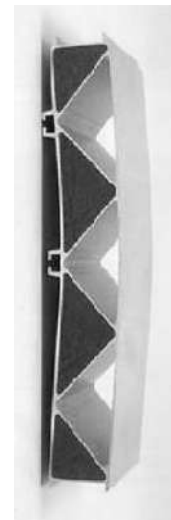
Безкаркасні кузови. Безкаркасні кузови являють собою самонесучі оболонки (монококи), які найчастіше виготовляються у вигляді сендвіч-панелей (див. п. 1.1.1) з обшивками з перспективних матеріалів: алюміній, магній, композити, нержавіюча сталь.

Сендвіч-панелі алюмінієвих та магнієвих кузовів формуються за

допомогою поздовжнього зварювання екструдованих (пресованих) профілів [20, 44-46], як показано на рисунку 5.



а)



б)

Рисунок 5 – Безкаркасний кузов (а) [44], що виготовляється з пресованих алюмінієвих профілів (б)

Для зниження залишкових температурних деформацій зібраного кузова використовують зварювання тертя з перемішуванням [47]. Рами підлоги таких кузовів мають традиційне каркасне або каркасно-панельне виконання.

обумовлено наявністю значних локальних навантажень у зонах взаємодії з візками, і навіть тим, що рама підлоги сприймає основну частину поздовжніх навантажень від взаємодії між вагонами. Зазначені кузова поширені серед високошвидкісних поїздів і мають значну питому несучу здатність.

Безкаркасні конструкції з композитних сендвіч-панелей знайшли своє застосування в несучих кузовах та шасі автобусів [23, 48-50] (рисунок б), вагонах метро [52] та інших легкорейкових транспортних засобів [53].

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17



Рисунок 6 – Безкаркасный кузов автобуса [23]

Як композитний матеріал сендвіч-панелей використовується склопластик [23, 52] (у близьких до промислового виробництва конструкціях), а також вуглепластик [50, 53] (у деяких концептуальних розробках). Як заповнювач сендвіч-панелей боковин і даху використовуються пінопласти, бальзове дерево; у навантажених конструкціях підлоги - алюмінієвий стільниковий заповнювач [23].

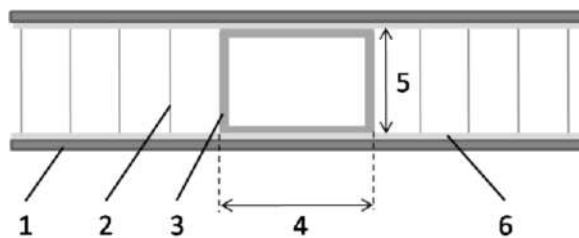
Безкаркасні кузова перевершують напівкаркасні та каркасні у питомій несучій здатності, проте вимагають суттєвої модернізації та подорожчання виробництва. Крім того, виникають проблеми з ремонтпридатністю таких кузовів, оскільки відновлення цілісності несучої оболонки на кузові без погіршення її несучої здатності та зовнішнього вигляду потребує значних трудовитрат.

Напівкаркасні кузова. Напівкаркасні кузова мають лише деякі частини каркасу (окремі стійки, дуги, підсилювачі тощо), з'єднані між собою несучою обшивкою [9, 27-28]. Основною перевагою напівкаркасних кузовів над каркасними є можливість поєднати функціональні та несучі властивості

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

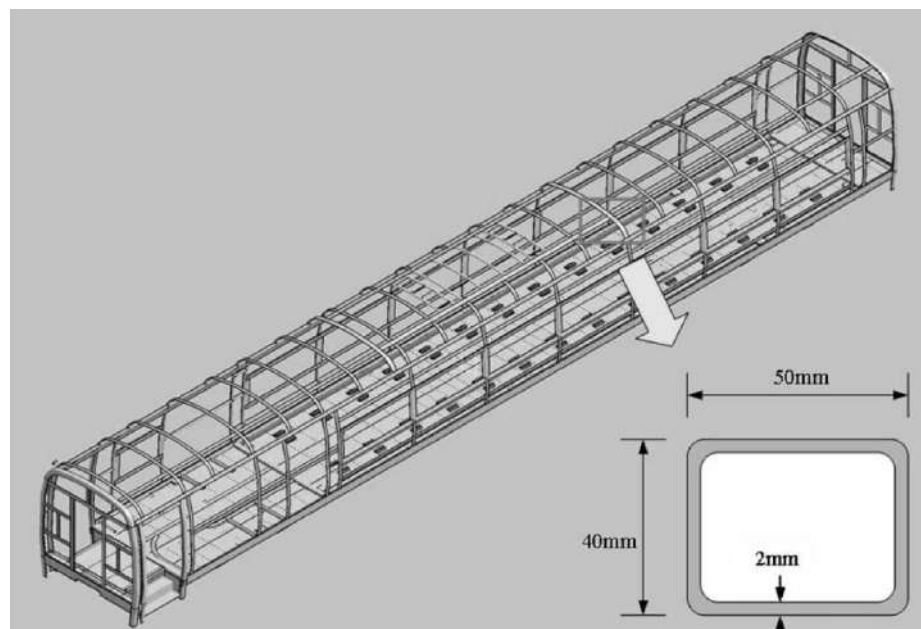
в обшивці, що дозволяє додатково збільшити питому здатність конструкції.

Конструкції гібридних кузовів із сендвіч-панелей з композитними обшивками мають схожу будову: на металеву раму підлоги встановлюються боковини та дах, що складаються із сендвіч-панелей, підкріплених у зонах дверних отворів та вікон металевими стрінгери та шпангоутами. У більшості випадків труби підкріплюючого каркаса розташовуються між обшивками сендвіч-панелей перед їх затвердінням у процесі виготовлення кузова (рисунок 7).



1 – композитна обшивка; 2 - заповнювач (стільниковий, або піноподібний); 3 - Підкріплюючий каркас; 4,5 – габаритні розміри труби каркасу; 6 – клейова композиція

а)



б)

Рисунок 7 – Боковина в розрізі (а) та підкріплюючий каркас (б) каркасно-панельного кузова

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

Зазначені каркасно-панельні конструкції з композитними обшивками, що несуть, характерні для вагонів високошвидкісних поїздів [61-62], метро [63], трамвая та інших видів легкорейкового транспорту [64-65]. Слід зазначити їх низьку ремонтпридатність, зумовлену тими самими причинами, що й у безкаркасних кузовів: відновлення цілісності оболонки, що несе, безпосередньо на конструкції без погіршення її несучої здатності і зовнішнього вигляду вимагає значних трудовитрат.

Також існує варіант вклеювання панелей обшивки в каркас за аналогією з елементами автомобільного скління [66] (рисунок 8).

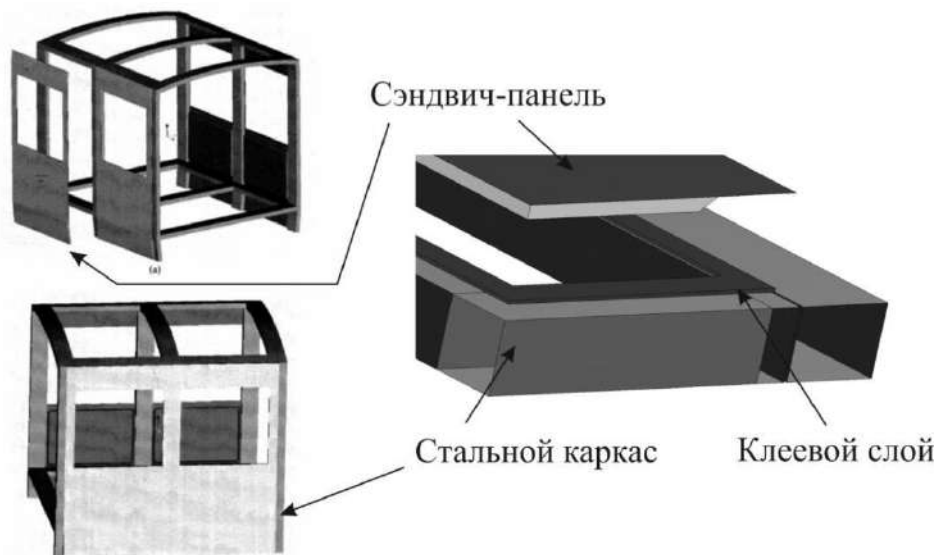


Рисунок 8 – Вклеювання сендвіч-панелей у сталевий каркас за аналогією з автомобільним склінням

Даний варіант цікавий для подальших досліджень, оскільки, маючи переваги попередньої концепції каркасно-панельного кузова, він не вимагає значного переоснащення виробничої бази, орієнтованої на дрібносерійне виготовлення сталевих каркасних довгомірних кузовів. Крім того, він дозволяє забезпечити модульність конструкції за рахунок використання типових складальних одиниць - модулів обшивки, що поєднує в собі не тільки силові, а й функціональні властивості (звуко-, теплоізоляція). Це

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

суттєво підвищує технологічність та

ремонтпридатність виробу: панель, що відмовила, досить легко замінити новою без зниження несучої здатності та погіршення якості екстер'єру кузова. З'єднання між панелями та каркасом, одержувані в результаті зазначеного процесу вклеювання, можуть бути класифіковані як нахлесточные

Слід зазначити, що у разі використання в каркасі економічних гарячекатаних труб, наприклад, за ГОСТ 8645-68 [67], а також виникнення теплових деформацій при зварюванні [68-70], кузов набуває відхилень від ідеальної проектної геометрії, які згідно з аналізом конструкторської документації на реальний каркас трамвайного вагона можуть сягати 1-6 мм [71]. Ця особливість раніше не враховувалася в методиках проектування, що вимагало або виготовлення відносно точного, але дорогого каркасу (наприклад, з композитних профілів [72]), або проведення трудомістких операцій редагування каркасу або застосування технології монтажу обшивок з цільнотягнутого листа, що компенсують місцеві недосконалості [73 74]. Пластичні деформації та мікротріщини після виправлення неконтрольовано знижують довговічність конструкції транспортного засобу.

Зазначена проблема вимагає розробки нових концепцій каркасно-панельних кузовів, в яких змінні зазори між панелями і сталевим каркасом могли б бути компенсовані за допомогою з'єднань натисків (типу «композит-сталь») з клейовим шаром змінної товщини. При цьому змінна товщина клею, у свою чергу, породжує проблему нерівномірності розподілу навантажень у каркасі, викликаючи зниження його довговічності, що вимагає розробки нових методів управління жорсткістю та міцністю клейових сполук. У зв'язку з цим у підрозділі 1.2 проведено аналіз відповідної наукової літератури.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						21
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.1.3 Методики проектування та розрахунку кузовів транспортних засобів.

Довгомірний кузов наземного транспортного засобу є статично невизначеною механічною системою, що складається переважно з оболонок та профілів. У зв'язку зі зростанням обчислювальних можливостей електронних пристроїв, на заміну класичним аналітичним методам розрахунку зусиль і напруг у стрижневих та оболонкових конструкціях [9, 24-25, 75] прийшли чисельні, зокрема метод кінцевих елементів (МКЕ) [21, 31-33, 35-39, 43, 48, 51-53, 59, 63]. Для моделювання профілів використовуються як балочні, так і кінцеві оболонкові елементи [31-33, 35-37, 39, 43]; для моделювання несучої обшивки та тришарових конструкцій – оболонкові [48, 51-52, 63-64]. У всіх розглянутих роботах використовувалася ідеальна геометрія проектування без урахування можливих технологічних відхилень і дефектів.

1.2 З'єднання волокнистих полімерних композитних матеріалів та металів

Існує кілька основних типів конструкційних сполук полімерних композитних матеріалів та металів: механічні, клейові, клеємеханічні. Їх загальною особливістю є те, що до складу з'єднання входять різнорідні матеріали, що мають механічні характеристики, що істотно відрізняються [82]. Полімерні композитні матеріали мають анізотропну природу, обумовлену наявністю високоміцних волокон, певним чином орієнтованих в ізотропному значно менш міцному сполучному. Взаємодія зазначених компонентів у композитному матеріалі призводить до таких нетипових для металів механізмів руйнування, як розшарування, а також інші пошкодження сполучного при збереженні цілісності волокон [8], які необхідно враховувати під час проектування та розрахунку сполук.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						22
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.2.1 Особливості композитних матеріалів та їх вплив на міцність з'єднань.

Для з'єднань з механічними елементами характерні відмови, викликані переважно руйнуванням композитного матеріалу. Прийнято виділяти чотири основні механізми руйнування композитного матеріалу при взаємодії з механічними елементами [76-80]: розрив за ослабленим перерізом; зріз отвору; сегментація отвору; знімання отвору.

Для клейових сполук крім руйнування клейового шва характерна відмова шляхом розшарування полімерного волокнистого композиту за рахунок дії високих відривних напруг на краях нахлеста [77, 81].

В обох випадках оцінка міцності та розрахунок напружено-деформованого стану композиту зазвичай виробляються за допомогою інструментарію механіки анізотропних матеріалів, а також відповідних критеріїв [8, 82], що враховують різні компоненти напруги полів, деформацій у матеріалі, а також різні механізми руйнування. Поширені критерії Хашина [83], LaRC04 [84], Ямади-Сана [84-86], Цая-Ву [87] та ін. середніх напруг [88, 89], накопичення пошкоджень [76], граничної рівноваги [90], механіки руйнування [91-93] та ін.

1.2.2 Клейові сполуки.

В даний час клейові з'єднання починають переважати за обсягом застосування композитних конструкціях над більш традиційними механічними сполуками. Насамперед, це зумовлено їх перевагами, серед яких відсутність концентраторів напруг у вигляді отворів під механічні елементи, більш рівномірна передача навантаження, а також можливість з'єднувати вироби практично будь-якої форми [81, 94, 95].

Будь-яке клейове з'єднання можна розділити на кілька основних компонентів (рисунок9): склеювані елементи, клейовий шов і гранична поверхня клейового шва, що безпосередньо контактує зі склеюваними

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

елементами.

Найбільш важливими факторами, які мають бути враховані при проектуванні клейових сполук, є [81, 94, 95]:

- укладання механічні Характеристики шарів композитного матеріалу, механічні характеристики клейового шва;
- ступінь підготовленості поверхонь до склеювання;
- геометричні параметри: тип з'єднань, форма клейового шва.

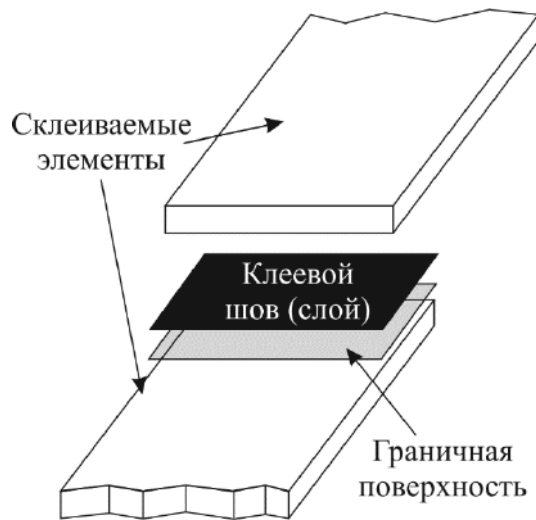


Рисунок 9 – Елементи клейової сполуки

Облік укладання та механічних характеристик шарів композитного матеріалу показано у пункті «Особливості композитних матеріалів та їх вплив на міцність з'єднань».

