

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

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

«Вплив процесу старіння на структуру та властивості
цинкового сплаву деталей системи пасивної безпеки
автомобіля»

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

Шифр **КвРМТВА. 22137.01.06.00**

Виконав студент 4 курсу група МТВА-22-1


Підпис

Максим КАТРУК

Керівник к.т.н., доцент каф. ТАМ


Підпис

Сергій ПОСОНСЬКИЙ

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

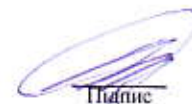

Підпис

Олег БАБАК

До захисту допускаю:
Завідувач кафедри ТАМ

11.06.2026 р

Дата


Підпис

Олександр ДИХА

Хмельницький, 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

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

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ТАМ


Диха О.В.
15.04 2026 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Катруку Максиму Олександровичу

Прізвище, ім'я, по батькові

1. Тема роботи: **Вплив процесу старіння на структуру та властивості цинкового сплаву деталей системи пасивної безпеки автомобіля.**

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

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

Затверджено наказом університету від 20.01.2026 р. № 7 (Д 14)

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 16.06.2026 р.

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

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

1) Автомобільна безпека.

2) Методика аналізу матеріалів.

3) Аналіз результатів зразків роликів ременя безпеки.

4 Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (презентація):

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

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

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

7. Дата видачі завдання 15.04 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

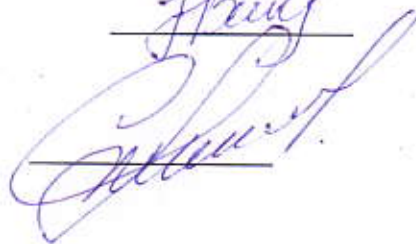
№ з/п	Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1	Автомобільна безпека	28.05.2026	вик
2	Методика аналізу матеріалів	8.06.2026	вик
3	Аналіз результатів зразків роликів ременя безпеки	12.06.2026	вик
4	Висновки.	14.06.2026	вик
5	Захист дипломної роботи	16.06.2026	

Студент



Максим КАТРУК

Керівник роботи



Сергій ПОСОНСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

Судент групи МТВА-22-1: Катрук М.О.

Структура та обсяг пояснювальної записки. Кваліфікаційна робота на тему «Вплив процесу старіння на структуру та властивості цинкового сплаву деталей системи пасивної безпеки автомобіля» складається зі вступу, трьох розділів, висновків, списку використаних джерел, який налічує 16 найменувань, розміщених на 2 сторінках, та 1 додатку розміщеного на 12 сторінках. Роботу викладено на 63 сторінках, з них 56 сторінки основного тексту, на яких розміщено 19 рисунків і 9 таблиць.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню мікроструктури та механічних властивостей цинкового сплаву Zamak 5, що використовує в деталях котушки зміну безпеки автомобіля, а також аналізує фактори, які впливають на його руйнування в умовах старіння та знижених температур.

Актуальність теми обумовлена забезпеченням надійності роботи елементів системи пасивної безпеки автомобіля, в тому числі механізмів зміни безпеки, які повинні стабільно функціонувати в широких режимах і протягом тривалого терміну експлуатації. Відомо, що цинкові літі сплави, які широко застосовуються для виготовлення корпусних і функціональних деталей механізмів ременів безпеки, можуть змінити його механічні властивості внаслідок старіння, мікроструктурних перетворень і наявності дефектів літання, що може призвести до крихкого руйнування.

У роботі проведено аналіз матеріалів, які використані в елементах системи пасивної безпеки автомобіля, відзначено особливості застосування цинкових сплавів у деталях котушки зміни безпеки та виконано дослідження мікроструктурних зразків. Для аналізу структури матеріалу застосовуються методи світлової та сканованої електронної мікроскопії, а також вимірювання мікротвердості. Досліджено морфологію поверхні злама, характер розподілу фази, наявність осадів, пористість та інші дефекти лиття.

Ключові слова: ПАСИВНА БЕЗПЕКА АВТОМОБІЛЯ, РЕМІНЬ БЕЗПЕКИ, ЗАМАК 5, МІКРОСТРУКТУРА, СТАРІННЯ СПЛАВІВ, КРИХКЕ РУЙНУВАННЯ, ПОРИСТІСТЬ, МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ.

Примітка

вик

вик

вик





вик

КАТРУК

НСЬКИЙ

ЗМІСТ

ВСТУП	6
1 АВТОМОБІЛЬНА БЕЗПЕКА	10
1.1 Активна безпека автомобіля.	10
1.2 Пасивна безпека автомобіля.	16
1.2.1 Призначення та принципи пасивної безпеки.	16
1.2.2 Ремені безпеки.	18
1.2.3 Подушки безпеки.	21
1.2.3 Деформаційні зони кузова.	22
1.3 Матеріали елементів системи безпеки автомобіля.	23
1.3.1 Матеріали ременів безпеки.	24
1.3.2 Матеріали подушок безпеки.	25
1.3.3 Матеріали натягувачів ременів і піротехнічних пристроїв.	25
1.3.4 Матеріали елементів, що поглинають енергію удару.	26
1.3.5 Матеріали допоміжних елементів пасивної безпеки.	26
1.4 Цинкові литі сплави механізмів котушки ременя безпеки.	27
1.4.1 Цинковий сплав Zamak 5.	32
1.4.2 Вплив температури на властивості матеріалу.	32
1.4.3 Крихке руйнування.	34
1.4.4 Старіння сплаву.	36
2 МЕТОДИКА АНАЛІЗУ МАТЕРІАЛІВ	39
2.1 Методика механічних випробувань.	39
2.2 Мікроскопія зразків.	41
2.2.1 Світлова мікроскопія.	41
2.2.2 Скануюча електронна мікроскопія.	44

КВРМТВА. 22137.01.06.00				
Зм	Арк	№ Докум.	Підпис	Дата
Виконав		Катрук		
Перевір.		Посонський		
Н.контр.		Бабак		
Затвер.		Диха		
Вплив процесу старіння на структуру та властивості цинкового сплаву деталей системи пасивної безпеки автомобіля				Літера Арквш Арквшів
				4 63
ХНУ, МТВА-22-1				

2.3	Обладнання для аналізу матеріалів.	46
3	АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗРАЗКІВ РОЛИКІВ РЕМЕНЯ БЕЗПЕКИ	52
	ВИСНОВКИ	60
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	61
	ДОДАТКИ	63

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

ВСТУП

Забезпечення безпеки дорожнього руху є одним із ключових завдань сучасного автомобілебудування. Незважаючи на постійне вдосконалення конструкції транспортних засобів, впровадження систем допомоги водієві та підвищення рівня контролю дорожньої обстановки, дорожньо-транспортні пригоди залишаються однією з основних причин травматизму та смертності у світі. У зв'язку з цим особливого значення набуває підвищення ефективності систем безпеки автомобіля, які здатні мінімізувати наслідки аварійних ситуацій і забезпечити максимальний захист водія та пасажирів.

Системи безпеки транспортного засобу традиційно поділяють на активні та пасивні. Активна безпека спрямована на запобігання виникненню аварійної ситуації, тоді як пасивна безпека реалізує захист людини безпосередньо під час зіткнення. До основних елементів пасивної безпеки належать ремені безпеки, подушки безпеки, енергопоглинальні елементи кузова, підголівники, а також конструктивні вузли, що забезпечують правильну роботу цих систем. Серед них особливе місце займає катушка ременя безпеки, яка забезпечує фіксацію та контроль натягу ременя, а також миттєве блокування при аварійному навантаженні.

Ефективність функціонування систем пасивної безпеки значною мірою залежить не лише від їх конструкції, але й від матеріалів, з яких виготовлені їхні елементи. Матеріали повинні забезпечувати поєднання високої міцності, жорсткості, зносостійкості, стабільності геометричних розмірів, технологічності у виробництві та надійності роботи в широкому діапазоні температур. Особливо складні вимоги висуваються до матеріалів деталей, що виготовляються методом лиття під тиском і працюють в умовах динамічних навантажень, перепадів температур та тривалого експлуатаційного старіння.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
						6
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Одними з найпоширеніших матеріалів для виготовлення корпусних і функціональних елементів механізмів ременів безпеки є цинкові литі сплави типу Zamak. Вони характеризуються доброю ливарною здатністю, високою точністю відливок, достатньою міцністю та можливістю виготовлення складних деталей із мінімальною механічною обробкою. Завдяки цим властивостям сплави Zamak широко застосовуються у виробництві корпусів, фіксаторів, напрямних, кронштейнів та інших елементів котушки ременя безпеки.

Разом із тим, експлуатація деталей із цинкових сплавів у складних кліматичних умовах може супроводжуватися зниженням їх механічних характеристик. Відомо, що деякі сплави системи Zn–Al–Cu–Mg, зокрема Zamak 5, можуть демонструвати підвищену крихкість при знижених температурах, а також зміну структури та властивостей у процесі тривалого старіння. Ці явища пов'язані з мікроструктурними перетвореннями, дифузійними процесами, утворенням і ростом осадів, змінами стану меж зерен, а також із наявністю технологічних дефектів лиття, таких як пористість або неметалеві включення.