Клейові композиції мають значний розкид механічних характеристик за міцністю ($B \approx 1 \dots 100$ МПа) та жорсткості ($\square \approx 1 \dots 5000$ МПа) [87, 101, 102]. Їх прийнято ділити на дві групи: жорсткі та еластичні. Перші відрізняються переважно лінійною діаграмою деформування, другі мають суттєво нелінійну механічну поведінку. До м'яких клейових композицій відносять поліуретанові та силіконові. До жорстких – епоксидні, акрилові, поліімідні та ін. Яскраво виражені представники групи жорстких клеїв

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

мають граничну деформацію при руйнуванні до 5%, еластичних – понад 100%.

Загальна тенденція така, що зі збільшенням значень межі міцності та модуля пружності клейова композиція дедалі більше виявляє властивості жорсткої. У зв'язку з цим найбільш поширені сполуки на основі жорстких клейових

композицій – вони дозволяють забезпечити необхідну здатність високонавантажених композитних конструкцій, що використовуються в авіакосмічній галузі, наземному і водному транспортному машинобудуванні [81, 96].

Руйнування жорстких клейових композицій у більшості випадків відбувається шляхом утворення тріщини в результаті злиття мікропор та її подальшого поширення від крайових зон нахлесткового з'єднання. Якщо руйнування з'єднання відбувається на граничній поверхні (див. рисунок9), його називають адгезійним, якщо по клейовому шву - когезійним.

Облік руйнування клейового шва шляхом утворення та розростання тріщин здійснюється за рахунок використання математичного апарату механіки руйнування [97,98] та пов'язаних з нею моделей когезійних зон (нелінійний закон опору відносному ковзанню або поділу двох поверхонь залежно від величин компонентів напруженого стану) [99- 102]. Також використовуються простіші критерії виникнення тріщини, засновані на еквівалентних напругах або потенційної енергії пружного деформування. При цьому, як граничний стан може бути прийнято досягнення критичних значень еквівалентних напруг або енергії деформування в будь-якій точці (сингулярні критерії) [81, 103] або області з характерним розміром, попередньо підібраним при калібрувальних випробуваннях (середні критерії) [05].

У зв'язку з зазначеними особливостями для жорстких клеїв відзначається висока чутливість до дефектів та відповідні проблеми у

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

з'єднаннях із порівняно товстими клейовими швами (більше 0,3-0,5 мм). Еластичні клеї, хоч і можуть заповнювати значні зазори, відповідно до свого визначенню немає можливості передавати суттєві навантаження через сполуки [81, 96].

Для підвищення тріщиностійкості жорсткого клейового шва використовуються різні модифікуючі добавки, наприклад, вуглецеві наноструктури [07, 108], частинки різних гум (на основі силікону, акрилу) [09, 110], конструкційні бар'єри для поширення тріщин у вигляді відносно коротких ділянок , поліуретанового) клейового шва [11], рифлення матеріалів, що склеюються в області нахлеста [12].

Технологічні процеси підготовки поверхонь до склеювання грають визначальну роль у формуванні несучої здатності та довговічності клейової сполуки [81, 113, 114]. Коректна підготовка дозволяє уникнути адгезійного механізму руйнування сполуки. Для поліпшення адгезії клейового шва застосовується рифлення поверхонь металевих елементів, що склеюються, в зонах нахльосту.

Для найбільш технологічних одно- і двонахлесткових сполук характерна наявність концентраторів напруг на кінцях нахлеста, що сприяє виникненню високих відривних напруг, які можуть призводити до адгезійного руйнування з'єднання або розшаровування композиту у відповідній галузі. Зазначений ефект найяскравіше проявляє себе у сполуках типу «композит-метал» [77].

З метою зниження зазначеного ефекту концентрації напруги були розроблені інші типи геометрії, найбільш поширеними з яких є нахлести з косим або ступінчастим стиком. Крім того, дослідниками розроблені прийоми, що знижують відривну напругу в одно-і двонахлесткових з'єднаннях. Вони характеризуються локальною зміною форми клейового шва на торцях нахлеста (створення фасок), що сприяє плавній зміні жорсткості компонентів з'єднання та сприятливому перерозподілу напруг [81, 115-117].

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						26
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Ту ж мету переслідує комбінування жорсткої клейової композиції в центрі та еластичної – по краях [18-119].

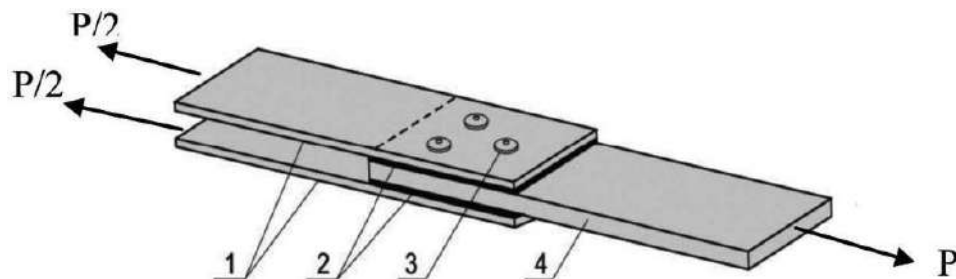
Зважаючи на складність анізотропної структури композитного матеріалу, безлічі можливих механізмів руйнування, накопичення пошкоджень та необхідності застосування апарату нелінійної механіки руйнування, найбільш поширені в даний час розрахунки сполук з використанням методу кінцевих елементів [94, 99-104].

При цьому в проектуванні активно використовуються аналітичні методи, що дозволяють з достатньою точністю визначати напружено деформований стан клейових сполук та проводити початкову оцінку їхньої міцності [77, 81].

1.2.3 Клеємеханічні сполуки.

Як було зазначено вище, в нахлесткових (як і в Т-подібних) клейових сполуках виникають значні відривні трансверсальні напруги, що створюють сприятливі умови для розвитку і поширення тріщин в клейових композиціях, розшаровування композитних елементів або руйнування по межі розділу між клейовим швом і композитом (адгезійне руйнування).

Для збільшення несучої здатності клейових з'єднань у трансверсальному напрямку раціонально їх армувати за допомогою механічних елементів (болтів, заклепок, штифтів тощо) – див.10.



1 – сталеві пластини; 2 – клейовий шар; 3 – армуючі елементи (заклепки);
4 – композитна пластина

Рисунок 10 – Приклад клеємеханічної сполуки

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата		27

Використання трансверсально армуючих елементів призводить до наступних позитивних ефектів:

- знижуються максимальні значення відривної напруги в клейовому шарі на торцях з'єднання [20-125];
- у разі застосування болтів і витяжних заклепок виникають залишкові трансверсальні стискаючі напруги, що додатково підвищують міцність при дії відривних напруг [22, 126, 127];
- у разі виникнення тріщин та руйнування клейового шару, армуючі механічні елементи не дозволяють реалізуватися найбільш небезпечному сценарію руйнування з'єднання шляхом розпаду на незалежні частини та продовжують сприймати як відривну, так і зсувну частини навантаження [28-131].

Завдяки зазначеним ефектам, статична міцність клеємеханічних сполук (як нахлесткових, так і Т-подібних) зростає на 10-40% [30-132] у разі застосування болтових та заклепувальних елементів, а у разі штифтових – до 70-80% [23, 133]. Багатоциклова міцність у своїй збільшується на 40-60% [23, 129, 134-136]. Крім того, дослідники відзначають значне зростання енергії, що поглинається при руйнуванні сполук (до 600%) [31, 133].

Клеємеханічні сполуки також мають кращу здатність, що несе, порівняно з механічними аналогами. Тут основними позитивними ефектами при використанні клейового шва є:

- розвантаження механічних елементів за рахунок клейового шва [33, 137, 138];
- зниження концентрації напруги в області отворів під механічні елементи [26].

При проектуванні клеємеханічних сполук важливо забезпечити рівномірний розподіл навантаження між механічними елементами та клейовим швом. Дослідження показують, що головними факторами, що визначають ефективність спільної роботи несучих елементів клеємеханічної

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

сполуки, є:

- зсувна жорсткість клейового шва, що визначається його товщиною або модулем пружності та модулем зміцнення (у разі білінійної апроксимації діаграми «деформації-напруги») [32, 137, 138];

- відсутність/наявність зазорів в отворах для армуючих елементів [39].

При розрахунках і моделюванні клеємеханічних з'єднань

використовуються як аналітичні [37, 140, 141], так і чисельні, переважно кінцево-елементні методи [42-146]. У переважній більшості випадків втрата несучої здатності клеємеханічного з'єднання обумовлена руйнуванням клейового шару і подальшим руйнуванням композитного матеріалу.

При моделюванні використовуються зазначені вище критерії руйнування композитних матеріалів та клейового шару, моделі накопичення пошкоджень та критерії граничного стану сполук. Механічні елементи моделюються за допомогою об'ємних кінцевих елементів із ізотропними пружнопластичними моделями матеріалу [29, 143, 146].

Для методик проектування конструкцій, що мають клеємеханічні з'єднання, характерний принцип багатомасштабного моделювання із застосуванням деталізованих розрахункових моделей представницької ділянки з'єднання, призначених для вивчення особливостей механічної поведінки, та спрощених оболонкових моделей – для розрахунку конструкції загалом [45, 147].

1.2.4 Особливості застосування різних армуючих елементів у клеємеханічних з'єднаннях каркасно-панельного кузова транспортного засобу.

Болтові елементи широко застосовуються у складі клеємеханічних з'єднань завдяки своїй простоті, відносній технологічності, а також безпечному механізму руйнування шляхом зминання отворів (при

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						29
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

грамотному проектуванні). Тим не менш, вони також мають ряд істотних недоліків:

- значний діаметр 4-12 мм [78, 79, 84, 86, 88, 93, 148-150], що створює суттєву концентрацію напруги та ослаблення поперечного перерізу композиту;
- деградація механічних властивостей композитного матеріалу при циклічній взаємодії з механічним елементом у зоні отворів, що потребує введення заставних елементів;
- необхідність доступу до внутрішньої сторони з'єднання для монтажу гайки.

Остання особливість призводить до неприйнятно низької технологічності використання болтових з'єднань у разі, якщо внутрішня сторона з'єднання знаходиться усередині труби каркасу кузова транспортного засобу.

Заклепувальні елементи мають переваги і недоліки, аналогічні для болтів. При цьому існує технологічніший варіант витяжних заклепок, що не вимагає доступу до внутрішньої сторони з'єднання. Зазначені заклепки мають власні недоліки, пов'язані зі зниженою несучою здатністю щодо болтів (для процесу витяжки заклепки повинні бути порожніми), а також виникнення значних трансверсальних залишкових зусиль, що призводять до стиснення еластичного клейового шва у разі з'єднань зі значною товщиною (до 6 мм). Зазначені недоліки роблять нераціональним їх застосування у сполуках типу «композит-сталь» з відносно товстими клейовими швами з еластичних клейових композицій.

Штифтові елементи здебільшого мають значно менший діаметр, ніж болтові: 0,2-0,5 мм [24, 125, 129, 133-136, 145] для металевих штифтів; 2-5 мм - для штифтів з односпрямованого композиту [23, 124], що значно знижує концентрацію напруги в композитних елементах.

Гладка поверхня штифтів призводить до відносно слабкої несучої

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						30
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

здатності трансверсальному напрямку (штифти витягуються з композитного матеріалу при дії трансверсальних навантажень). Для вирішення цієї проблеми розроблені нові конфігурації штифтів у вигляді скріпок [51], стріл [47], штифтів з рифленою поверхнею [34] та ін. Зазначені конфігурації мають необхідну для застосування у високонавантажених з'єднаннях несучою здатністю.

Основним недоліком штифтових елементів є їх низька технологічність, що вимагає спеціального дорогого обладнання (ультразвукові монтажні головки [24, 125, 129, 133-136, 145]) та затвердіння спільно з композитними виробами, що виготовляються. Особливості технології встановлення штифтів унеможливають їх ефективне застосування в з'єднаннях типу «композит-сталь».

Гвинтові елементи, у тому числі, самонарізні гвинти (шурупи), мають відносно високу технологічність і несучу здатність, що дозволило їм широко поширитися у виробках з дерева [52, 153]. Гвинти, що самонарізають, мають переваги зазначених вище груп механічних елементів:

- вони технологічні та не вимагають доступу до внутрішньої поверхні з'єднання;
- мають високу несучу здатність;
- можуть мати досить малий діаметр (до 25 мм);
- дозволяють гнучко регулювати трансверсальне зусилля шляхом затягування.

Однак дослідники не рекомендують самонарізаючі гвинти до застосування в циклічно високонавантажених сполук полімерних волокнистих композитів. Це зумовлено локальним руйнуванням пластиків у зоні отворів, яке відбувається за рахунок недостатньої пластичності полімерної матриці та виникнення дефектів (розшарування, мікротріщин), створюваних при свердлінні отвору та монтажі армуючого елемента. Зазначені ефекти, однак, можуть бути мінімізовані та враховані при

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						31
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

проектуванні клеємеханічних з'єднань, що зробить їх перспективними для застосування у складі з'єднань каркасно-панельного кузова транспортних засобів із змінною товщиною еластичного клейового шва.

Одним із способів підвищення довговічності клеємеханічних сполук є зниження контактної напруги за рахунок заповнення зазорів між гвинтом і стінкою отвору в композиті полімерною композицією холодного затвердіння (модифіковані з'єднання). Ефективність зазначеного способу підтверджено на прикладі болтових з'єднань у роботі [56], в якій відзначається зростання циклічної міцності модифікованих з'єднань до 4 разів. При цьому в роботі недостатньо докладно розкрито методику проведення та методи обробки результатів випробувань. У зв'язку з цим, у дослідженні необхідно провести об'єктивну перевірку ефективності способу у разі армування гвинтами, що самонарізають.

Існують різні види самонарізних гвинтів (шурупів) з потайною головкою, що відрізняються висотою та кроком різьблення (рисунок 11).

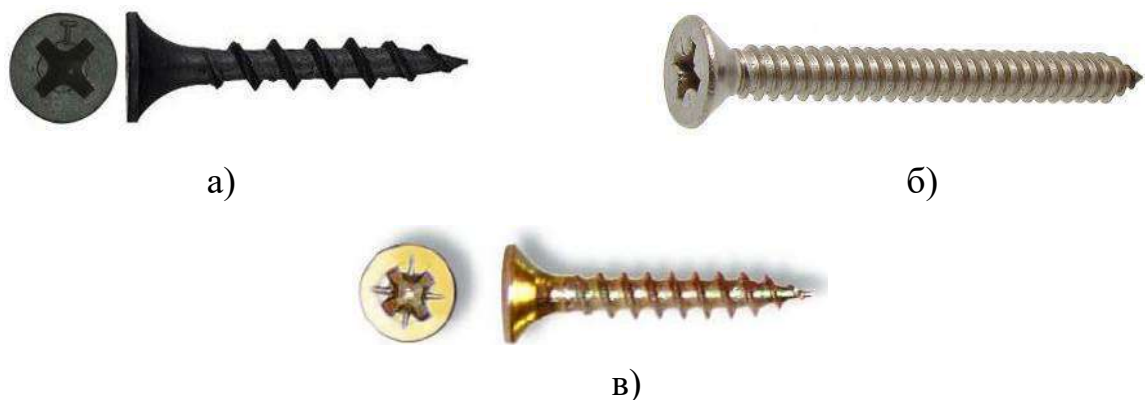


Рисунок 11 – Типи гвинтів, що самонарізають: гвинти по дереву DIN 18182 с оксидованим покриттям (а); гвинти по металу ISO 7050, DIN 7962 з цинковим покриттям (б); гвинти універсальні DIN 7962 з цинковим покриттям (в)

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						32
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільш поширеними видами є:

- самонарізні гвинти по дереву [57], що мають різьблення з мінімальним зовнішнім діаметром $d = 3,5$ мм і кроком $p = 2,8$ мм;
- самонарізні гвинти по металу [58-160], що мають різьблення за стандартом [61] з мінімальним зовнішнім діаметром $d = 1,5$ мм і кроком $p = 0,5$ мм;
- самонарізаючі гвинти універсальні [62] з мінімальним зовнішнім діаметром $d = 1,5$ мм та кроком $p = 1,35$ мм.

Всі перелічені типи гвинтів можуть мати захисні покриття (оксидовані, оцинковані) або виготовлені з антикорозійних сталей.

У складі каркасно-панельної конструкції самонарізаючі гвинти застосовуватимуться одночасно для сталі, що має високу твердість, і волокнистого композиту з відносно м'якою полімерною матрицею. У зв'язку з цим, різьблення, з одного боку, має володіти досить малим кутом підйому, висотою і дрібним кроком, щоб забезпечити можливість вкручування в сталь без руйнування гвинта, з іншого боку – висота різьблення та її крок мають бути досить великими, щоб забезпечити необхідну несучу здатність при взаємодії з полімерною матрицею. Зазначеним вимогам задовольняють універсальні гвинти, що самонарізають [62]. Для забезпечення довговічності з'єднань з гвинтами під час експлуатації на відкритому повітрі пропонується використовувати гвинти з антикорозійним покриттям (наприклад, цинковим).

Існують різні стандарти щодо визначення механічних властивостей матеріалів гвинтів [63, 164], які включають типовий набір випробувань на твердість, аналіз мікроструктури матеріалу, а також випробувань на міцність при скручуванні. У зв'язку з тим, що в каркасно-панельному кузові гвинти, що самонарізають, будуть працювати при зсувних навантаженнях, в рамках дослідження необхідно розробити методики випробувань і провести відповідні випробування, що дозволяють отримати оцінки статичної та

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						33
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

циклічної міцності гвинтів, а також з'єднань з їх використанням.

1.3 Методи оцінки багатоциклової втоми на основі короткочасних випробувань

Методи, що ґрунтуються на кореляції механічних характеристик матеріалів при квазістатичному/малоцикловому та багатоцикловому навантаженні активно застосовуються для аналізу та оцінки втомної міцності металевих елементів несучих конструкцій.

Зокрема, розвинений інструментарій щодо підбору параметрів деформаційних критеріїв руйнування за результатами квазістатичних або малоциклових випробувань. Для рівняння Басквіна-Менсона-Коффіна [65-166] інструментарій включає різні класичні і сучасні методи: метод універсальних нахилів і чотириточкової апроксимації [65], метод Мітчелла [68], метод твердості [69], усереднений метод [69] метод нейронних мереж [71] та ін.

Використання поняття мікропластичних деформацій, енергії пластичного деформування з метою оцінки втомної міцності також використовують у роботах [72, 173]. У цих роботах вказується на єдність процесів, що призводять до обмеженої витривалості та малоциклової втоми металів.

Основним недоліком зазначених методів є необхідність вимірювання при квазістатичних випробуваннях таких механічних характеристик, як відносне звуження при руйнуванні $\square\square$ справжня деформація при руйнуванні $\square f$, опір розриву $\square f$ та ін.

Автором показано (гл. 4), що основним механізмом настання граничного стану при циклічному навантаженні клеємеханічних сполук, запропонованих до застосування в даній роботі, є руйнування сталевого гвинта, що самонарізає. Складна геометрія самонарізних гвинтів [62], а також значний вплив технології їх виготовлення на міцність роблять труднореалізованим отримання прийнятних для інженерних розрахунків

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						34
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

оцінок σ_f , σ_{f_0} та ін. Потрібно менш трудомісткий підхід, що дозволяє оцінити в рамках інженерної

основу короточасних випробувань. Такий підхід має бути заснований на ідеї пов'язаності малоциклової та багатоциклової втоми металевих матеріалів, доведеної у зазначених вище дослідженнях.

1.4 Вплив кліматичних факторів на працездатність клеємеханічних сполук

Ще одним аспектом, пов'язаним із забезпеченням довговічності каркасно-панельних кузовів наземних транспортних засобів, є облік реальних кліматичних умов експлуатації та їх вплив на характеристики міцності конструктивних елементів, зокрема, клеємеханічних з'єднань.

Наземні транспортні засоби, загалом, працюють у нестационарних кліматичних умовах, що характеризуються перепадами температури, освітленості та вологості. Діапазон температур експлуатації транспортного засобу для кліматичного виконання «У» (експлуатація в умовах помірного клімату [74]) становить від мінус 45 до плюс 45°C, діапазон рівня відносної вологості: 75-100%.

Прийнято поєднувати вплив температури та вологості на міцність виробів із композитного матеріалу з полімерною матрицею під одним поняттям

- Гіротермальний ефект. Гіротермальний ефект, в основному, полягає у зменшенні температури склування полімерної матриці у вологому стані порівняно з вихідним (рисунок 12). При цьому температура склування відповідає за перехід полімерної матриці з твердого стану у в'язкий, при якому несуча здатність композиту стає неприйнятно низькою.

У роботі [76] представлений огляд досліджень, присвячених впливу гіротермальних ефектів на міцність механічних болтових та штифтових з'єднань. Для вивчення властивостей виробів із композитів з максимально

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						35
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

деградуєчими характеристиками міцності під впливом вологості їх, як правило, поміщають у водні ванни або кліматичні камери з підвищеною вологістю на термін, при якому гарантовано досягається граничний вміст води у матеріалі (граничне насичення). Критерії граничного насичення, а також способи вимірювання вмісту води регламентовані, наприклад, стандартом [75].

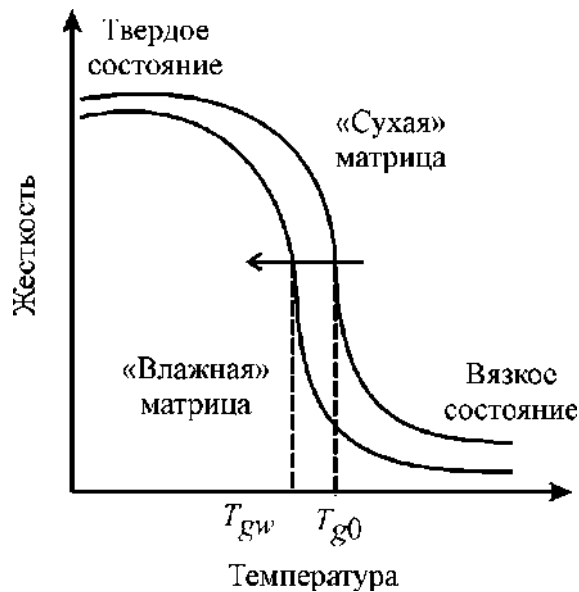


Рисунок 12 – Зниження температури скловання полімерної матриці при насиченні вологою

Результати огляду показують різну чутливість полімерних смол (поліімідних, епоксидних, поліефірних) до гіротермального навантаження.

Поліімідні смоли відрізняються підвищеною стійкістю до впливу температур, у дослідженні [76] показано, що зниження статичної міцності на 35% відбувається для відповідних болтових з'єднань в результаті термічного старіння повітря при температурі плюс 177°C протягом 415 днів.

Граничне насичення вологою композитного матеріалу на основі поліестерної матриці (втримка у воді при температурі плюс 38°C протягом 62 днів) призводить до аналогічного зниження 35% максимального навантаження при квазістатичних випробуваннях [77].

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						36
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Аналіз механічних характеристик зразків болтових з'єднань вуглецевих композитів з епоксидною матрицею показує, що граничне насичення матеріалу вологою та його термічне старіння (плюс 80°C протягом 90 днів) сприяє зниженню статичної міцності на 70% [78]. Дослідження аналогічних зразків штифтових з'єднань показало, що циклічна витримка (120 циклів, один цикл включає 12 годин витримки на повітрі при температурі плюс 50°C і 12 годин витримки при температурі плюс 50°C при відносній вологості 98%) не істотно впливає на них багатоцикловою міцність. В цілому, насичення композитного матеріалу вологою, а також вплив підвищених температур, негативно впливають на міцність механічних сполук. Вплив негативних температур має менш виражений характер і, у більшості випадків, призводить до підвищення властивостей міцності композитів і сполук на їх основі. Негативні ефекти від гіротермального впливу також властиві клейовим сполукам, проте, в [82] наголошується, що вони можуть і не виявлятися, тому що, більшою мірою залежать від типу клейової композиції і технології підготовки поверхонь, що склеюються. Продемонстровано позитивний ефект 14% збільшення статичної міцності (витримка при температурі плюс 70°C у водяній ванні протягом 42 днів, випробування при температурі плюс 71°C). Для клеєштифтових сполук на основі епоксидних вуглепластиків та епоксидної клейової композиції показано зниження статичної міцності на 10%, а багатоциклової – на ~15% (умови підготовки зразків та випробувань ідентичні умовам для клейових сполук, описаних вище). У той же час зниження багатоциклової міцності за тих же умов для аналогічних клейових сполук склало ~30%. Таким чином, клеємеханічні сполуки демонструють орієнтовно вдвічі кращу опірність гіротермальної дії, ніж клейові. Проведений огляд показав, що в умовах, близьких до нормальних, коли немає тривалого занурення композитів, армованих волокнами, у гарячу воду, зниження міцності не є суттєвим і лежить у межах міжпартійних розкидів.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						37
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2. МЕТОДИКА ПРОЕКТУВАННЯ КАРКАСНО-ПАНЕЛЬНОГО КУЗОВА З МАКРОГЕОМЕТРИЧНИМИ ВІДКЛОНЕННЯМИ

2.1 Спосіб керування жорсткістю клейових з'єднань каркасно-панельного кузова.

Високі вимоги до довговічності конструкції кузова при мінімальній вазі вимагають вирівнювання зазначених у підрозділі 2.1 навантажень на композитні панелі і каркас за рахунок регулювання жорсткості клейового шва змінної товщини. У цій роботі запропонована нова концепція управління жорсткістю за допомогою гвинтів малого діаметра, що самонарізають.

У прикладі, що розглядається, використання в критичній області (рисунок13) клеємеханічних з'єднань з кроком армування $p = 25-100$ мм призведе до 40% зниження максимальної напруги в основних несучих трубах сталевго каркаса. З урахуванням ступеня в рівнянні кривої втоми для елементів зварних конструкцій із сталевго прокату $m = 4$ [84]

зниження напруг дає вигаш у довговічності основних несучих елементів у $\sim 7,5$ разів. При цьому додатковий ефект буде досягнутий не тільки за рахунок вирівнювання, а й за рахунок значного зростання жорсткості з'єднань каркасу та панелей.

Концепція управління жорсткістю реалізована за рахунок використання розроблених нижче номограм, що зв'язують між собою товщину клейового шару (h , мм), крок армування гвинтами, що самонарізають (p , мм) і погонну жорсткість з'єднання (C_1 , Н/мм²), що визначається в розрахунку на одиницю довжини з'єднання.

Схема навантаження МКЕ-моделей показано рисунку26. Значення пар сил F_1 , F_2 забезпечують дію моменту величиною 1 КН м у площині панелі.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						38
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

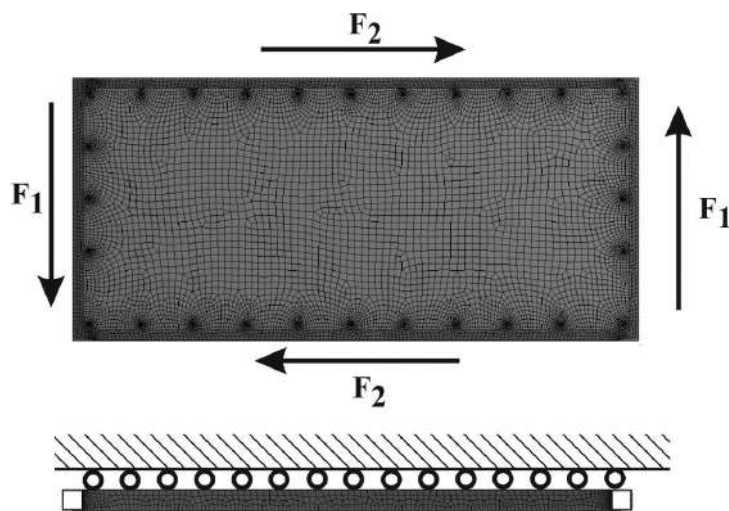


Рисунок 13 – Зсувне навантаження МКЕ-моделі типової панелі

Аналіз напружено-деформованого стану зазначених МКЕ-моделей показав, що вираз (1) вимагає введення поправочного коефіцієнта $k_1(p) = 1,45...1,60$, необхідного для обліку додаткового локального деформування (вигин панелі та гвинтів) у зоні з'єднань при зсуві натурної конструкції (рисунок 14а).

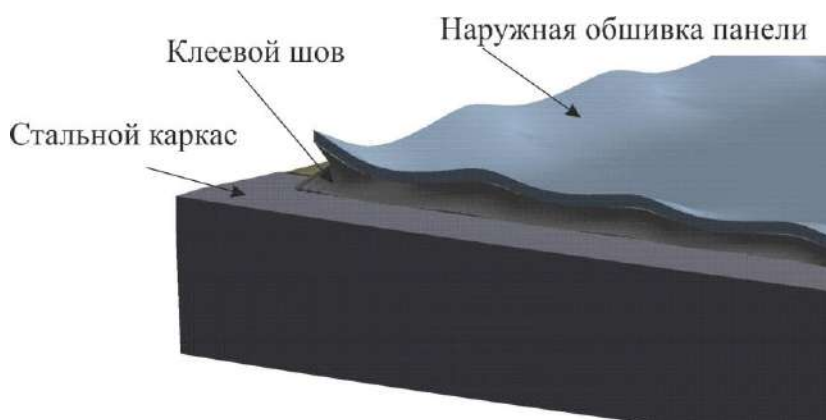


Рисунок 14 – Локальне деформування (а) та пов'язаний з ним поправочний коефіцієнт $k_1(p)$ (б) для клеємеханічних з'єднань між панелями та каркасом

Зазначений вигин призводить до значного збільшення сумарної пружної енергії деформування сполук. Розрахункові дослідження показали, що величина коефіцієнта $k_1(p)$ змінюється несуттєво: менше 10% зі

збільшенням кроку армування r від 25 мм до 100 мм. У зв'язку з цим, для вирішення завдань управління жорсткістю їм можна знехтувати.

Розроблені номограми (рисунок 28) дозволяють визначати необхідний крок армування при заданій товщині клейового шару та жорсткості з'єднання.

2.2 Методика проектування каркасно-панельної конструкції

На описаному вище прикладі кузова трамвайного вагона відпрацьовано методику проектування каркасно-панельної конструкції. Методика включає наступні етапи:

а) виходячи з вимірних значень товщини клейових швів натурної конструкції, виконується процедура керування жорсткістю, описана в попередньому розділі. В результаті підбирається крок армування гвинтами, що самонарізають r , що забезпечує вирівнювання жорсткості клейових з'єднань в найбільш навантажених зонах конструкції.

б) проводиться розрахунок напружено-деформованого стану конструкції за допомогою МКЕ-моделі кузова з еквівалентною обшивкою за режимами I (аварійний) та II (експлуатаційний), див. «Норми для розрахунку та проектування механічної частини нових вагонів трамвая колії 1524 мм» [84].