Особливу небезпеку становить крихке руйнування матеріалу, яке може відбуватися без значної пластичної деформації і, відповідно, без попереджувальних ознак. У разі низькотемпературного навантаження або динамічного впливу це може призвести до раптового виходу з ладу елементів механізму ременя безпеки, що прямо впливає на ефективність захисту пасажирів під час аварії. Тому дослідження причин зниження міцності цинкових сплавів, особливо в умовах старіння та дії низьких температур, є важливим науково-практичним завданням.

Суттєвий вплив на експлуатаційні характеристики литих сплавів мають структурні особливості матеріалу, зокрема розмір зерна, характер розподілу легуючих елементів, наявність когерентних і некогерентних частинок, пористість та дефекти кристалізації. Мікроструктура визначає механізм

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		7

деформації та руйнування матеріалу, тому її детальне вивчення є необхідною умовою оцінки надійності деталей. Для цього широко застосовуються методи металографічного аналізу, світлової та скануючої електронної мікроскопії, які дозволяють досліджувати структуру матеріалу на різних масштабних рівнях - від загальної морфології зерен до топографії поверхні зламу та локального хімічного складу.

Крім мікроструктурних факторів, на довговічність деталей значною мірою впливають технологічні умови виробництва. При литті під тиском можуть виникати газова та усадкова пористість, сегрегація елементів, внутрішні напруження та інші дефекти, які послаблюють матеріал і створюють концентрації напружень. Контроль технологічних параметрів, оптимізація складу сплаву та керування процесами кристалізації є важливими напрямками підвищення якості відливок.

Таким чином, дослідження властивостей матеріалів, що застосовуються у вузлах пасивної безпеки автомобіля, є актуальним як з наукової, так і з практичної точки зору. Воно дозволяє встановити причини руйнування деталей, оцінити вплив мікроструктури та умов експлуатації на їх надійність, а також розробити рекомендації щодо підвищення міцності та довговічності конструкційних елементів.

Актуальність роботи зумовлена необхідністю забезпечення стабільної роботи елементів систем пасивної безпеки автомобіля в умовах низьких температур, тривалого старіння матеріалу та дії динамічних навантажень. Особливо важливим є вивчення механізмів крихкого руйнування литих цинкових сплавів та встановлення факторів, що визначають їх структурну стабільність.

Практичне значення роботи полягає у можливості використання отриманих результатів для підвищення надійності елементів пасивної безпеки автомобіля, удосконалення складу сплавів, оптимізації технології лиття та прогнозування експлуатаційної довговічності деталей.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		8

Метою роботи є дослідження матеріалів елементів систем пасивної безпеки автомобіля, зокрема деталей катушки ременя безпеки, з метою визначення впливу старіння, низьких температур та мікроструктурних дефектів на механічні властивості цинкового сплаву Zamak.

Для досягнення мети роботи були визначені такі завдання:

1. Провести аналіз сучасних систем безпеки автомобіля, зокрема конструкції ременів та катушок, а також матеріалів, що застосовуються для їх виготовлення.

2. Провести аналіз механізму старіння, впливу легуючих елементів та температури на міцність і крихкість цинкового сплаву Zamak .

3. Виконати дослідження мікроструктури, морфології поверхні зламу, локального хімічного складу та механізмів руйнування матеріалу деталей катушки ременя безпеки.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
						9
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 АВТОМОБІЛЬНА БЕЗПЕКА

1.1 Активна безпека автомобіля.

Активна безпека автомобіля є однією з ключових складових загальної системи забезпечення безпеки дорожнього руху. Вона спрямована на запобігання виникненню аварійних ситуацій, зменшення ймовірності зіткнення та підвищення контролю водія над транспортним засобом у різних умовах експлуатації. На відміну від пасивної безпеки, яка спрямована на мінімізацію наслідків ДТП, активна безпека діє до моменту виникнення небезпечної події, допомагаючи водію уникнути її.

У сучасних автомобілях активна безпека реалізується через комплекс технічних систем, що контролюють динаміку руху, стан навколишнього середовища, поведінку водія та можливі ризики. До них належать електронні системи стабілізації, антиблокувальні гальмівні системи, адаптивне освітлення, асистенти утримання смуги руху, системи попередження про зіткнення, адаптивний круїз-контроль, системи нічного бачення та інші інтелектуальні рішення.

Розвиток активної безпеки став можливим завдяки стрімкому прогресу в галузях сенсорних технологій, цифрової обробки сигналів, штучного інтелекту та мехатроніки. Сучасні автомобілі оснащуються радарми, камерами, лідарами та ультразвуковими датчиками, які формують цифрову модель дорожнього середовища та дозволяють системам керування оперативно реагувати на зміни обстановки.

Вагомий внесок у розробку сучасних систем активної безпеки зробила компанія Autoliv [1], яка спеціалізується на створенні комплексних рішень для підвищення безпеки автомобілів. Серед таких рішень особливе місце займають адаптивний круїз-контроль і системи нічного бачення, що значно розширюють можливості водія щодо контролю дорожньої ситуації.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
						10
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Сутність та принципи активної безпеки. Активна безпека базується на принципі постійного моніторингу та прогнозування ризиків. Її функціонування включає кілька взаємопов'язаних етапів:

1. Збір інформації - датчики та камери фіксують параметри руху автомобіля та навколишнього середовища.

2. Обробка даних - електронні блоки керування аналізують інформацію, визначають потенційні загрози.

3. Попередження водія - звукові, візуальні або тактильні сигнали інформують про небезпеку.

4. Автоматичне втручання - за необхідності система може самостійно змінити швидкість, напрямок або режим руху.

Основною метою активної безпеки є зменшення людського фактора, який залишається головною причиною більшості дорожньо-транспортних пригод. Інтелектуальні системи здатні реагувати швидше за людину та працювати безперервно, незалежно від рівня втоми або уважності водія.

Основні складові систем активної безпеки. Сучасні автомобілі оснащуються цілою низкою систем активної безпеки, які працюють у взаємодії: антиблокувальна система гальм (ABS); електронна система стабілізації (ESP); система контролю тяги; автоматичне екстрене гальмування; асистенти утримання смуги руху; адаптивні системи освітлення; системи контролю «сліпих зон»; адаптивний круїз-контроль; системи нічного бачення.

Кожна з цих систем виконує власну функцію, однак разом вони формують єдину інтелектуальну мережу, здатну забезпечити комплексний захист водія та пасажирів.

Адаптивний круїз-контроль як елемент активної безпеки.

Адаптивний круїз-контроль (Adaptive Cruise Control, ACC) є розвитком традиційного круїз-контролю, який підтримує задану швидкість руху автомобіля. На відміну від звичайного круїз-контролю, адаптивна система не

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

лише утримує швидкість, але й автоматично регулює її залежно від дорожньої ситуації, зокрема від відстані до транспортного засобу попереду.

Принцип роботи системи АСС.

Основою функціонування адаптивного круїз-контролю є радар або камера, встановлені в передній частині автомобіля, рис. 1.1. Вони визначають [1]:

- 1) відстань до об'єкта попереду;
- 2) відносну швидкість руху;
- 3) напрямок руху транспортних засобів.

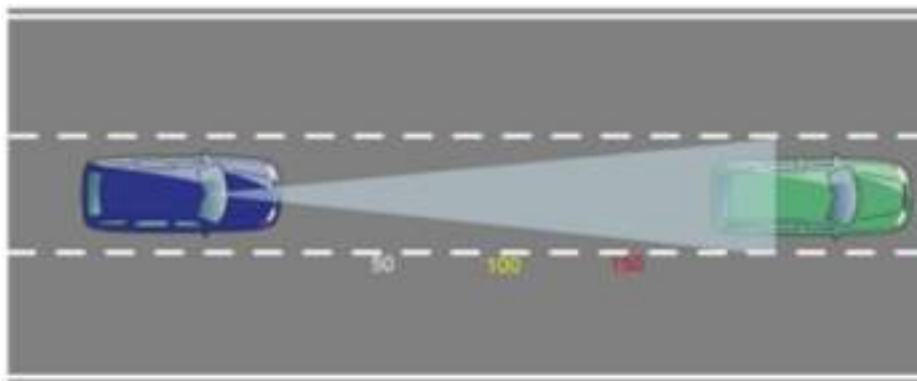


Рисунок 1.1 – Адаптивний круїз-контроль.

Електронний блок керування обробляє ці дані та порівнює їх із заданими параметрами дистанції. Якщо автомобіль попереду сповільнюється, система автоматично зменшує швидкість, використовуючи гальмування двигуном або робочою гальмівною системою. Коли дорога звільняється, автомобіль знову набирає встановлену швидкість.

Сучасні системи АСС можуть: підтримувати задану дистанцію; повністю зупинити автомобіль у заторі; відновлювати рух після зупинки; працювати у поєднанні з системою утримання смуги; прогнозувати поведінку інших учасників руху.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

Таким чином, адаптивний круїз-контроль не лише підвищує комфорт водіння, але й значно зменшує ризик зіткнення через неуважність або неправильну оцінку дистанції.

Основні переваги: зменшення втоми водія; підвищення безпеки на автомагістралях; зниження ризику наїзду ззаду; оптимізація витрати пального; плавність руху.