Розрахункова схема для режиму II розглянуто у підрозділі 2.1.

Розрахункова схема за режимом I показана на рисунку 15.

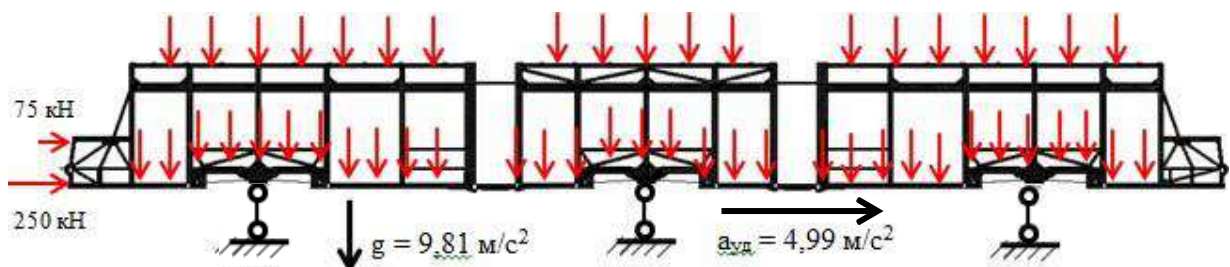


Рисунок 15 – Схема застосування навантажень та закріплень кузова вагона для режиму за режимом I (аварійного)

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						40
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

При розрахунку враховуються такі навантаження:

– власна вага кузова вагона (20500 кг), що включає вагу дахового обладнання (3650 кг);

– максимальне розрахункове навантаження від пасажирів (всі місця для сидіння зайняті, щільність пасажирів 10 осіб на 1 м² вільної площі підлоги, місця для сидіння навантажені силою тиску від 40 осіб), рівна 31240 кг;

– поздовжня сила від удару при наїзді на перешкоду становить 250 кН на лобову балку, 75 кН на підвіконний пояс кабіни.

Поздовжня сила від удару прикладена на майданчиках довжиною 300 мм і врівноважена силами інерції вагона з пасажирами [84].

При розрахунку прийнято, що при наїзді на перешкоду вагон не здійснює гальмування за допомогою пристроїв, що розташовуються на візках, тому сила опору візків у поздовжньому напрямку дуже мала і всі сили інерції вагона сприймають лобова і підвіконна балки. Така схема відповідає найбільшим можливим навантаженням на кузов при наїзді на перешкоду.

Сили ваги кузова вагона враховані запровадженням прискорення вільного падіння, що дорівнює 9,81 м/с².

в) по кожному режиму згідно з заданим кроком армування r (мм) обчислюються зсувні зусилля в зоні центрального армуючого елемента на довгих сторонах панелей (рисунок 30). Зазначений елемент є найбільш навантаженим із усіх елементів з'єднання, таким чином, для інших елементів буде отримана оцінка запасу міцності.

Для обчислення зсувних зусиль використовуються епюри дотичних напруг у площині панелей (рис. 31), побудовані за відповідними гранями панелей еквівалентної обшивки МКЕ-моделі кузова.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						41
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

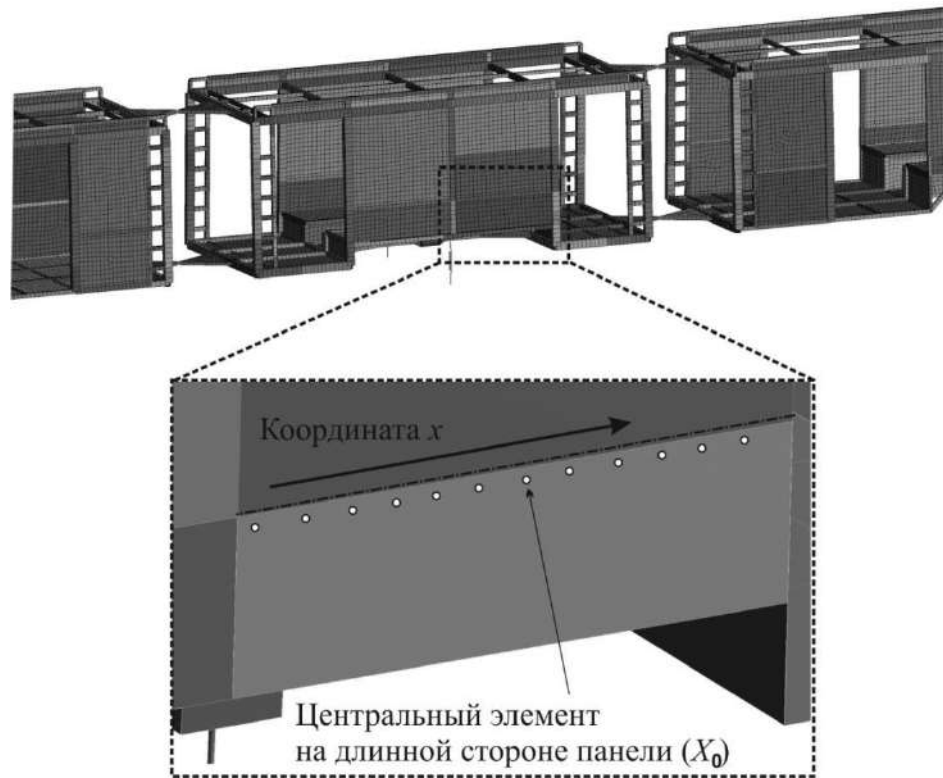


Рисунок 16 – Визначення навантаженості клеємеханічних з'єднань у складі каркасно-панельного кузова

г) обчислене на попередньому етапі зсувне навантаження по кожному з режимів множиться на поправочні коефіцієнти $k_2(d)$ та k_3 :

$$F = \Phi_0 \cdot k_2(d) \cdot k_3$$

Коефіцієнт $k_2(d)$ введений для обліку концентрації напруги, пов'язаної з урахуванням особливостей роботи клеємеханічних сполук в натурній конструкції (рисунок 32).

Величина поправочного коефіцієнта k_2 визначена з аналізу розподілу зусиль у МКЕ моделі типової панелі (рисунок 18а), що працює на зсув (схема навантаження на рисунку 26). Вона залежить від кроку армування, товщини клейового шва та співвідношення сторін d . Для спрощення методики проектування величина поправочного коефіцієнта оцінена в запас для

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						42
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

кожного з відносин сторін панелі d .

Аналіз показав, що з значеннях $d = 3..4$ жорсткість каркаса різко зростає, т.к. труби, що формують його коротку сторону, починають працювати не тільки на вигин, але і на зсув за рахунок малого відношення довжини характерного розміру поперечного перерізу. Це викликає перерозподіл навантажень в натурній конструкції, що відрізняється від того, що спостерігається в простішій МКЕ-моделі кузова, в якій еквівалентна обшивка та каркас абсолютно жорстко пов'язані між собою.



Рисунок 17 – Поправочний коефіцієнт локального навантаження

Коефіцієнт k_3 використаний для обліку гіротермальних ефектів під час експлуатації транспортного засобу (зниження міцності). У розглянутому випадку ХАСП і гвинти, що самонарізають, мають близькі за величиною коефіцієнти термічного розширення, а також захищені від прямого впливу атмосферних опадів і ультрафіолетового випромінювання захисним шаром - гелькоутом. Отже, вплив вологи на з'єднання буде обмеженим і пов'язаним, в основному:

- з процесами конденсації вологи при значній відмінності денних

та нічних температур (осінній та весняний сезони);

- із заморожуванням/розморожуванням вологи при переході через 0°C.

Проведений огляд (п. 1.2.6) виявив відсутність експериментальних даних про гіротермальні ефекти для хаотично армованих склопластиків на основі поліефірних смол і еластичних клейових композицій. Тому пропонується орієнтуватися на обмежений набір оцінок, отриманих для інших матеріалів. Аналіз наявних оцінок показав, що максимальне зниження циклічної та статичної міцності клейових та механічних сполук композитів з полімерною матрицею при граничному насиченні вологою та дії підвищених температур досягає 60-70%. Клеємеханічні сполуки демонструють вдвічі кращу стійкість до гіротермальної дії, ніж клейові. Таким чином, приймається припущення, що коефіцієнт поправки k_3 повинен враховувати 30% зниження граничного навантаження для клеємеханічних з'єднань в процесі експлуатації.

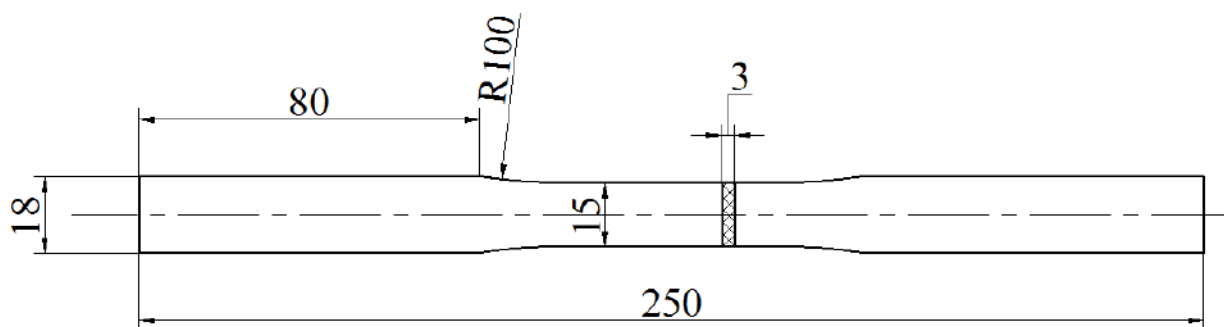
					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						44
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

3. АНАЛІЗ МЕХАНІЧНОЇ ПОВЕДІНКИ КЛЕЕМЕХАНІЧНИХ СПОЛУК З КОМПОЗИТНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

3.1 Експериментальне дослідження механічних характеристик елементів нахлесткових сполук

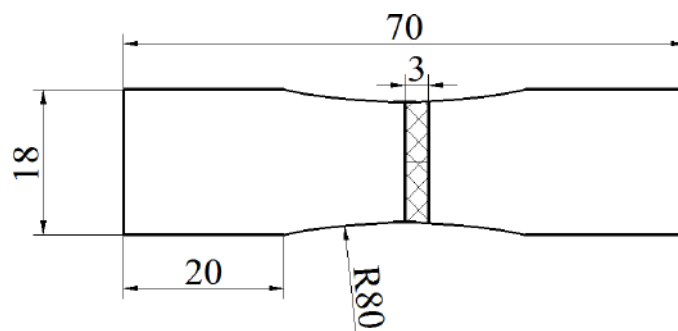
3.1.1 Випробування зразків із ХАСП

Як обшивку панелей каркасно-панельного кузова пропонується використовувати недорогий хаотично армований склопластик (ХАСП), механічні характеристики якого мало вивчені та залежать від властивостей скляних волокон та їх масової частки у матеріалі [8]. На співвідношення масових часток волокон і матриці в композитному матеріалі значний вплив має технологія виготовлення. У цій роботі пропонується використовувати метод контактного формування, що є найбільш рентабельним в умовах дрібносерійного виробництва щодо виробів простої форми. У літературі не вдалося виявити коректних даних про характеристики ХАСП, виготовленого методом контактного формування. У зв'язку з цим були проведені відповідні випробування зразків ХАСП на розтяг за ГОСТ 25.601-80 [86], стиснення за ГОСТ 25.602-80 [87], а також змінання отворів (локальна міцність). При цьому використані зразки (див. рисунок 18) з довільним напрямом вирізки, т.к. ХАСП має властивість псевдоізотропності в площині армування скляними волокнами.

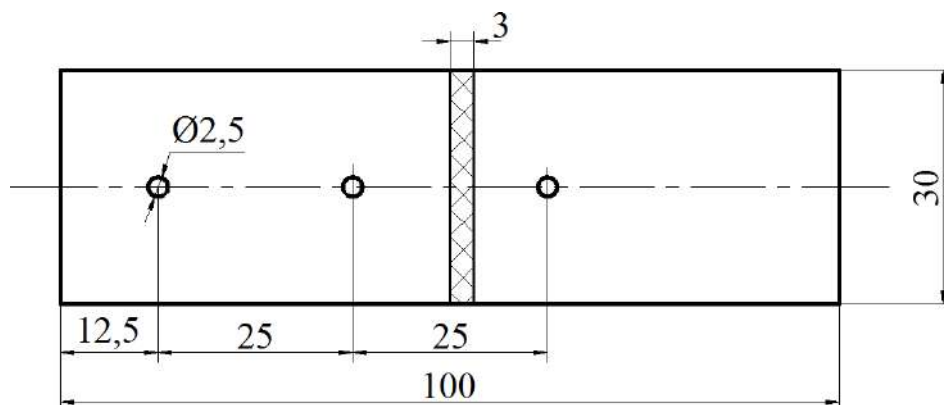


а)

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45



б)



в)

Рисунок 18 – Ескізи зразків ХАСП для квазістатичних випробувань на розтягування (а), стиснення (б), змінання отворів (локальна міцність) (в)

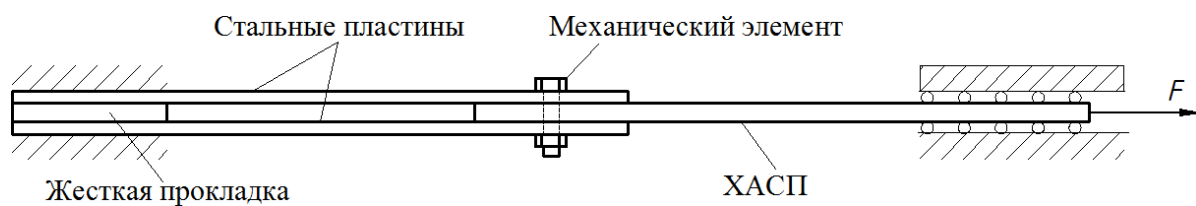
Пластини з ХАСП товщиною 3 мм виготовлені методом контактного формування на основі скломату щільністю 300 г/м² та поліефірної смоли марки Agorol S19 TA з каталізатором Butanox M-50 [85]. Затвердіння заготовок склопластикових пластин проведено при кімнатній температурі протягом

24 годин з наступним твердженням у сушильній шафі протягом 4 годин при температурі 70°C.

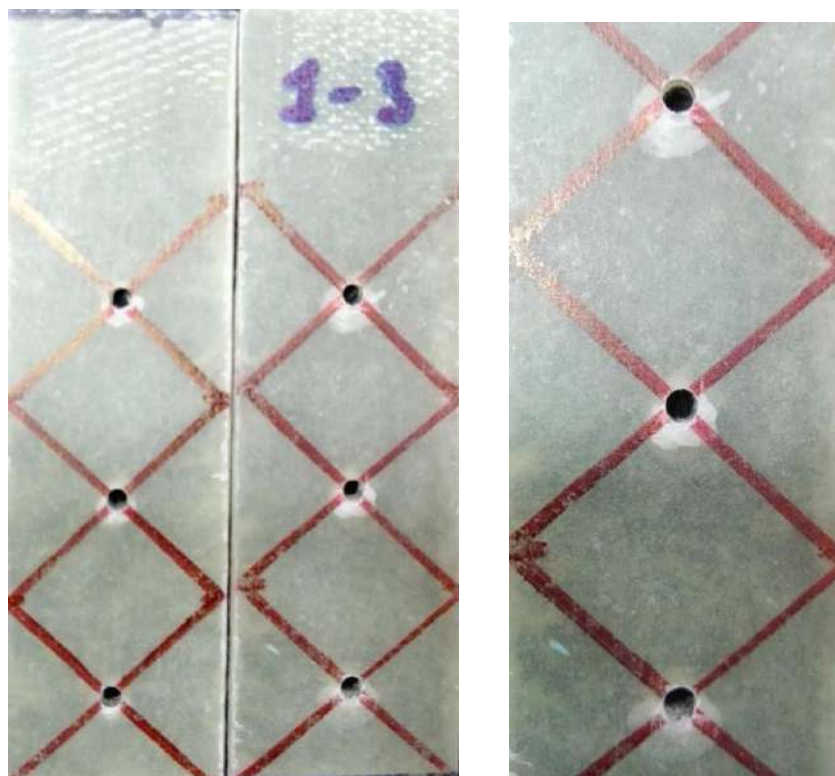
Отвори у відповідних зразках виготовлені за допомогою свердла із алмазним напиленням для металевих виробів. Швидкість обертання свердлу становила 3000 об/хв, швидкість подачі: 0,01 мм/об. Діаметр отворів складав 2,5 мм. Для зниження початкових пошкоджень при виході свердла з отворів

									Арк.
									46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ				

свердління проводили на бруску з деревини. Схема випробування зразків ХАСП на змінання отворів представлена рисунку41а. Механічний елемент мав діаметр 25 мм.



а)



б)

Рисунок 19 – Схема (а) та результати (б) випробувань зразків ХАСП на сум'яття

Випробовано по п'ять зразків на розтяг і стиснення і два зразки (шість отворів) на міцність при змінанні на універсальній випробувальній машині INSTRON 5882. Швидкість руху траверси склала 10 мм/хв, температура навколишнього середовища 23 ± 1 оС.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Результати випробувань після статистичної обробки показані у таблиці 5. Як очевидно з діаграм випробувань, при навантаженні у площині армування волокнами для ХАСП характерна нелінійність деформування – псевдопластичність. Псевдопластичність у разі розтягування обумовлена поступовим прослизанням волокон щодо матриці, їх локальним руйнуванням. У разі стиснення псевдопластичність пов'язана з відділенням волокон від матриці, що сприяє втраті їх стійкості. Втрата стійкості армуючих волокон відповідає за нижчу міцність ХАСП при стисканні в порівнянні з розтягуванням.

Межа міцності ХАСП на зминання (локальна міцність) в 1,6 разів вище межі міцності при розтягуванні і має порівнянний розкид результатів. Діаграм випробувань властивий помітний розкид за жорсткістю та деформаціями руйнування, зумовленими стохастичною природою ХАСП.

Таблиця 5 – Результати випробувань зразків ХАСП на розтягування, стиснення та зминання

№	Межа міцності (розтягування), МПа	Модуль пружності (розтягування), ДПа	Коефіцієнт Пуассона (розтягування, $\nu = 0,02\%$)	Межа міцності (стиснення), МПа	Межа міцності на зминання, МПа
1	186	12,7	0,24	160	333
2	208	13,7	0,25	141	320
3	211	13,8	0,2	161	327
4	199	12,9	0,26	131	311
5	189	13,7	0,21	170	332
6	-	-	-	-	300
Середнє	198,6	13,4	0,23	152,6	320
СКО	11,10	0,50	0,03	16,0	13,1
Коефіцієнт варіації, %	5,60	3,90	11,2	10,5	4,1

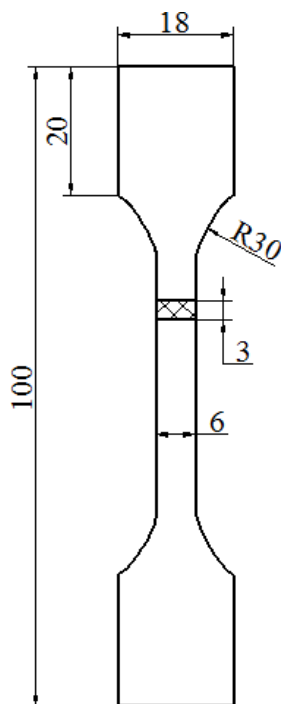
Визначені в результаті випробувань механічні характеристики ХАСП закладені в моделі матеріалів МКЕ-моделей типової панелі (гл. 2) та клеємеханічних з'єднань, армованих гвинтами, що самонарізають, які будуть

описані нижче.

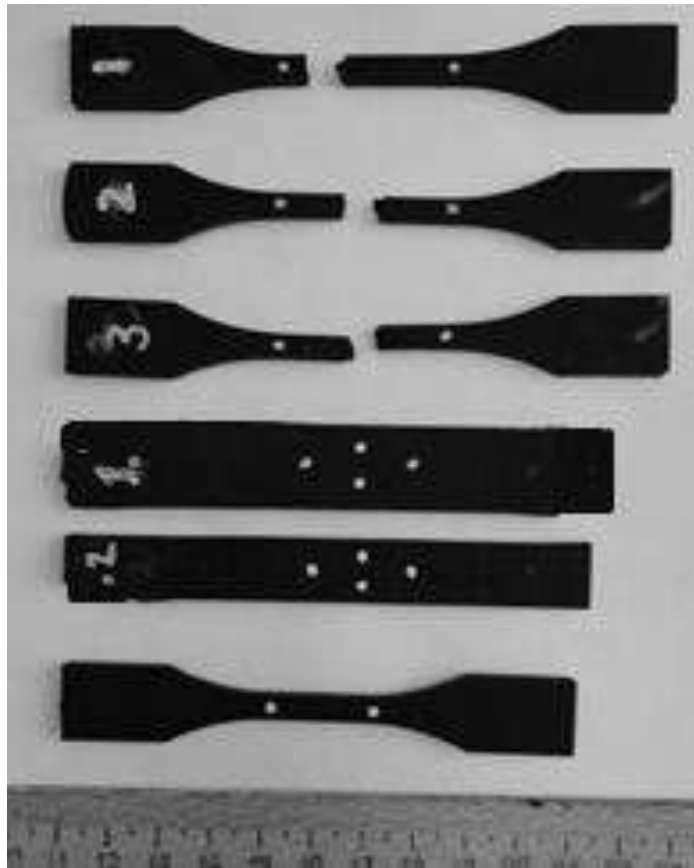
3.1.2 Випробування зразків еластичної клейової композиції

У технічних умовах на еластичні клейові композиції не вказуються діаграми деформування матеріалу, що дозволяють адекватніше враховувати його поведінку при розрахунку клеємеханічних сполук (можлива нелінійність діаграм). У зв'язку з цим необхідно провести натурні випробування зразків при розтягуванні.

Для експериментальних досліджень було виготовлено стандартні зразки у формі двосторонньої лопатки (5 шт., рисунок 20) та прямокутної пластини (3 шт., рисунок 20) з поліуретанового низькомодульного герметика Terostat 8590 (затвердіння проведено за рекомендаціями виробника).



					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						49
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)

б)

Рисунок 20 – Ескіз (а) та фото деяких натурних зразків (б) еластичної клейової композиції

Випробування на розтягування проведено на універсальній випробувальній машині INSTRON 5882 (рисунок45). Швидкість руху траверси 5 мм/хв. Деформація зразка вимірювалася за допомогою відеоекстензометра AVE (рисунок46).

Відеоекстензометри використовуються для вимірювання деформації еластичних матеріалів під дією механічного навантаження, коли навісні екстензометри непридатні через їх жорсткість та вагу. Відеоекстензометр використовує цифрову камеру з високою роздільною здатністю та обробляє зображення контрастних міток у режимі реального часу для точного вимірювання осьової та поперечної деформації зразків випробування.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						50
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 21 – Вид зразка з мітками для випробувань на розтягування



Рисунок 22 – Відеоекстензометр AVE

В результаті випробувань отримано діаграми деформування (рисунок 47). При випробуванні одного із зразків відбулося прослизання у захопленнях.

Тому діаграма напруги даного зразка відрізняється від інших представлених діаграм. Результати випробувань після статистичної обробки показані у таблиці 6.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						51
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



Рисунок 23 – Діаграми деформування при розтягуванні еластичної
клеювої композиції

Таблиця 6 – Результати випробувань зразків еластичної клеювої композиції на
розтягування

№	Ширин а b, мм	Товщин а h, мм	Початкова довжина l ₀ , мм	Максимальне навантаження P _{max} , Н	Максимальна умовна нормальна напруга $\sigma_{\alpha\xi}$, МПа
1	4,85	3,10	20,4 9	103,68	6,9
2	4,75	3,02	20,6 1	102,15 3	7,1
3	4,90	3,05	20,4 5	103,71	6,9
4	4,75	3,01	20,3 1	113,12	7,9
5	4,80	3,10	20,5 5	113,46	7,6
Середнє					7,3
СКО					0,4
Коефіцієнт варіації, %					6,2

Як показують випробування клеємеханічних сполук (див. нижче), зсувні деформації клейового шва в момент руйнування з'єднання не перевищують 20%. Аналіз діаграм рисунку 47 показує, що на таких відносно малих деформаціях клейовий шар поводить себе як лінійно пружний матеріал із модулем пружності ~ 4 МПа на початковій ділянці діаграми. При цьому його діаграма деформування в істинній напрузі не суттєво відрізнятиметься від відповідної діаграми на рисунку 47.

Для визначення коефіцієнта Пуассона випробувані прямокутні зразки (44б), т.к. визначити поперечну деформацію на зразках з формою двосторонньої лопатки важко.

Випробування на розтяг проведені на універсальній випробувальній машині INSTRON 5882. Швидкість руху траверси становила 5 мм/хв. Деформація зразка вимірювалася за допомогою відеоекстензометра AVE.

В результаті випробувань отримано залежність «подовжня деформація – поперечна деформація»

Результати випробувань після статистичної обробки показані у таблиці 7. Як видно з діаграм, коефіцієнт Пуассона в діапазоні поздовжніх деформацій 0-20% має значення 0,48.

Таблиця 7 – Коефіцієнт Пуассона для випробуваних зразків еластичної клейової композиції

№ зр.	Відстань між вертикальними мітками, мм	Відстань між горизонтальними мітками, мм	Коефіцієнт Пуассона
1	20,34	10,12	0,484
2	19,33	10,05	0,464
3	20,51	10,14	0,494
Середнє			0,481
СКО			0,015
Коефіцієнт варіації, %			3,2

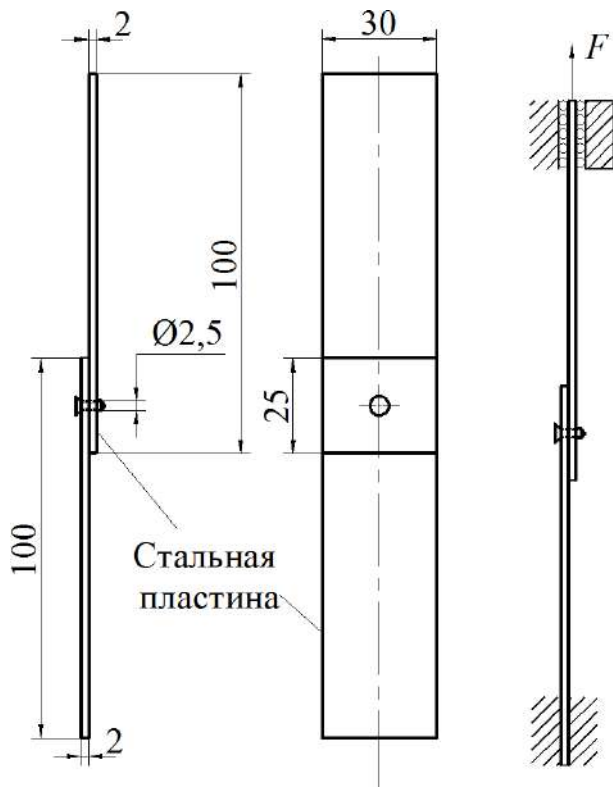
3.1.3 Випробування самонарізних гвинтів

Як було зазначено вище, існують різні стандарти визначення механічних властивостей матеріалів гвинтів [63, 164], які включають типовий набір випробувань на твердість, аналіз мікроструктури матеріалу, а також випробувань на міцність при скручуванні. У зв'язку з тим, що в каркасно-панельному кузові гвинти, що самонарізають, будуть працювати при зсувних навантаженнях, в рамках дослідження необхідно провести відповідні випробування, що дозволяють отримати оцінки статичної міцності гвинтів. Для досягнення граничних умов, близьких до роботи гвинтів у натурній конструкції, при випробуваннях використані зразки механічних з'єднань з'єднань типу «сталь-сталь». Ескіз, схема випробувань, а також фото зразків показані на рисунку 49.

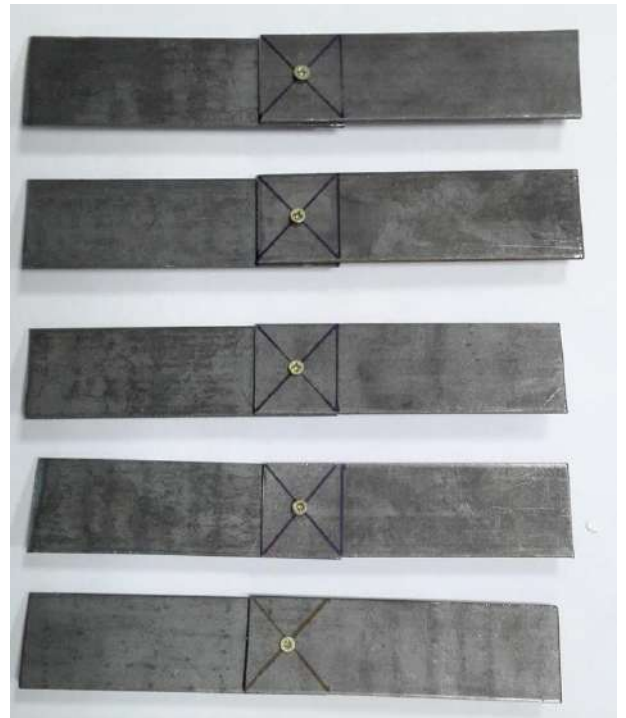
Металеві пластини зразків виготовлені з сталевого гарячекатаного листа за ГОСТ 19903-74 [88] (матеріал - Сталь 3, товщина 2 мм). Як механічні елементи використані універсальні самонарізні гвинти по DIN 7962 [62] з цинковим покриттям, що мають діаметр 2,5 мм і довжину 10 мм.

Перед армуванням у зразках було виготовлено наскрізні технологічні отвори: діаметром 2 мм. Діаметр отворів підібрано з умови неруйнування гвинта при вкручуванні. Свердління проведено за допомогою високоміцного свердла з алмазним напиленням для металевих виробів зі швидкістю обертання 3000 об/хв та подачею 0,01 мм/об.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						54
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



а)



б)

Рисунок 24 – Ескіз, схема випробувань (а) та фото (б) зразків для випробувань на міцність гвинтів, що самонарізають.

Затяжка гвинтів була обмежена тріскачкою викрутки, що забезпечує щільний, але з можливістю провороту контакт листів. Випробовано п'ять зразків на розтяг на універсальній випробувальній машині INSTRON 5882. Швидкість руху траверси 10 мм/хв, температура навколишнього середовища 23 ± 1 оС. Діаграми деформування зразків показані рисунку 50.