Особливо ефективною система є під час тривалих поїздок або руху в умовах інтенсивного трафіку.

Попри високу ефективність, адаптивний круїз-контроль має певні обмеження: залежність від погодних умов (дощ, сніг, туман); складність розпізнавання нерухомих об'єктів; необхідність постійного контролю водієм; обмежена ефективність у складних міських умовах.

Тому АСС розглядається як допоміжна, а не повністю автономна система [2].

Системи нічного бачення. Однією з найбільш інноваційних технологій активної безпеки є система нічного бачення. Її призначення - розширити зону видимості водія в умовах недостатнього освітлення, коли стандартні фари не забезпечують достатньої інформації про дорожню обстановку.

Проблема обмеженої видимості. За статистикою, значна частина ДТП відбувається саме вночі, хоча інтенсивність руху в цей час менша. Основними причинами є [3]:

- 1) обмежена дальність освітлення фар;
- 2) осліплення зустрічними автомобілями;
- 3) погана видимість пішоходів та тварин;
- 4) зниження уваги водія.

Системи нічного бачення дозволяють вирішити ці проблеми, використовуючи інфрачервоне випромінювання.

Принцип дії. Система нічного бачення використовує інфрачервону камеру, яка фіксує теплове випромінювання об'єктів. Оскільки живі істоти

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

мають вищу температуру, ніж навколишнє середовище, вони чітко виділяються на зображенні.

Отримана інформація передається на дисплей панелі приладів, рис 1.2, або проєктується на лобове скло. У деяких системах застосовується автоматичне розпізнавання пішоходів і тварин із попередженням водія [1].



Рисунок 1.2 – Система нічного бачення.

Типи систем нічного бачення. Розрізняють два основних типи:

1. Пасивні - фіксують природне теплове випромінювання.
2. Активні - використовують інфрачервоне підсвічування дороги.

Пасивні системи ефективніші для виявлення живих об'єктів, тоді як активні краще відображають дорожню інфраструктуру.

Переваги використання наступні: збільшення дальності виявлення об'єктів; раннє попередження про небезпеку; підвищення безпеки на заміських дорогах; зниження навантаження на зір водія.

Система може виявляти об'єкти на значно більшій відстані, ніж стандартні фари, що дає водієві більше часу для реагування.

Недоліки та обмеження: висока вартість; складність інтеграції; можливі помилкові спрацювання; залежність від температурного контрасту.

Попри це, технологія продовжує активно розвиватися та впроваджується в автомобілі преміального сегмента.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

Інтеграція систем активної безпеки. Сучасний підхід до автомобільної безпеки передбачає інтеграцію різних систем у єдину інформаційну мережу.

Наприклад:

- 1) адаптивний круїз-контроль працює разом із системою екстреного гальмування;
- 2) нічне бачення передає дані системі попередження про зіткнення;
- 3) камери та радары формують спільну картину дорожнього середовища.

Така інтеграція підвищує точність оцінки ризиків і забезпечує більш ефективне реагування.

Перспективи розвитку активної безпеки. Подальший розвиток активної безпеки пов'язаний із переходом до автономного керування транспортними засобами. Основні напрямки: використання штучного інтелекту; вдосконалення сенсорних систем; обмін даними між автомобілями; цифрові карти високої точності; прогнозування поведінки учасників руху.

Очікується, що в майбутньому системи активної безпеки зможуть повністю контролювати рух автомобіля в складних умовах.

Активна безпека автомобіля є ключовим фактором зниження аварійності та підвищення ефективності транспортних систем. Сучасні технології дозволяють не лише попереджати водія про небезпеку, але й автоматично втручатися в процес керування.

Адаптивний круїз-контроль забезпечує підтримання безпечної дистанції та зменшує ризик зіткнень, тоді як системи нічного бачення розширюють можливості сприйняття дорожньої обстановки в темний час доби. Їх інтеграція з іншими електронними системами створює комплексний захист, що наближає автомобіль до повної автономності.

Подальший розвиток технологій активної безпеки стане важливим кроком у формуванні інтелектуальних транспортних систем майбутнього та значно підвищить рівень безпеки дорожнього руху.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		15

1.2 Пасивна безпека автомобіля.

Пасивна безпека автомобіля є складовою загальної системи автомобільної безпеки та спрямована на зменшення тяжкості наслідків дорожньо-транспортних пригод, якщо уникнути зіткнення вже неможливо. На відміну від активної безпеки, яка запобігає аваріям, пасивна безпека починає діяти в момент удару або одразу після нього, захищаючи водія та пасажирів від травм.

Основною метою пасивної безпеки є зниження перевантажень, які діють на тіло людини під час різкого гальмування або зіткнення, а також запобігання контакту пасажирів із жорсткими елементами конструкції автомобіля. Це досягається завдяки застосуванню спеціальних конструктивних елементів кузова, систем утримання пасажирів, енергопоглинальних матеріалів і електронних засобів керування захисними пристроями.

Значний внесок у розвиток сучасних систем пасивної безпеки зробила компанія Autoliv [1] - один із провідних світових виробників автомобільних систем захисту. За оцінками виробника, їхні рішення щороку допомагають зберегти десятки тисяч життів завдяки ефективній роботі ременів безпеки, подушок безпеки та інших елементів систем захисту.

1.2.1 Призначення та принципи пасивної безпеки.

Під час дорожньо-транспортної пригоди автомобіль і людина, що перебуває в ньому, зазнають різкого уповільнення. Відповідно до законів механіки, тіло пасажира продовжує рухатися за інерцією, що може призвести до удару об кермо, панель приладів або інші частини салону.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		16

Пасивна безпека автомобіля ґрунтується на кількох ключових принципах:

1. Обмеження переміщення тіла пасажира - застосування ременів безпеки та утримувальних систем.
2. Поглинання енергії удару - використання деформаційних зон кузова.
3. Збільшення часу дії ударного навантаження - зменшення пікових перевантажень.
4. Захист життєво важливих частин тіла - застосування подушок безпеки.
5. Збереження життєвого простору салону - підвищення жорсткості каркаса кузова.

Таким чином, пасивна безпека спрямована не на усунення причин аварії, а на мінімізацію її фізичних наслідків для людини.

До систем пасивної безпеки також належать: енергопоглинальні кермові колонки; підголівники, що запобігають травмам ший; ламіноване безпечне скло; дитячі утримувальні системи; автоматичне розблокування дверей після аварії; система відключення подачі пального.

Кожен із цих елементів спрямований на зменшення ризику травм або полегшення евакуації пасажирів після аварії.

Взаємодія активної та пасивної безпеки. Сучасний автомобіль не розглядає активну та пасивну безпеку окремо. Вони працюють як єдина інтегрована система.

Наприклад: система екстреного гальмування зменшує швидкість перед ударом; ремені натягуються ще до зіткнення; подушки безпеки розгортаються з урахуванням сили удару.

Такий підхід значно підвищує ефективність захисту.

Пасивна безпека автомобіля є ключовим елементом захисту водія та пасажирів у разі дорожньо-транспортної пригоди. Вона базується на

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

принципах обмеження руху тіла, поглинання енергії удару та збереження життєвого простору салону.

Основними складовими пасивної безпеки є ремені безпеки, подушки безпеки та деформаційні зони кузова, які працюють у комплексі та значно знижують ризик тяжких травм [2, 3]. Подальший розвиток технологій спрямований на вдосконалення інтеграції систем і підвищення їх адаптивності до умов аварії.

Таким чином, пасивна безпека є невід'ємною складовою сучасного автомобіля та відіграє вирішальну роль у збереженні життя і здоров'я учасників дорожнього руху.

1.2.2 Ремені безпеки.

Ремені безпеки є найпростішим і водночас найефективнішим засобом пасивного захисту. Вони утримують пасажира на місці під час різкого гальмування або удару та запобігають його неконтрольованому переміщенню в салоні.

Конструкція та принцип роботи. Найпоширенішим є триточковий ремінь безпеки, який фіксує тіло у трьох напрямках - через плече та тазову частину. Така конструкція дозволяє: рівномірно розподілити навантаження; зменшити ризик травм внутрішніх органів; обмежити переміщення верхньої частини тіла [4].

Сучасні ремені оснащуються додатковими елементами:

- 1) інерційними катушками, що автоматично блокуються при різкому уповільненні;
- 2) піротехнічними натягувачами, які миттєво підтягують ремінь;
- 3) обмежувачами зусилля, що зменшують тиск на грудну клітку.

Дослідження показують, що використання ременів безпеки знижує ризик серйозних травм у разі аварії на 60-70% та ризик смерті на 45% [5].

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

Ремені безпеки знижують ризик травмування кількома способами. Ремінь безпеки допомагає перемістити тіло в правильне положення, щоб захист подушок безпеки був максимальним. Ремені безпеки розроблені таким чином, щоб мати можливість розтягуватися, щоб поглинати енергію, яка діє на тіло. Центральним елементом ременя безпеки є шпindelний ролик. Ремінь кріпиться до шпindelного ролика, а всередині ролика є пружина, яка хоче відтягнути ремінь назад. Перший у світі ролик ременя був винайдений компанією Autoliv у 1968 році [1]. Більшість роликів ременя мають обмежувачі зусилля. Вони зменшують ризик травм ребер, спричинених високим тиском ременя під час зіткнення. Обмежувач зусилля підтримує зусилля на контрольованому рівні. За допомогою них невелика частина ременя витягується, забезпечуючи більш гнучкий рух під час зіткнення.