Результати випробувань після статистичної обробки показані в таблиці 8.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						55
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

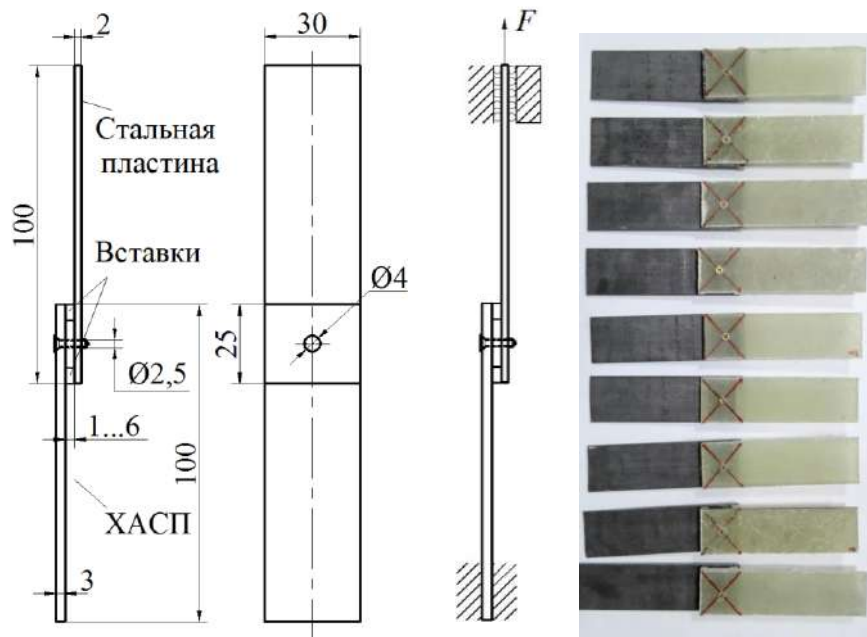
Таблиця 8 - Результати випробувань на міцність гвинтів, що самонарізають.

№	Вид руйнування	Граничне навантаження, Н
1	Зріз	2500
2	Зріз	2200
3	Зріз	2280
4	Зріз	2050
5	Зріз	2150
Середнє		2236
СКО		169,5
Коефіцієнт варіації, %		7,6

Як видно, випробуваним зразкам властиво суттєво нелінійну поведінку та деякий розкид граничних навантажень, які обумовлені відповідним розкидом механічних властивостей матеріалу самонарізних гвинтів, а також взаємодією гвинтів та сталевих пластин в області отворів.

3.1.4 Випробування механічних з'єднань типу "композит-сталь"

Для визначення виду залежності (2), використаної в запропонованому вище способі керування жорсткістю клеємеханічних сполук типу «композит-сталь», армованих самонарізуючими гвинтами (підрозділ 2.2), проведено експериментальні дослідження зразків нахлесткових механічних з'єднань зі змінним зазором між пластинами (рисунк51).



а)

б)

Рисунок 25 – Ескіз, схема випробувань (а), а також фото (б)

зразків механічних з'єднань для випробувань на жорсткість

Як механічні елементи використані самонарізні гвинти по DIN 7962 [62] з цинковим покриттям, що мають діаметр 2,5 мм і довжину 10 мм (для з'єднань із зазором між пластинами 1 і 3 мм) і 16 мм (для з'єднань із зазором 6 мм) з фіксованим зусиллям затягування.

Сталеві пластини та технологічні отвори під гвинти, що

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						57
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

самонарізають, виконані аналогічно зразкам, описаним у пункті 3.1.3. Пластини з ХАСП виконані аналогічно зразкам п. 3.1.1. Свердління ХАСП проводили на підкладці з деревини, що забезпечило відсутність ушкоджень склопластику [77] на виході свердла. Проведено також зенковка отворів з боку склопластикової пластини свердлом діаметром 4 мм з кутом заточування 120° на глибину 1,5 мм. З'єднання виготовлені без використання клейового шва, змінний зазор забезпечується за рахунок вставок з ХАСП по краях нахлеста. Вставки утримуються в зазорі за рахунок сил тертя, що виникають при контрольованій затяжці гвинта, що самонарізає.

3.2 Розрахунково-експериментальний аналіз механічної поведінки клеємеханічних сполук з композитними елементами при квазістатичному навантаженні

Розрахунково-експериментальний аналіз механічної поведінки клеємеханічних сполук пластин з ХАСП, необхідний для підтвердження ефективності використання самонарізних гвинтів як армуючих елементів, а також для розробки відповідного розрахункового інструментарію методики проектування каркасно-панельного кузова з макрогеометричними відхиленнями³ (пун. У випробуваннях досліджено зразки сполук типу "композит-композит", т.к. найбільший внесок у втрату жорсткості та настання граничної рівноваги сполук типу «композит-сталь» вносить взаємодію армуючих елементів з полімерним композитом, що має на два порядки м'якшу полімерну матрицю, ніж сталь.

Провели випробування трьох груп зразків:

- клейові з'єднання;
- клеємеханічні нахлесточные з'єднання, посилені сталевими гвинтами, що самонарізають, за DIN 7962 с цинковим покриттям, що мають діаметр 2,5 мм [62];

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– клеємеханічні нахлесточные з'єднання, посилені алюмінієвими заклепками діаметром 4 мм [89].

Ескіз клеємеханічного з'єднання, армованого гвинтами, що самонарізають, показаний на рисунку 53а.

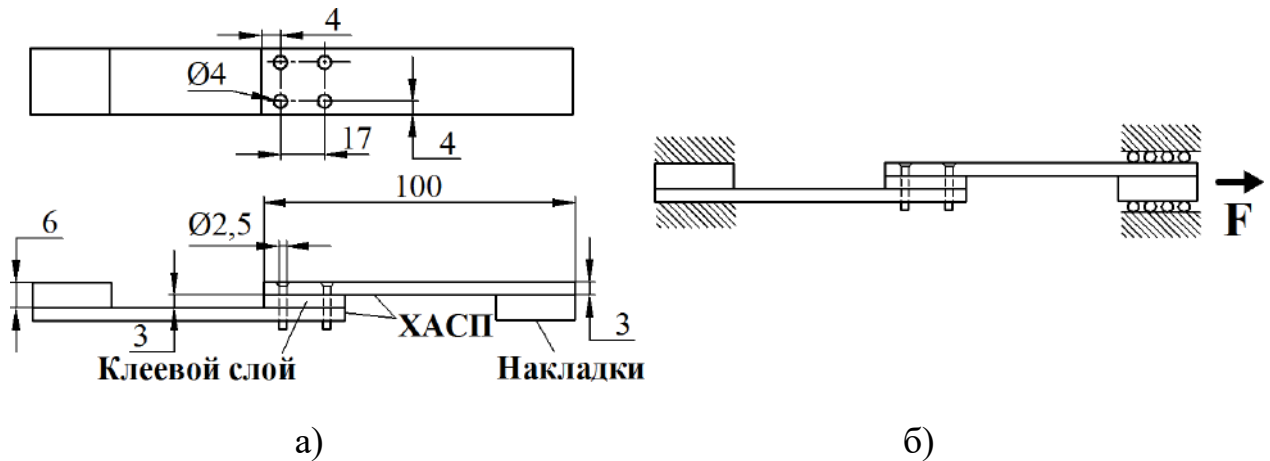


Рисунок 26 – Ескіз зразка клеємеханічного з'єднання (а) та схема його навантаження (б)

Пластини з ХАСП виготовлені методом контактного формування на основі скломату щільністю 300 г/м² та поліефірної смоли марки Aropol S19 TA з каталізатором Butanox M-50 [85]. Затвердіння заготовок склопластикових пластин проведено при кімнатній температурі протягом 24 годин з наступним посттвердінням в сушильній шафі протягом 4 годин при температурі 70°C.

Склейка пластин виготовлена на основі поліуретанового низькомодульного герметика Terostat 8590. Процес склеювання, включаючи підготовку поверхонь, нанесення клейової композиції та подальше затвердіння, проведено згідно з рекомендаціями виробника [82]. Фотографії зразків показані на рисунку 54. Перед армуванням у зразках були виготовлені наскрізні технологічні отвори: діаметром 2 мм (діаметр підібраний з умови неруйнування гвинта при вкручуванні) для гвинтів, що самонарізають, і 4 мм – для заклепок.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк. 59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Свердління проведено за допомогою високоміцного свердла з алмазним напиленням для металевих виробів зі швидкістю обертання 3000 об/хв та подачею 0,01 мм/об. Зроблено також зенковка отворів під самонарізні гвинти з боку склопластикової пластини свердлом діаметром 4 мм з кутом заточування 120° на глибину 1,5 мм.

Випробовано по п'ять зразків на розтяг на універсальній випробувальній машині INSTRON 5882. Швидкість руху траверси 10 мм/хв, температура довкілля 23±1оС.

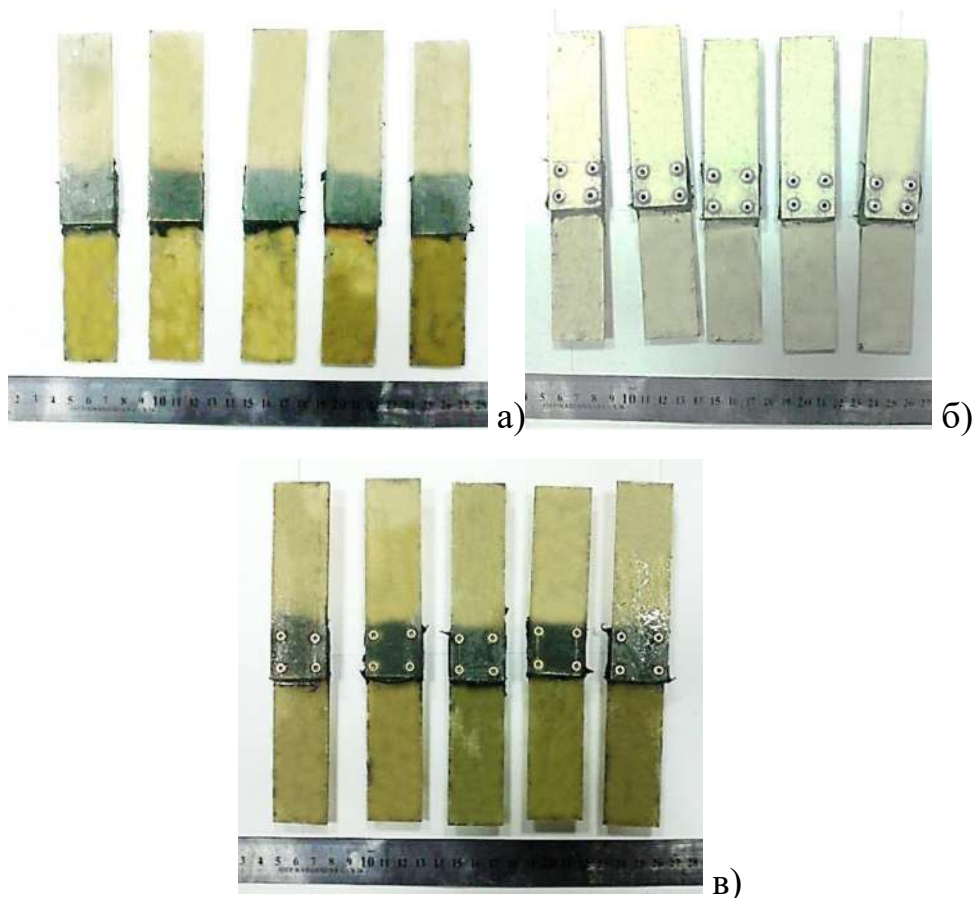


Рисунок 27 – Фото натурних зразків клейових (а) та клеємеханічних нахлесткових з'єднань, армованих заклепками (б) та гвинтами (в), що самонарізають.

Результати випробувань після статистичної обробки показані у таблиці і9. Випробування сполук показали збільшення граничного навантаження, що

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

становить у середньому 40% для різьбових z-елементів та 10% для заклепкових порівняно з чисто клейовими. Руйнування у першому випадку відбувалося шляхом зрізу армуючих елементів, у другому – шляхом одночасного зростання тріщин у склопластику, що починаються від отворів, та зрізу армуючих елементів. Руйнування клейових сполук відбувалося за змішаним адгезійно-когезійним механізмом. Слід зазначити, що випробувані з'єднання мали по чотири армуючі елементи, отже, гарантоване навантаження, яке може бути сприйняте з'єднанням, армованим одним самонарізним гвинтом, становить 815 Н.

Таблиця 9 – Результати випробувань нахлюстових з'єднань на міцність при одноразовому навантаженні

Тип з'єднання		Клейове	Посилене заклепками	Посилене самонарізуючими гвинтами
Граничне навантаження, Н	Середнє	2390	2985	3720
	СКО	176	970	454
	Коефіцієнт варіації, %	7,4	32,5	12,2
Податливість при навантаженні 50 Н1), $1 \cdot 10^{-7}$ м/Н	Середнє	34,1	3,4	7,5
	СКО	15,2	0,6	2,6
	Коефіцієнт варіації, %	44,5	17,1	35,3
Залишковий трансверсальний стиск клейового шару, %		-	30	5

Розкид результатів випробувань посилених сполук обумовлений

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						61
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

відповідними розкидами механічних характеристик ХАСП та армуючих елементів, експериментально виявленими у підрозділі 3.1.

У науковій літературі є роботи, у яких представлені більш несприятливі оцінки неоднорідності механічних властивостей ХАСП, ніж та, що автором. Зокрема, у роботі [79] показані результати випробувань на зминання отворів у пластинах з ХАСП із середньою товщиною 3,5 мм. Статистична обробка експериментальних даних для отворів діаметром 4 мм і 5 мм показує, що коефіцієнт варіації межі міцності на зминання до 4,3 разів вище, ніж коефіцієнт варіації межі міцності того ж матеріалу з середніми властивостями, отриманого з випробувань на розтягування зразків без отворів. Значний розкид локальної жорсткості ХАСП показаний також [90]. Локальна жорсткість була оцінена за допомогою контактної індентування пластини, виготовленої методом ручного контактної формування із 4 шарів скломата (товщина 2 мм).

Характерні стрибки на діаграмах деформування зразків клейових сполук викликані місцевим відшаровуванням клейового шва на кінцях нахлеста.

Гвинти, що самонарізають, демонструють кращі підсилюючі властивості з точки зору граничного навантаження при одноразовому навантаженні. Однак в області малих значень навантажень, характерних для багатоциклової втоми (див. гл. 4), жорсткість з'єднань, посиленіх заклепками, практично в 2 рази вище, ніж у аналогів з гвинтами, що самонарізають.

Істотним недоліком односторонніх заклепок є залишкові трансверсальні навантаження, які після монтажу елементів призводять до значного стиснення клеєвого шару низькомодульного (товщина знижується на 30%). Даний ефект негативно позначається на точності посадки панелей у каркас призводить до відсутності площинності екстер'єру, порушуючи сучасні вимоги до якості зовнішнього вигляду транспортних засобів.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						62
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

4. ІНЖЕНЕРНА МЕТОДИКА ОЦІНКИ ДОВГОВІЧНОСТІ КЛЕЕМЕХАНІЧНИХ СПОЛУКІВ

4.1 Спосіб підвищення довговічності клеємеханічних з'єднань, армованих гвинтами.

Для зниження зазначених початкових дефектів пропонується додаткова обробка технологічних отворів під гвинти, що самонарізають, в наступній послідовності. Попередньо змонтовані гвинти, що самонарізають, викручуються з технологічних отворів, після чого в отвори за допомогою шприца вводиться поліефірна композиція марки Aropol S19 TA. Викручені самонарізні гвинти, попередньо занурені в ту ж поліефірну композицію, повторно монтуються у зразки. Далі проводиться затвердіння поліефірної композиції в отворах при кімнатній температурі протягом 24 годин. Обробка поліефірною композицією призводить також до збільшення ефективної площі контакту гвинтів і деталей, що з'єднуються. Фотографії поперечних розрізів зразків з'єднань з обробкою за запропонованим методом і без нього показані на рисунку 62.



а)



б)

Рисунок 28 – Поперечний розріз зразка нахлесточного з'єднання з армуючим елементом: а) вихідний; б) модифікований.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63

Ефективність запропонованого способу підтверджено на прикладі болтових з'єднань у роботі [56], в якій відзначається зростання циклічної міцності модифікованих з'єднань до 4 разів. При цьому в роботі недостатньо докладно розкрито методику проведення випробувань та методи обробки результатів випробувань. Для клеємеханічних з'єднань, армованих гвинтами, що самонарізають, проведено додаткові дослідження (див. підрозділ 4.2).

4.2 Експериментальне дослідження механічного поведінки клеємеханічних сполук при циклічному навантаженні

Об'єктом дослідження є нахлістне клеємеханічне з'єднання типу «композит-сталь», рисунок 29.

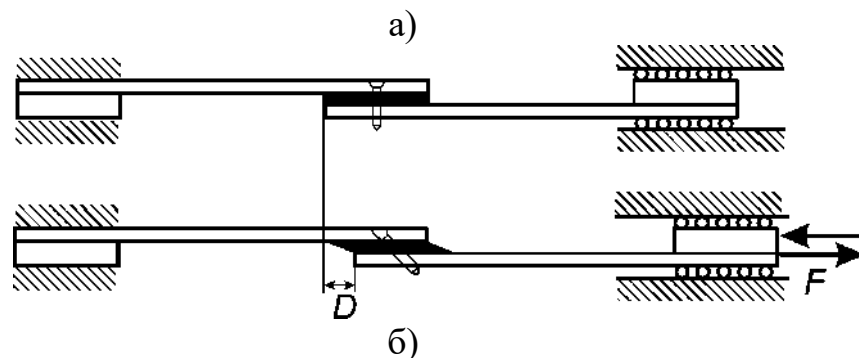


Рисунок 29 – Зразок нахлесточного з'єднання: а) ескіз; б) схема випробувань

Зразки складаються із сталеві та склопластикові пластин, з'єднаних внахлест за допомогою поліуретанового герметика марки Terostat 8590 [82]. Зона нахльосту в центрі армована сталевим гвинтом, що самонарізає, по DIN 7962 діаметром 2,5 мм [62]. Металеві пластини виготовлені з сталевого гарячекатаного листа за ГОСТ 19903-74 [88] (матеріал – Сталь 3, товщина 2

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		64

мм), склопластикові пластини виготовлені методом контактного формування з хаотично армованого склопластику товщиною 3 мм на основі скломату щільністю 300 г/м² і поліефірної марки Aropol S19 TA з каталізатором Butanox M-50 [85]. Затвердіння заготовок склопластикових пластин проведено при кімнатній температурі протягом 24 годин з наступним посттвердінням в сушильній шафі протягом 4 годин при температурі 70°C.

Перед армуванням у зразках були виготовлені наскрізні технологічні отвори за допомогою міцного свердла діаметром 2 мм (діаметр отворів підібраний з умови неруйнування гвинтів при вкручуванні) з алмазним напиленням для металевих виробів зі швидкістю обертання 3000 об/хв і подачею 0,01 мм.

Свердління починали з боку композитної пластини, що забезпечило зниження рівня ушкоджень ХАСП [77] при виході свердла в шар, що складається з поліуретанового низькомодульного герметика. Проведено також зенковка отворів з боку склопластикової пластини свердлом діаметром 4 мм з кутом заточування 120° на глибину 1,5 мм. Модифіковані зразки відрізняються попередньою обробкою полімером технологічних отворів під гвинти, що самонарізають (підрозділ 4.2).

Випробування проведено на для циклічних випробувань Instron Electropulse 3000 при температурі 22±2°C та вологості 75-80%. Частота навантаження була обмежена величиною 10 Гц, при якій не спостерігали суттєвого саморозігріву (підвищення температури на поверхні зразка складо не більше 1°C), рисунок64. Поле температур на поверхні зразка контролювали за допомогою інфрачервоної тепловізійної системи FLIR SC7700 протягом усього процесу випробувань.

Симетричний синусоїдальний цикл навантаження був заданий програмою контролера при трьох рівнях амплітуди навантаження F (рисунок63б): 150, 175 та 200 Н. При кожному рівні навантаження випробувано по три зразки кожної групи. Величину переміщення пластин D

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						65
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

у зоні нахльосту (рисунок 63б) вимірювали за допомогою динамічного навісного екстензометра марки Instron 2620-601.

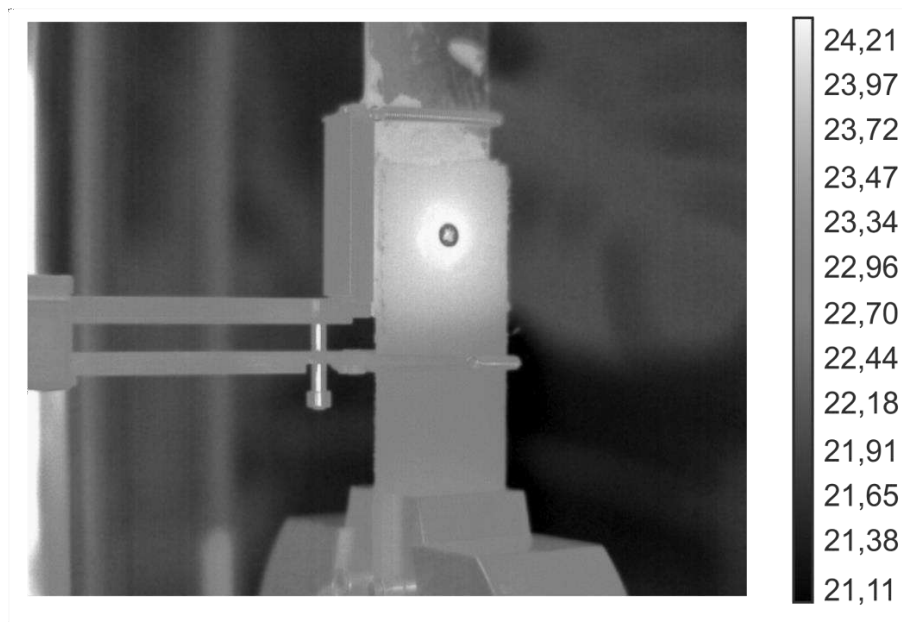


Рисунок 30 – Поле температур на поверхні зразка у процесі випробувань (зразок вихідного типу, амплітуда навантаження 200 Н)

Далі розмах переміщень зростає до тих пір, поки в роботу поступово не втягнеться склопластик без початкових пошкоджень, при цьому швидкість розвитку ушкоджень у такому склопластику стабілізується і починається етап стаціонарного збільшення розмаху переміщень гвинта з відповідним нахилом експериментальної діаграми. Характерні зазори, утворені в результаті фарбування склопластику, показані на рисунку 67.

Ділянка лавиноподібного збільшення податливості обумовлена виникненням і розвитком тріщини в гвинті, що підрізається, що підтверджується результатами мікроскопічного дослідження поперечних розрізів зразків, що знаходяться на стадії стаціонарного і лавиноподібного збільшення податливості (рисунок 31).

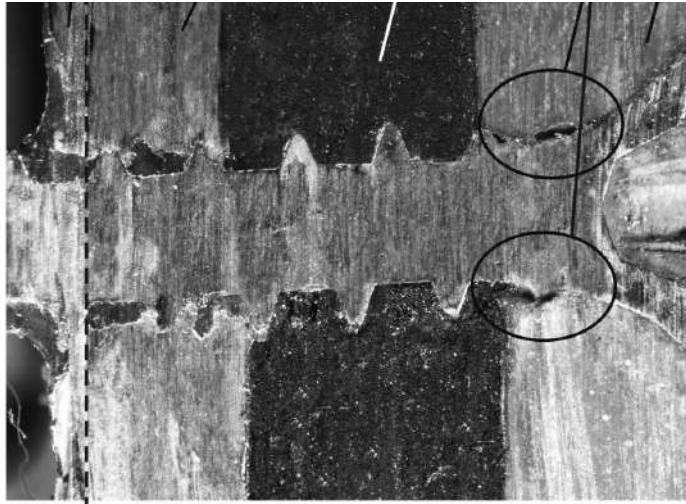


Рисунок 31 – Поперечний розріз модифікованого зразка на стадії стаціонарного збільшення податливості (тріщини у гвинті відсутні)

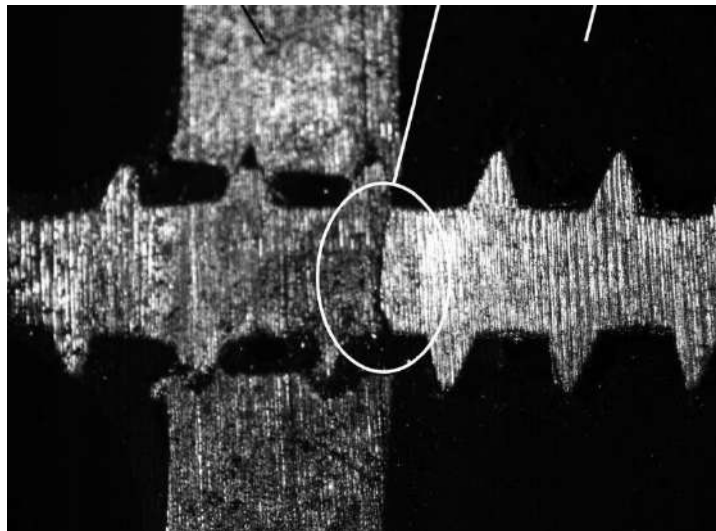


Рисунок 32 – Поперечний розріз модифікованого зразка на стадії лавиноподібного збільшення податливості

Виникнення та розвиток тріщини у гвинті характеризується збільшенням ступеня асиметрії циклічної діаграми «Сила – переміщення» (рисунок 69), так як зразок демонструє різну жорсткість при розкритті та закритті тріщини в гвинті, що самонарізає.

Вважається, що після настання граничного стану з'єднання підлягає подальшій експлуатації, т.к. його податливість починає неконтрольовано

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		67

швидко зростати. Початком лавиноподібного зростання податливості вважали 5% відхилення тангенсу кута нахилу дотичної до діаграми (dR_{\square}/dN) від відповідного середнього тангенсу кута нахилу стаціонарної ділянки (dR_{\square}/dN)_{st} (рисунок 66).

Результати випробувань після статистичної обробки показані у таблиці 12. Усі дані отримані без урахування перших десяти циклів з метою виключення етапу початкового опрацювання зразка, в процесі якого петля гістерезису стабілізується.

Певний розкид результатів випробувань обумовлений неоднорідністю механічних властивостей ХАСП і гвинтів, що самонарізають.

Таблиця 12 - Результати циклічних випробувань

Тип зразка	Амплітуда навантаження F , Н	Кількість циклів до настання граничного стану N_{cr}			Величина вихідної податливості, $1 \cdot 10^{-7}$ м / Н			Величина зміни граничної податливості $\delta_{\text{хрщ}}$ до вихідної податливості δ_0 , %		
		Середн ε	СК О	Коефіцієнт т варіації, %	Середн ε	СК О	Коефіцієнт т варіації, %	Середн ε	СК О	Коефіцієнт т варіації, %
А *	20 0	4130	106 9	25,9	4,9	0,72	14,6	15,6	1,52	9,8
	17 5	13800	-	-	4,8	-	-	15,7	-	-
	15 0	19500	-	-	5,8	-	-	14,0	-	-
Б *	20 0	2830	115 4	40,7	4,9	0,26	-	15	-	-
	17 5	4000	-	-	6,3	-	-	15	-	-
	15 0	10500	-	-	5,6	-	-	15	-	-

*А – модифікований; Б - вихідний

Аналіз результатів випробувань свідчить, що на початку свого лавиноподібного зростання податливість модифікованих зразків перевищує

початкову на 14-16%, при цьому розкид початкової податливості з урахуванням усіх навантажень становить не менше $\pm 15\%$.

У зв'язку з істотним розкидом механічних властивостей клеємеханічних сполук, як граничний стан може бути прийнято не 5%, а 10% відхилення тангенсу кута нахилу дотичної до діаграми $d R_{\square} / dN$. Аналіз показав, що при цьому оцінка довговічності модифікованих з'єднань зміниться менше, ніж на 3% за навантаженням (межі витривалості – див. вираз (15)).

Для вихідних зразків прийнятий вище критерій граничного стану дає оцінку запас по навантаженню, т.к. при приблизно тому ж розкиді початкової податливості, що дорівнює $\pm 15\%$, податливість вихідних зразків у момент старту свого лавиноподібного зростання може перевищувати вихідні значення аж до 27,5%. Для проведення порівняльного аналізу, як критерій граничного стану вихідних образів прийнято 15% збільшення їхньої податливості щодо початкових значень.

Як видно з результатів випробувань, модифіковані зразки демонструють більшу кількість циклів до граничного стану у всьому дослідженому діапазоні навантажень (від 1,5 до 3,5 разів). При цьому коефіцієнт варіації кількості циклів до досягнення граничного стану модифікованих зразків в 15 рази нижче, ніж для вихідних. Зазначені позитивні ефекти досягаються за рахунок заповнення поліефірною композицією проміжків між гвинтом і склопластиком в результаті попередньої обробки зразків за методом, описаним вище. Обробка призводить до збільшення площі взаємодії армуючого гвинта, що самонарізає, і склопластику, забезпечуючи більш рівномірну передачу навантаження на армуючий гвинт і згладжене поле напруг, знижуючи вплив неоднорідності механічних властивостей ХАСП на результати випробувань.

ВИСНОВКИ

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						69
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Розроблено методику проектування кузова каркасно-панельного транспортного засобу, що має у складі композитні сендвіч-панелі та клеємеханічні з'єднання змінної товщини.

2. Запропоновано спосіб управління жорсткістю і міцністю клеємеханічних з'єднань композитних сендвіч-панелей і сталевого каркасу

3. Розроблено ентну модель нахльосткового клеємеханічного з'єднання, що відрізняється урахуванням фізичних та геометричних нелінійностей та наявністю вихідно пошкодженої області біля отворів у композиті після монтажу гвинтів.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						70
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1. Wennberg D. Multi-Functional Composite Design Concepts для Rail Vehicle Car Bodies: Докторальна Thesis / D. Wennberg. - Stockholm, 2013. - 59 p.
2. Chiaberge M. New Trends and Developments in Automotive Industry/ E. Ghassemieh; ed. by M. Chiaberge. - Rijeka: InTech Europe, 2011. - 394 p.
3. Carpenter JA Challenges and Opportunities for Automotive Composites/ JA Carpenter// Proceedings of SPE Automotive Composites Conference. - 2008. - 16 p.
4. Elmarakbi A. Advanced Composite Materials для Automotive Applications Structural Integrity and Crashworthiness/ ed. by A. Elmarakbi. - Chichester: "John Wiley & Sons", 2014. - 435 p.
5. Vadya U. Composites for Automotive Truck and Mass Transit: Matrerials, Desighn, Manufacturing/ U. Vadya. - Lancaster: "DEStech Publications", 2011. - 419 p.
6. Joost WJ Reducing vehicle weight і впроваджує нашу енергію ефективності, використовуючи вбудовані хімічні матеріали Engineering/ WJ Joost// JDM. - 2012. - vol. 64 №9. - pp. 1032-1038. DOI: 10.1007/s11837-012-0424-z
7. Кіотський протокол до Рамкової конвенції ООН про зміну клімату: офіц. текст. - Кіото, 1998. - 26 с.
8. Best Practices and Strategies for Improving Rail Energy Efficiency: final report/ Federal Railroad Administration. - Washington, 2014. - 96 p.
9. Євграфов О.М. Аеродинаміка автомобіля: навчальний посібник [Текст] / А. Н. Євграфов. - М.: «МДІУ», 2010. - 356 с.
10. Davies G. Materials for Automobile Bodies/G. Davies. - Oxford: Butterworth-Heinemann, 2012. - 416 p.
11. Heuss R. Lightweight, heavy impact/ R. Heuss, N. Muller, W. van Sintern, A. Starke, A. Tschiesner. - McKinsey & Company, 2012. - 24 p.