Перше, що відбувається, коли датчик автомобіля виявляє зіткнення, це попереднє натягування ременя в котушках ременя, рис. 1.3, які мають попередній натягувач. Важливо, щоб ремінь щільно прилягав до тіла для найкращого захисту. Попередній натяг важливий, оскільки лише кілька міліметрів суттєво впливають на те, як рухається тіло в автомобілі. Попередній натяг притягує ремінь ближче до тіла, що може бути корисним, якщо, наприклад, ремінь недостатньо натягнутий або якщо людина одягнена в товсту куртку. Коли датчики автомобіля виявляють зіткнення, система активується зарядом, який змушує кілька кульок рухатися по траєкторії, ці кульки потім приводять в рух ролик, який натягує ремінь. Коли ремінь попередньо натягнутий, тіло починає рухатися вперед відносно автомобіля, який гальмує. Щоб зробити цей рух якомога м'якшим для тіла, система ременів поглинає енергію. Рух також залежить від людини, яка сидить на сидінні, і від того, чи має ремінь додаткове обмеження зусилля. Ремені безпеки з обмеженням зусилля оснащені одним або двома торсіонними стрижнями, конфігурація яких залежить від моделі автомобіля. Потрібні різні зусилля залежно від того, чи це дорослий чоловік, чи шестирічна дитина. Це

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

дослідження зосереджено на роликах ременя з двома торсіонними стрижнями. Один стрижень з малим діаметром називається нижнім, а один з більшим діаметром називається верхнім стрижнем. Під час зіткнення ці стрижні поглинають силу від тіла. Стрижні скручуються та деформуються. Використовуються різні типи роликів ременя залежно від того, чи знаходяться вони на передньому чи задньому сидінні, а також від типу автомобіля. Адаптивні ролики ременя з обмеженням зусилля (РОЗ) використовуються в багатьох випадках для передніх сидінь, а прогресивні ролики ременя з обмеженням зусилля (РОЗ) використовуються в багатьох випадках для задніх сидінь [6].



Рисунок 1.3 – Котушка ременя безпеки перед встановленням в автомобіль.

Для людини на передньому сидінні спочатку потрібна велика сила, яка потім зменшується та вирівнюється. Зменшуючи силу, ременю витягується більше, і він повторює рух, щоб м'якше зачепити тіло. Якби стрижні не були оточені торсіонною трубкою (див. рисунок 1.4), нижня тяга завжди деформувалася б першою. Щоб запобігти цьому, висока тяга кріпиться до торсіонної трубки, яка, у свою чергу, фіксується у шпинделі. Таким чином, першою деформується велика тяга. Відпускаючи колодки, торсіонна трубка знімається з шпинделя, і сила потім переходить до нижньої тяги.

									Арк.
									20
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	КвРМТВА. 22137.01.06.00				

Перемикаючись між стрижнями, можна контролювати силу. Це запобігає блокуванню ременя та таким чином зменшує тиск на грудну клітку [6].



Рисунок 1.4 – Компоненти котушки для ременя РОЗ.

Торсійна трубка затискається до верхньої тяги за допомогою канавок з внутрішньої сторони, які входять у зубці верхньої тяги. Там, де вони утримуються разом, на торсіонну трубку діє велика концентрована сила. Для перемикання між верхньою та нижньою тягами потрібен піротехнічний заряд. Цей заряд активується по-різному залежно від ситуації зіткнення. Піротехнічний заряд переміщує кільце, яке утримує колодки, що кріплять торсіонну трубку до шпинделя. Коли вони звільняються, поглинання сили перемикається з верхнього на нижній шток [6].

1.2.3 Подушки безпеки.

Подушки безпеки, рис. 1.5, призначені для пом'якшення удару тіла пасажирів об елементи салону під час зіткнення. Вони працюють у поєднанні з ременями безпеки та забезпечують додатковий рівень захисту [7].

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		21

Система подушок безпеки включає: датчики прискорення; електронний блок керування; газогенератор; мішок подушки [7].



Рисунок 1.5 – Спрацювання подушок безпеки.

При фіксації удару блок керування активує газогенератор, який за частки секунди наповнює подушку газом. Подушка розгортається між пасажиром і конструкцією автомобіля, зменшуючи силу удару.

Сучасні автомобілі можуть мати різні види подушок [7]:

- 1) фронтальні;
- 2) бічні;
- 3) колінні;
- 4) шторки безпеки;
- 5) центральні між пасажирами.

Комплексне використання різних типів подушок дозволяє забезпечити захист при різних типах зіткнень.

1.2.3 Деформаційні зони кузова.

Важливим елементом пасивної безпеки є конструкція кузова автомобіля. Сучасні транспортні засоби проєктуються таким чином, щоб частина енергії удару поглиналася за рахунок контрольованої деформації.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		22

Принцип дії. Передня та задня частини автомобіля мають спеціальні деформаційні зони, які: поступово руйнуються під час удару; зменшують швидкість передачі навантаження; знижують перевантаження пасажирів.

При цьому салон автомобіля виконує роль жорсткої безпечної клітини, що зберігає життєвий простір для людей, рисунок 1.6.



Рисунок 1.5 – Деформаційні зони автомобіля.

Переваги конструкції: зменшення сили удару; зниження ризику травм внутрішніх органів; підвищення виживаності при серйозних ДТП.

1.3 Матеріали елементів системи безпеки автомобіля.

Ефективність систем безпеки автомобіля значною мірою визначається не лише їх конструкцією, але й матеріалами, з яких виготовлені їхні елементи. Матеріали повинні відповідати суворим вимогам щодо міцності, енергопоглинання, термостійкості, довговічності, надійності та стабільності властивостей у широкому діапазоні температур і навантажень.

Елементи пасивної безпеки, зокрема ремені безпеки, подушки безпеки, газогенератори, деформаційні елементи кузова та механізми натягувачів, працюють в умовах екстремальних навантажень - від миттєвих перевантажень до високих температур і тисків. Тому для їх виготовлення застосовують спеціальні синтетичні волокна, високоміцні сталі, алюмінієві сплави, полімерні композити та інші інженерні матеріали [8].

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
						23
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3.1 Матеріали ременів безпеки.

Ремені безпеки є одним із найбільш навантажених елементів системи пасивної безпеки. Під час зіткнення вони повинні витримувати значні розтягувальні сили, які можуть перевищувати кілька тонн, без руйнування або значного подовження.

Основним матеріалом стрічки ременя безпеки є високоміцний поліестер (PET) або, рідше, поліамід (нейлон). Поліестер застосовується частіше завдяки оптимальному поєднанню механічних та експлуатаційних характеристик.

Основні властивості поліестерового волокна: висока міцність на розрив; мала повзучість під навантаженням; стійкість до стирання; стабільність геометричних розмірів; стійкість до ультрафіолету та вологи; низька еластичність (зменшує надмірне переміщення тіла).

Тканина ременя виготовляється методом щільного багат шарового переплетення волокон, що забезпечує рівномірний розподіл навантаження по ширині стрічки.

Матеріали механізмів ременів. Механізми ременів безпеки (інерційні котушки, замки, натягувачі) виготовляють із [8]:

- 1) високоміцних легованих сталей - для валів, фіксаторів і блокувальних механізмів;
- 2) алюмінієвих сплавів - для корпусів і елементів, де важлива мала маса;
- 3) інженерних полімерів (поліамід, поліацеталь) - для корпусів, напрямних та захисних деталей;
- 4) піротехнічних матеріалів - у натягувачах ременів.

Металеві деталі проходять термічну обробку (гартування, відпуск), що забезпечує високу зносостійкість і довговічність.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
						24
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3.2 Матеріали подушок безпеки.

Подушки безпеки повинні розгортатися за мілісекунди, витримувати високий тиск газу та забезпечувати контрольоване поглинання енергії удару. Це висуває особливо жорсткі вимоги до матеріалів.

Основним матеріалом оболонки подушки безпеки є високоміцний нейлон (поліамід 6.6). Він має такі властивості: висока міцність при малій товщині; термостійкість; еластичність; герметичність після спеціальної обробки; стійкість до старіння [8].

Для забезпечення герметичності тканину покривають силіконовим або неопреновим покриттям, яке: зменшує проникність газу; підвищує теплостійкість; захищає волокна від руйнування.

Щільність плетіння тканини дуже висока, що забезпечує здатність витримувати різке наповнення газом.

Газогенератор і корпус. Газогенератори подушок безпеки працюють при високих температурах і тисках, тому виготовляються з: жароміцних сталей; нержавіючих сплавів; алюмінієвих корпусів із захисними покриттями.

Усередині газогенератора використовуються спеціальні хімічні речовини, які швидко виділяють газ при активації.

1.3.3 Матеріали натягувачів ременів і піротехнічних пристроїв.

Натягувачі ременів безпеки - це швидкодіючі пристрої, що активуються під час аварії та миттєво прибирають слабину ременя.