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						71
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

12. Barbero EJ Introduction to Composite Materials Design: Second Edition/
EJ Barbero. - Boca Raton: CRC Press, 2010. - 562 p.

13. Lee WG Next generation material for lightweight railway car body
structures: magnesium alloys/ WG Lee, J.-S. Kim, S.Ju Sun, J.-Y. Lim// Proc
IMEchE Part F: J Rail and Rapid Transit. - 2016. - pp.1-18. DOI:
10.1177/0954409716646140

14. Grasso M. Комплексний матеріал design для вантажних автомобілів
інноваційних lightweight components/ M. Grasso, A. Gallone, A. Genovese, L.
Macera, F. Penta, G. Pucillo, S. Strano// Proceedings of World Congress on
Engineering. - 2015. - Vol II. - 6 p.

15. Matsumoto M. Нові технології для wayway trains/M. Matsumoto, K.
Masai, T. Wajima// Hitachi Review. - 1999, Vol. 48, No. 3. - 134-138

16. Shin KB An experimental study of low-velocity impact responses of
sandwich panels for Korean low floor bus/ KB Shin, Lee JY, Cho SH //
Composite Structures. - 2008. - vol. 84. - pp. 228-240. DOI:
doi:10.1016/j.compstruct.2007.08.002

17. Duffy JE Auto-body Repair Technology/E. Duffy. - Boston: "Cengage
Learning", 2016. - 1053 p.

18. de Aguiar, F. Frame structure optimization for bus chassis/ F. de Aguiar,
M. Gimenez, A. Pazian, D. Spinelli// SAE Technical Paper. - 2002. - 8 p. DOI:
10.4271/2002-01-3383

19. Boonpuek P. Strength analysis of chassis structure for double deck bus/
p. boonpuek, S. Rooppakhun, S. Siwadamrongpong, S. Bua-Ngam// Advanced
Materials Research. - 2013. - vol. 658. - pp. 408-413. DOI:
10.4028/www.scientific.net/AMR.658.408

20. ReddyS. Rationale behind "stainless steel super structure" для buses/ S.
Reddy, T. Shekar // SAE Technical paper. - 2013. - 11 p. DOI: 10.4271/2013-01-
2418

21. Orlov L. Analysis of elastic-plastic mechanics of bus body construction

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						72
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

in conditions of rollover by means of simulation and real test/ L. Orlov, P. Rogov, A. Tumasov, A. Vashurind // Proc. of International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling. - 2015. - pp. 206-209

22. Liang CC Lightweight optimization of bus frame structure consideral rollover safety/ CC Liang, GN Le// WIT Transactions on Ecology and the Environment. - 2012. - vol. 155. - pp. 1185-1196. DOI: 10.2495/SC120992

23. Zhong W. Multi-objective topology i sizing optimization bus body frame / W. Zhong, R. Su, L. Gui, Z. Fan // J. Struct Multidisc Optim. - 2016. - 14 p. DOI: 10.1007/s00158-016-1431-4

24. Qin S.-J Optimization and static strength test carbody of light rail vehicle/ S.-J. Qin, Y.-Zh. Чжун, X.-Y. Yang, M.-H. Zhao Ming-hui// J. Cent. South Univ. Technol. - cho2008. - Vol. 15 (N2). - pp. 288-292. DOI: 10.1007/s11771-008-0473-1

25. US patent 5383406 Body structure for railway vehicles. - 1995. - 11 p.

26. US patent 5685229 A Railway Car Body Structures and Method of Making Them. - 1997.

27. Lohwasse D. Friction Stir Welding: From Basics to Applications/ D. Lohwasse, Z. Chen. - Cambridge: "Woodhead Publishing", 2009. - 436 p.

28. Песков В.І. Розрахунково-експериментальне порівняння жорсткості автобусних кузовів/В.І. Песков, О.В. Воронков// Наземні транспортні системи – 2013. – pp. 91-97

29. The right stuff [електронний ресурс]. – 2016. – Режим доступу:<https://www.scania.com/group/en/the-right-stuff/>

30. Тестоні О. Концепція і попередній дизайн композиції монокока для Electric City-Bus: Master Thesis / O. Testoni. - Zurich, 2015. - 88 p.

31. Grasso M. Комплексний матеріал design для вантажних автомобілів іноземних lightweight components/ M. Grasso, A. Gallone, A. Genovese, L. Macera, F. Penta, G. Pucillo, S. Strano // Proceedings of the World Congress on

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						73
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Engineering – 2015. - Vol II. - 6 p.

32. Мацак В.А. Розрахункові дослідження кузовів автобусів із різних матеріалів/ Мацак В.А., Н.Ф. Бліда// Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. - 2005. - N29. - 4 p.

33. Wennberg D. Light-Weighting Методологія в Rail Vehicle Design через Introduction of Load Carrying Sandwich Panels: Licentiate Thesis/ D. Wennberg. - Stockholm, 2011. - 28 p.

34. Kim J.-S. Manufacturing and structural safety evaluation of composite train carbody/ J.-S. Kim, S.-J. Lee, K.-B. Shin//Composite Structures. - 2007, No 78. - pp. 468-476. doi:10.1016/j.compstruct.2005.11.006

35. Kim J.-S. Natural frequency evaluation of composite train carbody with length of 23 m/ Kim J.-S. Jeong J.-Ch.// Composites Science and Technology. - 2006. - vol. 66. - pp. 2272-2283. DOI: doi:10.1016/j.compscitech.2005.11.036

36. Heller P. Hybrid body underground railway car: path towards reduced weight of rail vehicles/ P. Heller, J. Korinek, L. Triska// MM Science Journal. - 2015. - pp. 631-634

37. Harte AM A multilevel approach до optimisation з composite light rail vehicle bodyshell/ AM Harte, JF McNamara, ID Roddy// Composite Structures. - 2004. - No 63. - pp. 447-453. doi:10.1016/S0263-8223(03)00193-4

38. Cho JG Lightweight design пристосовується для ети carbody використовуючи матеріал вибір метод і розмір optimization/ JG Cho, JS Коо, HS Jung // Journal of Mechanical Science and Technology. - 2016. - vol. 30 (N2). - pp. 673-681. DOI: 10.1007/s12206-016-0123-8

39. Нін Х. thermoplastic sandwich структура дизайну і дизайну для вузла вузла дорожнього транспортного засобу/ Н. Ning, GM Janowski, UK Vaidya, G. Husman// Composite Structures. - 2007. - No 80. - pp. 82–91. DOI:10.1016/j.compstruct.2006.04.090

40. Papadakis S. Simulation of Structural Effects of Welded Frame Assemblies в Manufacturing Process Chains: Докторал Thesis/ S. Papadakis. -

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						74
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Munchen, 2008. - 260 p.

41. Thoppul Sh.D. Mechanics of mechanically fastened joints in polymer–matrix composite structures – A review/ Sh.D. Thoppul, J. Finega, RF Gibson// Composites Science and Technology. - 2009. - No. 69. pp. 301-329. DOI: 10.1016/j.compscitech.2008.09.037

42. Heslehurst RB Design and Analysis of structural joints with composite materials/ RB Heslehurst. - Lancaster: "DEStech Publications", 2013. - 459 p.

43. Puchala K. About механічні товари дизайну в металевому комплексі структури/ K. Puchala, E. Szymczyk, J. Jachimowicz// J. of KONES Powertrain and Transport. - 2012. - vol. 19, No. 3. - 10 p.

44. Caprino G. Pin-bearing strength of glass mat reinforced plastics/ G. Caprino, G. Giorleo, L. Nele, A. Squillace// Composites: Part A. – 2002. – No. 33. - pp. 779-785

45. Atas A. Subcritical damage mechanisms of bolted joints в CFRP composite laminates/ A. Atas, C. Soutis// Composites: Part B. – 2013. – No. 54. - pp. 20–27. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.04.071>

46. Tong L. Analysis and design of structural bonded joints/ L. Tong, GP Steven. - Norwell: "Kluwer Academic Publishers", 1999. - 288 p.

47. Paris FA Study of Failure criteria of fibrous composite materials/ F. Paris. - Hampton: Langley research center, 2001. - 76 p.

48. Hashin Z. Failure criteria for unidirectional fiber composite/ Z. Hashin// Trans ASME J. Applied Mechanics. -1980. - Vol. 47, No 2. - pp. 329–34

49. PP Camanho Design methodology for mechanically fastened joints in laminated composite materials/ PP Camanho, M. Lambert // Composites Science and Technology. - 2006. - No. 66. - pp. 3004-3020. DOI: doi:10.1016/j.compscitech.2006.02.017

50. Yamada SE Analysis of Laminate Strength and Its Distribution/ SE Yamada, CT Sun// J. Composite Materials. - 1978. - Vol. 12, July. - pp. 275-284

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						75
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

51. Шеппард А. А домашній зонний модель для раптової аналітики з надійно зроблених спільних дій/ А. Шеппард, Д. К. Келлі, Л. Тонг // Int. J. of adhesion and Adhesive. - 1998. - Vol. 18, No 6. - pp. 385-400

52. Carrere N. Comparison між моделями базується на розв'язаному критерії для того, щоб запобігти раптовій боротьбі з adhesively bonded joints/ N. Carrere, E. Martin, D. Leguillon// Engineering Fracture Mechanics. - 2015. - Accepted manuscript. - 29 p.
DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.engfracmech.2015.03.004>

53. Pisano AA Peak load prediction of multi-pin joints FRP laminates by limit analysis/ AA Pisano, P. Fuschi, D. De Domenico // Composite Structures. - 2013. - No. 96. - pp. 763-772.
DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.09.038>

54. Whitney JM Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations/ JM Whitney, RJ Nuismer// J. Composite Materials. - 1974. - No. 8. - pp. 253–65

55. Yan UM Response and failure of composite plates with bolt-filled hole [DOT/FAA/AR-97/85]/ HT Sun, WD Wei, FK Chang. - Washington: Office of Aviation Research, 1998.

56. Banea MD Adhesively bonded joints in composite materials: an overview/ MD Banea, LFM da Silva// Proc. IMechE: J. Materials: Design and Applications. - 2009. - Vol. 223, Part L. - pp. 18 p. DOI: 10.1243/14644207JMMDA219

57. Abdel Wahab MM Fatigue в Adhesively Bonded Joints: A Review/ MM Abdel Wahab// ISRN Materials Science. - 2012. - Vol. 2012. - 26 p.

58. Kruse T. Bonding з CFRP primary aerospace structures: overview в технології статуї в контексті здійсненого аспекти умов addressing needs for development/ T. Kruse, T. Körwien, S. Heckner, M. Geistbeck// Proceedings of the 20- th international conference on composite materials (ICCM 20). – 2015, Copenhagen

59. Sarrado C. На validity linear elastic fracture mechanics methods to

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						76
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

measure the fracture toughness adhesive joints/ C. Sarrado, A. Turon, J. Costa, J. Renart // Int. J. Solids Structures. – 2016. – No 81. – pp. 110–116

60. Rice JR A path independent integrated and approximate analysis of strain concentration by notches and cracks/ JR Rice// Applied Mechanics. - 1968. - Vol. 35, No 2. - pp. 379–386

61. Sarrado C. An experimental analysis of fracture behavior of composite bonded joints in terms of cohesive laws/ C. Sarrado, A. Turon, J. Costa, J. Renart // Composites: Part A. – 2016. – No 90. – pp 234–242

62. Park K. Cohesive zone models: critical review of tractionseparation relationships across fracture surfaces/ K. Park, G.Paulino// Appl. Mech. Rev. - 2011. - vol. 64, No 6

63. de Moura MFSF Fatigue / fracture characterization of composite bonded joints in mode I, mode II and mixed-mode I + II / MFSF de Moura, JPM Gonçalves, MV Fernandez // Composite Structures. 2016. - No 139. - pp. 62–67

64. Neumayer J. Ось explicit cohesive element combining cohesive failure of adhesive and delamination failure in composite bonded joints/ J. Neumayer, H. Koerber, R. Hinterhölzl// Composite Structures. – 2016. – No 46. – pp. 75–83. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.compstruct.2016.03.009>

65. Tong L. З'ясував, що ймовірність критерію до того, як підтвердити основу з повноцінними зусиллями/J. of Reinforced Plastics and Composites. - 1997. - Vol. 16, No 8. - pp. 698-713

66. Шеппард А. А домашній зонний модель для раптової аналітики з надійно зроблених спільних дій/ А. Шеппард, Д. К. Келлі, Л. Тонг // Int. J. of adhesion and Adhesive. - 1998. - Vol. 18, No 6. - pp. 385-400

67. Merkblatt DVS 1618 Elastisches Dickschichtkleben im Schienenfahrzeugbau. - Berlin, 2002

68. Mooney M. A theory of large elastic deformation/ M. Mooney// J. Journal of Applied Physics. - 1940. - Vol. 11, No 9. - pp. 582-592.

69. Gültekin K. Ефекти графеній наноструктури Reinforcement на

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						77
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Adhesive Method i Graphene Reinforcement Ratio на Failure Load в Adhesively Bonded Joints/ K. Gültekin, S. Akpınar, A. Gürses, Z. Eroglu, S. Cam. , Z. Keskin, A. Ozel// Composites Part B. – 2016. – Accepted Manuscript. - 16 p. DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.05.039

70. Sadigh MAS Investigating ефекти відхиленої графені oxide additive на міцний кінець adhesively bonded joints в різних extensions rates/ MAS Sadigh, G. Marami // Materials and Design. – 2016. – No 92. – pp. 36–43

71. Ranta D. Toughened epoxy adhesive modified with acrylate based liquid rubber/ D. Ranta, AK Banthia // j. Polym. Int. - 2000. - No 49. - pp. 281-287.

72. Kinloch AJ Діяльність silica nanoparticles and rubber particles on toughness of multiphase thermosetting epoxy polymers/ AJ Kinloch, RD Mohammed, AC Taylor// J. Material Science Letters. - 2005. Tserpes KI Crack stopping в композиті adhesively bonded joints через corrugation/ KI Tserpes, G. Peikert, IS Floros// Theoretical and Applied Fracture Mechanics. - 2015. - Accepted Manuscript. - 16 p. DOI:<http://dx.doi.org/10.1016/j.tafmec.2015.10.003>

73. Вільнав Ж.-Ж. Клейові сполуки/Ж.-Ж. Вільнав; під. заг. ред. Г.В. Малишева; [Пер. із фр. Л.В. Синьогубовий]. - М.: Техносфера, 2007. - 381 с.

74. Baldan A. Adhesively-bonded joints and repairs in metallic alloys, polymers and composite materials: adhesives, adhesion theories and surface pretreatment/ A. Baldan // J. Material Science. - 2004. - Vol. 39, No 1. - pp. 1–49

					ДРБМТВА 23.20105.000. ПЗ	Арк.
						78
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		