Для їх виготовлення застосовують: леговані сталі високої міцності; термостійкі алюмінієві сплави; полімерні корпуси з армуванням; піротехнічні заряди з контрольованою швидкістю згоряння [8].

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
						25
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Матеріали повинні витримувати різке підвищення тиску та температури, не деформуючись і не руйнуючись.

1.3.4 Матеріали елементів, що поглинають енергію удару.

Для зменшення сили удару застосовують спеціальні матеріали, здатні ефективно поглинати механічну енергію.

Металеві матеріали: високоміцні сталі - забезпечують контрольовану пластичну деформацію; алюмінієві сплави - мають малу масу та добре поглинають енергію; стільникові металеві структури - ефективні при осьових навантаженнях.

Полімерні та композитні матеріали: поліуретанові піни; енергопоглинальні пластики; композитні панелі; поліпропіленові блоки.

Вони застосовуються в панелях салону, бамперах, підголівниках та внутрішніх облицюваннях.

1.3.5 Матеріали допоміжних елементів пасивної безпеки.

До допоміжних матеріалів належать: ламіноване автомобільне скло (триплекс); спінені полімери в панелях салону; еластомери ущільнень і амортизаторів; високоміцні композити каркасів сидінь; термостійкі пластмаси корпусів електронних модулів.

Вони сприяють зменшенню травмування та підвищують загальну ефективність систем безпеки.

Вимоги до матеріалів систем безпеки.

Матеріали повинні відповідати таким вимогам: висока міцність і надійність; стабільність властивостей у діапазоні температур від -40 до $+90$ °C; стійкість до старіння; корозійна стійкість; мала маса; прогнозована поведінка при ударі; технологічність виробництва [8].

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		26

Всі матеріали проходять суворі випробування на розрив, ударну міцність, термостійкість і довговічність.

Матеріали, що використовуються у виробництві елементів систем безпеки автомобіля, відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного захисту водія та пасажирів. Ремені безпеки виготовляють із високоміцних синтетичних волокон, подушки безпеки - з термостійких поліамідних тканин із захисними покриттями, а механічні елементи - з легованих сталей та інженерних сплавів.

Енергопоглинальні конструкції створюють із металів і полімерів, здатних до контрольованої деформації. Комплексне використання сучасних матеріалів дозволяє значно зменшити навантаження на організм людини під час аварії та підвищити загальний рівень автомобільної безпеки.

1.4 Цинкові литі сплави механізмів котушки ременя безпеки.

Використання цинку в автомобільній промисловості зростає, і вже зараз в автомобілі міститься понад 10 кг цинку [9]. Цинк – це широко використовуваний метал, четвертий за поширеністю. Цей елемент є важким металом з атомним номером 30. Цинкові сплави використовуються для лиття під тиском понад 40 років завдяки низькій температурі плавлення 419,6 °C і є матеріалом з високою міцністю та хорошою стійкістю до стирання. Можна відливати складні форми з жорсткими допусками. Вони також мають добру формуваність та високу ударну стійкість. Завдяки сучасним технологіям виробництва цинк можна відливати з тонкою товщиною матеріалу, що забезпечує меншу вагу компонентів, ніж раніше, але все ще високу міцність, жорсткість та високу якість поверхні. Литий цинк використовується як для функціональних, так і для декоративних цілей. Міцний матеріал стійкий до грубого поводження та має високу якість поверхні, що дозволяє використовувати велику кількість різних обробок поверхні. Виробництво з

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		27

одного шматка зазвичай можливе. Цинк має природну здатність захищати від корозії. Захищаючи сталь від пошкоджень, цинк захищає будівлі, автомобілі та човни тощо. Приблизно 50% світового споживання цинку використовується для цієї мети. Цинк можна використовувати знову і знову без погіршення стану.

Найпопулярнішими сплавами є сплави 2, 3 та 5. Одна з причин популярності цинкових сплавів полягає в низькій ціні на матеріал з такими добрими механічними властивостями [9].

Zamak (найчастіше Zamak 2, Zamak 3 або Zamak 5) - це цинкові литі сплави, які широко застосовуються у механізмах катушки ременя безпеки для виготовлення жорстких, точних, але не пружно-деформівних деталей.

Ці елементи не працюють як енергопоглинальні або торсіонні, але повинні мати високу геометричну точність, жорсткість і стабільність форми.

Нижче наведено основні деталі, які реально виготовляють із Zamak у конструкції інерційної катушки ременя безпеки.

1. Корпус (рамка) інерційної катушки.

Це одна з найпоширеніших деталей, що виготовляється литтям під тиском із Zamak. Функції корпусу: утримує всі елементи механізму; забезпечує точне взаємне розташування деталей; сприймає монтажні навантаження; кріпиться до кузова автомобіля.

Чому Zamak підходить: складна форма без механічної обробки, висока жорсткість точність лиття, стабільність геометрії, хороше різьбонарізання.

2. Опорні кронштейни та монтажні елементи. До них належать: кронштейн кріплення катушки; фланці; силові вушка; опори осей механізму.

Вони працюють на статичне навантаження та повинні бути жорсткими, але не потребують пружної деформації - тому литі цинкові сплави добре підходять.

3. Храпове колесо або зубчасті блокувальні елементи.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
						28
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У механізмі блокування ременя є зубчасті або храпові деталі, які: взаємодіють із фіксатором (pawl); забезпечують миттєве блокування барабана; працюють у режимі ударного контакту.

Zamak забезпечує: точність профілю зубців, достатню твердість, зносостійкість при контакті, економічність масового виробництва

4. Важелі інерційного або маятникового механізму блокування.

У катушці часто є: маятник або кульковий інерційний датчик; важіль передачі руху; деталі фіксації. Ці елементи повинні бути: геометрично точними; стабільними по масі; достатньо жорсткими. Литі цинкові сплави добре підходять для таких деталей.

5. Барабанні фланці або допоміжні частини шпулі. Іноді з Zamak виготовляють: бокові фланці барабана; частини шпулі, що не працюють на пружну деформацію; елементи напрямку стрічки.

6. Корпуси піротехнічних натягувачів (окремі конструкції). У деяких моделях натягувачів: зовнішні корпуси; направляючі канали; монтажні блоки можуть виконуватись із литого цинкового сплаву, якщо вони не зазнають екстремального внутрішнього тиску.

7. Деталі замка ременя (не катушки, але системи утримання). Хоч це вже інший вузол, але також часто виготовляють із Zamak: корпус замка ременя; направляючі елементи; декоративно-силові оболонки.

Чому саме Zamak використовують у катушках. Переваги для автомобільної промисловості: високоточне лиття під тиском; мінімальна механічна обробка; хороша розмірна стабільність; жорсткість; корозійна стійкість; можливість отримання тонкостінних складних форм, низька собівартість у масовому виробництві.

У катушці ременя безпеки сплави Zamak застосовують переважно для литих корпусних, монтажних та кінематичних деталей, які повинні мати високу точність і жорсткість, але не працюють у режимі пружної або пластичної енергопоглинальної деформації.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Таблиця 1.1 – Порівняння матеріалів.

Матеріал	Zamak 2	Zamak 5	Zamak 8	Алюміній
Міцність на розрив (Н/мм)	360	320	375	260
Модуль пружності (Н/мм)	85000	85000	85000	71000
Відносне видовження (%)	8	8	8	2
Ударна в'язкість (Дж)	47	58	40	3
Твердість (НВ)	100	85	100	85

Цинкові сплави, що містять алюміній, мають добру корозійну стійкість. Однак обов'язковою умовою є низький вміст домішок, таких як олово, свинець та кадмій. Якщо ці домішки присутні у занадто великих кількостях, може виникнути форма атаки, подібна до міжкристалічної корозії. Невелика кількість магнію протидіє цьому типу впливу. Цинкові сплави чудово підходять для лиття під тиском. Однією з переваг цинкових сплавів є їх низька температура плавлення, а це означає, що інструменти для лиття під тиском не так сильно зношуються. Однак литі цинкові сплави мають недолік – вони старіють. Це означає, що матеріал з часом змінює свої механічні властивості та мікроструктуру. Старіння детальніше пояснюється в розділі 1.5. Міцність на розрив та видовження з часом погіршуються, і можуть відбуватися незначні зміни розмірів [9].

Легувальні елементи, присутні в цинковому сплаві, впливають на сплав по-різному.

Алюміній – покращує ливарність та збільшує текучість та міцність на розрив. Забезпечує дрібніший розмір зерна [8].

Мідь – покращує ливарність, але погіршує матеріал з точки зору старіння. 1% міді покращує ударну в'язкість за температур близько 0 °С. Підвищує стійкість до повзучості та корозії [8].

Хром і титан – запобігають повзучості [8].

					КВРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		31

1.4.1 Цинковий сплав Zamak 5.

Zamak 5 – це цинковий сплав, який використовується як матеріал для лиття тестового об'єкта в ролику стрічки. Склад Zamak 5 наведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Хімічний склад Zamak 5 у вагових відсотках [9].

Цинк	залишок
Алюміній	3,8 - 4,2
Мідь	0,7 - 1,1
Магній	0,035 - 0,06
Залізо	<0,02
Нікель	<0,001
Кремній	<0,02
Свинець	<0,003

Zamak 5 – це гіперевтектоїдний сплав. Мідь збільшує розчинність алюмінію в цинку і, отже, збільшує міцність. Недоліком цинкових сплавів є те, що повзучість починається вже за кімнатної температури при навантаженнях, що перевищують 50 МПа. Високі механічні властивості знижуються вже після одного року. Цинкові сплави старіють вже за кімнатної температури, оскільки дифузія є відносно високою через низьку температуру плавлення цинку [9].

1.4.2 Вплив температури на властивості матеріалу.

Властивості матеріалу сильно залежать від його температури. Границя текучості, міцність на розрив та пружність зменшуються зі збільшенням

температури, тоді як пластичність зростає. Коли температура падає, багато металів стають крихкими [10]. Температура, за якої метал стає крихким, називається температурою переходу або температурою склування. В області поблизу температури переходу чергуються крихке та пластичне руйнування. Крихке руйнування - це руйнування, яке відбувається без помітної пластичної деформації. Існує кілька причин крихкого руйнування, зокрема:

Матеріал, схильний до крихкого руйнування:

- Низька температура.
- Початкова тріщина, де починається руйнування.
- Зовнішні сили, наприклад, удар.
- Вбудоване напруження.

Руйнування відбувається дуже швидко, а поверхня руйнування має стрілоподібну форму [10].

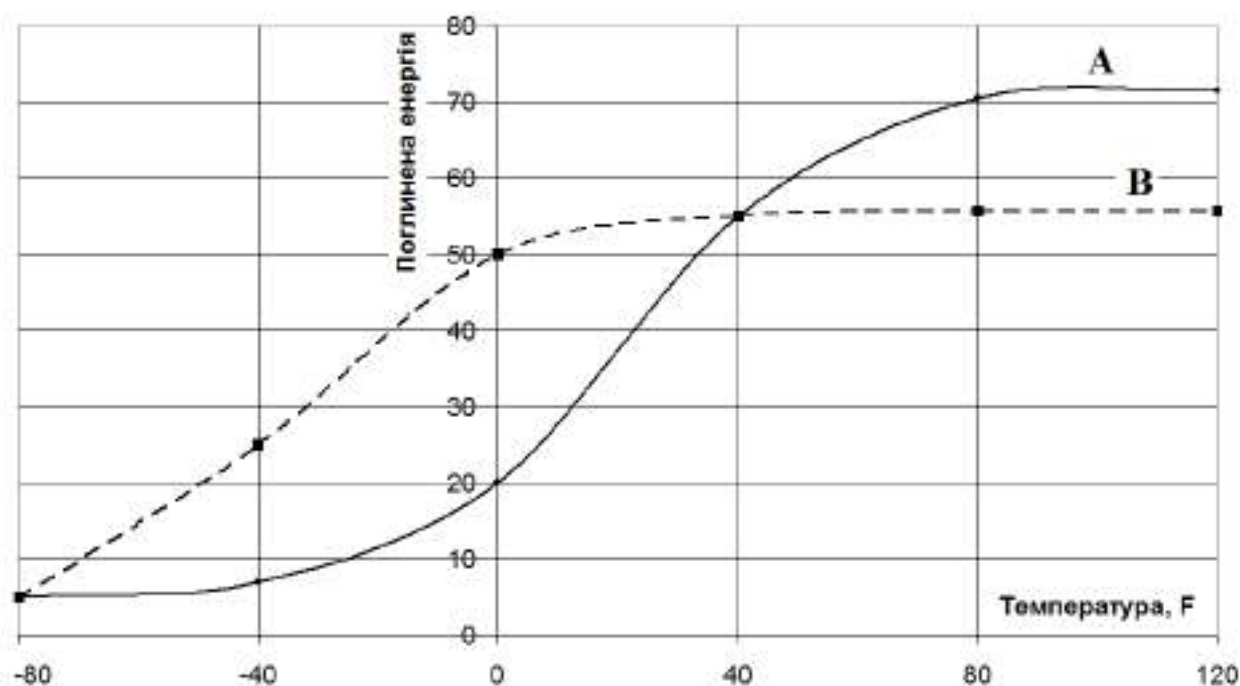


Рисунок 1.7 – Крива ударного випробування для двох різних типів сталі.

Оскільки температура переходу не є точною, важливо, щоб матеріал не використовувався поблизу цієї температури. Для визначення температури

переходу проводяться ударні випробування. Ударне випробування проводиться за допомогою маятника, який вдаряє по випробувальних брусках матеріалу, що досліджується. Вимірюється енергія, що використовується для удару по випробувальному бруску. Випробування проводяться за різних температур, а результати наносяться на графік. Вісь Y графіка показує енергію, що використовується для удару по випробувальному бруску, а вісь X графіка показує температуру випробувального бруска, див. рисунок 1.7. Щоб змінити температуру переходу, можна внести зміни до хімічного складу або мікроструктури [10].

1.4.3 Крихке руйнування.

Крихке руйнування виникає в металах і сплавах, які мають низьку пластичність. Але навіть пластичні метали можуть крихко руйнуватися за температур нижче температури переходу. При крихкому руйнуванні пластична деформація відсутня або відбувається дуже незначна. Тріщина зазвичай рухається вздовж певної кристалічної площини, але іноді вона може рухатися вздовж межі зерен. Якщо руйнування відбувається шляхом сколювання, кожне зерно має руйнування, яке утворює плоску поверхню з різними напрямками, що створює поверхню руйнування, що виглядає кристалічною. Крихкі руйнування можна розпізнати за тим, що поверхня руйнування плоска та перпендикулярна до сили [8].

У цьому випробуванні була сконструйована торсійна труба, яка з ослабленою геометрією змушена руйнуватися. Оскільки випробуваний об'єкт призначений для використання в майбутньому ролику стрічки, вимірювання температури випробуваного об'єкта під час випробувань є проблематичним. Замість цього використовується температурна крива, розроблена для подібних випадків компанією Autoliv. На рисунку 1.8 показано, як температура зростає з плином часу після виймання з морозильної камери.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		34

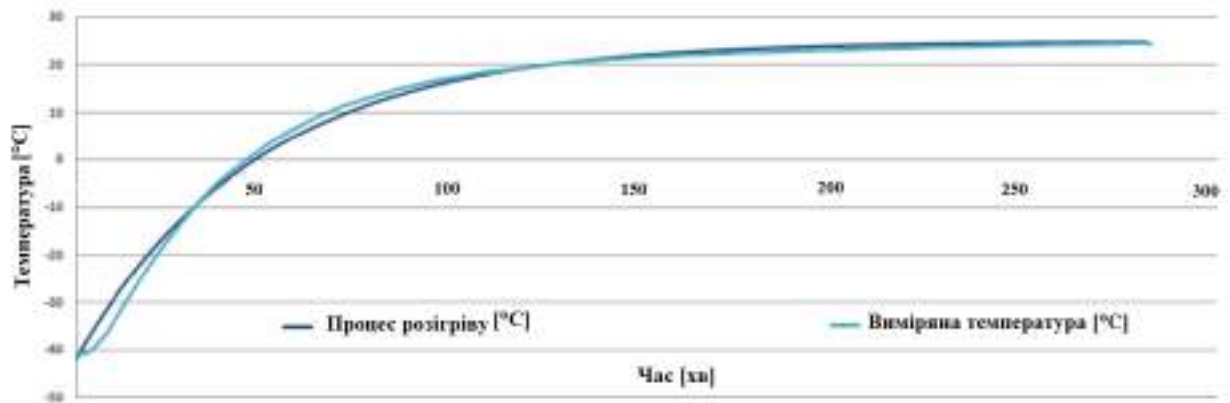


Рисунок 1.8 – Графік зміни температури, коли зразок виймають при кімнатній температурі після зберігання при $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$.

З рисунка 1.8 видно, що температура спочатку швидко зростає. Температури та часові інтервали, що використовуються для тестування, наведено в таблиці 1.3. Потім зразки слід зберігати в морозильній камері, яка підтримує температуру $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$, протягом щонайменше 4 годин [1].

Таблиця 1.3 показує час, необхідний для досягнення зразком певної температури після виймання з морозильної камери, яка підтримує температуру $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Таблиця 1.3 – Відповідність часу для досягнення температури.

Температура ($^{\circ}\text{C}$)	Час після виймання з морозильної камери (хвилини)
-40	02:00
-38	04:00
-36	06:00
-34	08:00
-32	10:00
-30	11:30
-28	13:00
-26	14:00

1.4.4 Старіння сплаву.

Матеріал змінюється з часом, і це явище називається старінням. Це часто пов'язано з небажаною, але спонтанною зміною. На старіння можна впливати та прискорювати його термічною обробкою. Термічне старіння включає нагрівання матеріалу до низької температури [8].

Під час старіння матеріал нагрівається до низької температури. За цієї температури атоми дифундують на коротку відстань. Це дозволяє атомам рухатися та створювати стабільну фазу. Під час процесу старіння відбувається перебудова атомів. Перед старінням у кристалі порушується надлишок сторонніх атомів. Це означає, що опір дислокаціям невеликий, що, у свою чергу, призводить до низької межі текучості. Після старіння матеріалу починається осадження когерентних частинок. Кристалічна структура частинок не вивільняється з кристалічної структури основного матеріалу. Тоді в кристалі виникають великі внутрішні напруження, що призводить до збільшення опору руху дислокацій. Якщо матеріал старіє занадто довго, це означає, що він перестарів. Відокремлені частинки вивільняються з кристалічної структури основного матеріалу. Внутрішні напруження зменшуються, і рухи дислокацій знову можуть відбуватися легше [8].

На рисунку 1.9.а показано некогерентну частинку, а на 1.9.б показано когерентну частинку.

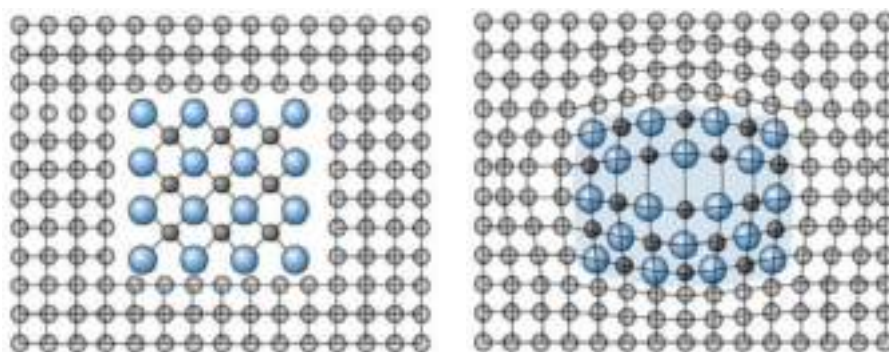


Рисунок 1.9 – Частинка:
а) некогерентна; б) когерентна.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		36

Щоб імітувати властивості матеріалу, які виникають після багатьох років експлуатації автомобіля, використовується штучне старіння. Це означає, що ролик ременя нагрівається при низькій температурі протягом тривалого часу. Вища школа Аален у Німеччині, яка досліджує це питання, виявила взаємозв'язок між штучним старінням і природним старінням, який показано на рисунку 1.10 [11].

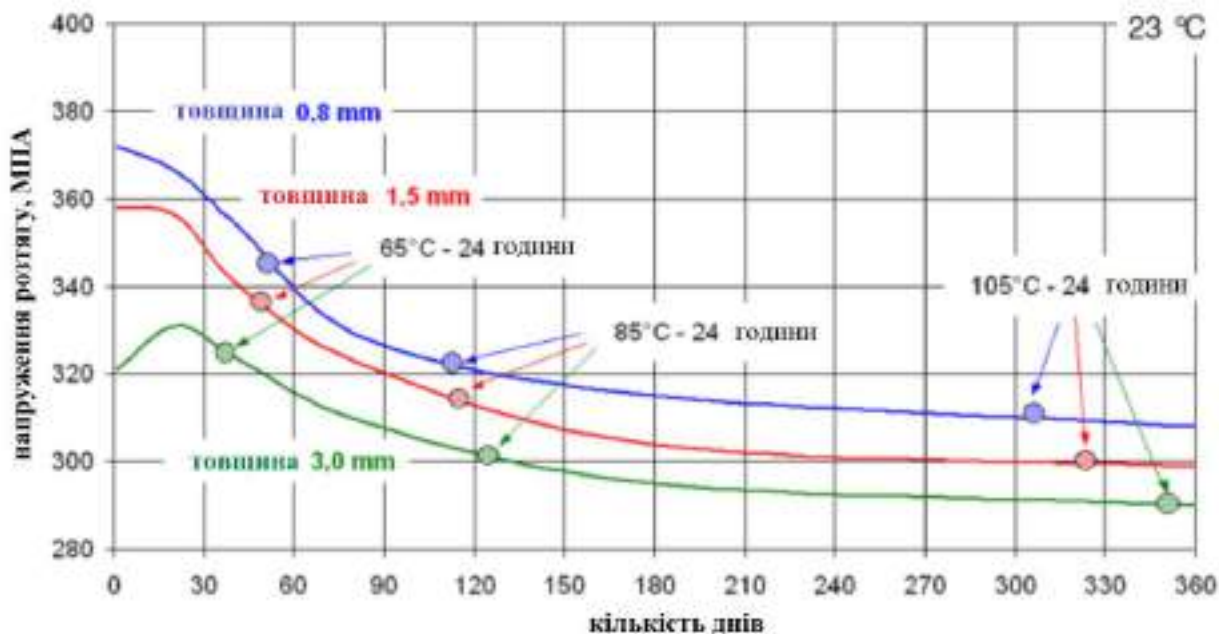


Рисунок 1.10 – Графік зміни міцності Zamak 5 в залежності від часу природного та штучного старіння.

З графіка на рисунку 1.10 видно, що приблизно через 300 днів міцність на розтяг вирівнюється. Графіки показують міцність на розтяг з часом при кімнатній температурі. Випробування проводилися на матеріалах різної товщини, що відповідають різним кривим. Штучне старіння проводилося при різних температурах протягом 24 годин і дало певну міцність на розтяг, яка відповідає круглим точкам на відповідній кривій. Після випробувань виявляється, що старіння при 105 °C протягом 24 годин відповідає природному старінню, яке відбулося б приблизно через рік при кімнатній температурі [11].

Ремінь безпеки повинен функціонувати за будь-яких температур і після багатьох років. Компоненти автомобіля штучно тестуються, щоб імітувати середовища, яким автомобіль буде піддаватися протягом свого терміну служби, як з точки зору спеки, так і холоду. Зіткнення в автомобілі при температурі $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ трапляються рідко, оскільки автомобіль та його компоненти нагріваються під час запуску, але він все одно повинен функціонувати правильно.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		38

2 МЕТОДИКА АНАЛІЗУ МАТЕРІАЛІВ.

У цій частині описано, як проводилося випробування. Методами, що використовувалися для отримання результату, були маятникові випробування, світлова мікроскопія, вимірювання твердості та скануюча електронна мікроскопія.

2.1 Методика механічних випробувань.

Для випробувань були виготовлені 20 роликів стрічки без будь-якої піротехніки, оскільки для дослідження не потрібно ні попереднього розтягування, ні зміщення. 10 роликів стрічки потім витримували при температурі 105 °C протягом 24 годин, щоб імітувати зміни, що відбуваються з роликом стрічки з часом. Сім роликів стрічки, що піддавали старінню, та всі ролики стрічки, що не піддавали старінню, потім охолоджували в морозильній камері, де підтримувалася температура -42 °C. Випробування проводилося для вивчення того, як матеріал змінює властивості під час холоду та старіння. Щоб відповідати реальності, тестовий об'єкт випробовувався в його природному середовищі, всередині ролика стрічки.

Під час зіткнення виникають високі сили з великою швидкістю. Ці сили можна імітувати за допомогою випробування маятником. Під час випробування маятником відбувається невелике зіткнення між маятником та тестовим об'єктом. Маятник важить 20 кг і може бути піднятий на максимальну висоту 2,4 метра. Потім маятник відпускається, і відбувається зіткнення між маятником та стрічкою.

Ролик стрічки кріпиться до столу за допомогою гвинтів. Стрічка витягується та кріпиться таким чином, щоб маятник міг вдаритися посередині стрічки. Навколо ролика стрічки намотується лише 0,75 м стрічки. До стрічки кріпиться датчик сили, який вимірює сили, що

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		39

сприймаються стрічкою від маятника. Датчик сили стрічки може зчитувати, чи підтримує ролик стрічки однакову силу протягом усього процесу, чи він втрачає силу, і в цьому випадку об'єкт випробування, найімовірніше, тріснув. Об'єкт випробування може тріснути, навіть якщо криві цього не показують. Це стало очевидним лише після розбирання роликів стрічки. Схема методу випробування показана на рисунку 1.11 [12].

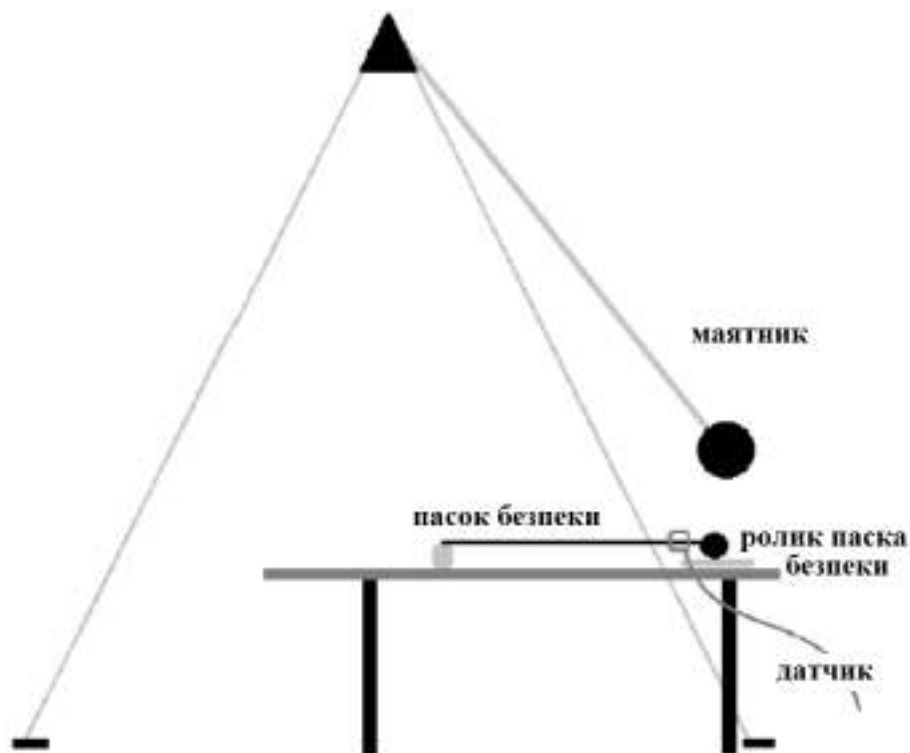


Рисунок 1.11 – Метод випробування маятником.

Усі рулони стрічки, крім тих, що підлягають випробуванню за кімнатної температури, охолоджуються в морозильній камері, яка підтримує температуру $-42\text{ }^{\circ}\text{C}$. Щоб досягти бажаної температури на рулоні стрічки, його виймають з морозильної камери та зберігають при кімнатній температурі протягом певного часу перед проведенням випробування. Залежно від бажаної температури, рулон стрічки потрібно зберігати при кімнатній температурі протягом різного часу, див. таблицю 1.3.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		40

Випробування розпочалося зі зразків, що піддавали старінню, рулонів стрічки висотою 2 м на маятнику.

Спочатку стрічкові ролики випробовували за кімнатної температури, щоб побачити, як змінюється твердість. Потім випробовували стрічкові ролики, що піддавали старінню, від нижчих до вищих температур. Там, де графіки вказували на поломку, випробовували більше стрічкових роликів. Щоб переконатися, що ця температура є правильною температурою, за якої відбуваються зміни властивостей, кілька стрічкових роликів випробовували за вищої температури. Після того, як було визначено, за якої температури стрічкові ролики, що піддавали старінню, зламалися, випробовували стрічкові ролики, що не піддавали старінню, щоб побачити, коли вони змінюють свої властивості. Стрічкові ролики, що не піддавали старінню, випробовували на висоті 2,4 м на маятнику, оскільки вони не послаблюються під дією старіння.

Коли ролики стрічки знову досягли кімнатної температури, їх розібрали для аналізу. Це мало статися з метою аналізу того, як об'єкт випробування впорався з випробуванням. Кожен об'єкт випробування був позначений номером, щоб відстежувати, яку обробку він отримав під час випробування маятником. Зразки, що зламалися, потім представляли інтерес для мікроскопії.

2.2 Мікроскопія зразків.

2.2.1 Світлова мікроскопія.

Світлова мікроскопія є одним із базових методів металографічного аналізу, що дозволяє досліджувати мікроструктуру матеріалів, виявляти дефекти лиття, домішки, фазовий склад, а також оцінювати структурні зміни, пов'язані з експлуатаційними впливами або процесами старіння. У даній

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		41

роботі метод світлової мікроскопії застосовано для порівняльного аналізу структури матеріалу деталей, які зазнали руйнування при низькій температурі ($-38\text{ }^{\circ}\text{C}$), зокрема для встановлення можливих змін, спричинених старінням матеріалу.

Метою мікроскопічного аналізу було: виявлення мікроструктурних особливостей матеріалу; визначення наявності шлакових включень та сторонніх домішок; порівняння структури матеріалу, що піддали та не піддавали старінню; оцінка впливу старіння на структурний стан матеріалу; визначення можливого зв'язку між мікроструктурою та характером руйнування при низьких температурах.

Підготовка зразків до дослідження.

Для проведення дослідження було відібрано два зразки матеріалу, що зруйнувалися при температурі $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$: зразок, який піддавався процесам старіння; зразок без попереднього старіння.

З метою забезпечення можливості детального мікроструктурного аналізу зразки були механічно розпиляні для отримання фрагментів меншого розміру, придатних для металографічної підготовки.

Подальша підготовка включала такі етапи [13]:

1. Очищення зразків. Фрагменти матеріалу промивали в ультразвуковому очищувачі для видалення залишків мастил, абразивних частинок та інших поверхневих забруднень, що можуть впливати на якість мікроскопічного аналізу.

2. Монтаж у полімерну оправку. Очищені зразки були залиті в пластичний матеріал (монтажну смолу), що забезпечує зручність подальшого шліфування, полірування та стабільність положення зразка під час дослідження.

3. Шліфування. Поверхня зразків послідовно оброблялася абразивними матеріалами зі зменшенням зернистості для видалення слідів різання та отримання рівної поверхні.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		42

4. Полірування. Для отримання дзеркально гладкої поверхні застосовувалося тонке полірування із використанням полірувальних паст. Цей етап необхідний для чіткого виявлення структурних елементів під мікроскопом.

Первинне мікроскопічне дослідження.

Після механічної підготовки поверхні зразки досліджувалися під світловим мікроскопом без хімічного травлення. На цьому етапі проводилось: виявлення макродефектів лиття; оцінка рівномірності структури; виявлення шлакових включень; ідентифікація неметалевих домішок; фотофіксація дефектів при різних збільшеннях.

Фотографування виконувалося для подальшого порівняльного аналізу між зразками.

Хімічне травлення та повторне дослідження.

Для більш детального вивчення мікроструктури поверхні зразки були піддані хімічному травленню. Травлення дозволяє виявити: межі зерен; фазову структуру; внутрішньозернові особливості; неоднорідності матеріалу; ознаки структурної деградації.

Після травлення зразки повторно досліджувалися під світловим мікроскопом. Було виконано фотографування при різних ступенях збільшення з метою отримання повної картини мікроструктури та можливості детального порівняння між матеріалом, що піддавали та не піддавали старінню.

Вимірювання твердості.

Для додаткової оцінки змін властивостей матеріалу було проведено вимірювання мікротвердості. Метою випробування було визначення можливих змін механічних характеристик, спричинених процесами старіння.

Випробування виконувалося методом Віккерса з використанням навантаження HV5, що відповідає приблизно 50 Н [12].

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		43

Даний метод дозволяє: оцінити локальні механічні властивості матеріалу; виявити неоднорідності структури; порівняти твердість різних ділянок зразка; встановити можливі зміни, спричинені старінням.

Результати вимірювань використовувалися для порівняння середніх значень твердості матеріалу, що піддавали та не піддавали старінню.

Порівняльний аналіз.

Отримані мікрофотографії та результати вимірювання твердості дозволили провести порівняльний аналіз двох досліджуваних зразків за такими параметрами: наявність та кількість неметалевих включень; морфологія зеренної структури; рівномірність мікроструктури; ознаки структурних змін, пов'язаних зі старінням; зміни мікротвердості матеріалу.

Такий комплексний підхід забезпечує можливість встановлення взаємозв'язку між структурним станом матеріалу та його поведінкою при руйнуванні в умовах низьких температур.

Метод світлової мікроскопії дозволив провести детальний аналіз мікроструктури досліджуваних зразків матеріалу та оцінити вплив старіння на їх структурний стан. Проведена металографічна підготовка забезпечила отримання якісної поверхні для дослідження, а застосування травлення дозволило чітко виявити структурні елементи матеріалу.

Додаткове вимірювання мікротвердості методом Віккерса дало змогу оцінити можливі зміни механічних властивостей матеріалу та провести порівняння між стареним і нестареним зразками. Отримані результати є основою для подальшого аналізу причин руйнування матеріалу при низьких температурах.

2.2.2 Скануюча електронна мікроскопія.

Для дослідження морфології поверхні зламу та локального хімічного складу матеріалу зразків було застосовано метод скануючої електронної

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		44

мікроскопії (SEM). Цей метод забезпечує високу роздільну здатність зображення та дозволяє детально аналізувати мікроструктуру матеріалу, характер руйнування, а також виявляти дефекти, включення та структурні неоднорідності [14].

Підготовка зразків до дослідження.

Для проведення досліджень були використані два типи зразків:

- 1) зразки після процесу старіння;
- 2) нові, що не піддавали старінню, (контрольні) зразки матеріалу.

Фрагменти матеріалу були вирізані таким чином, щоб поверхня зламу була максимально відкритою та доступною для спостереження. Особлива увага приділялась збереженню природної структури поверхні руйнування без додаткового механічного пошкодження.

Перед мікроскопічним аналізом зразки піддавали очищенню в ультразвуковій ванні з метою видалення сторонніх частинок, залишків мастильних матеріалів і продуктів експлуатаційного впливу. Така обробка забезпечує підвищення якості отримуваних зображень і точності елементного аналізу.

Після очищення зразки були закріплені на тримачах мікроскопа таким чином, щоб площина зламу розташовувалася максимально вертикально відносно електронного пучка. Це дозволило отримати чітке зображення топографії поверхні та уникнути спотворень, пов'язаних із кутом спостереження.

Проведення дослідження.

Скануючий електронний мікроскоп використовувався для: отримання високодеталізованих зображень поверхні зламу при різних збільшеннях; аналізу характеру руйнування (крихке, в'язке, змішане); виявлення мікротріщин, пор, включень і зон локальної деформації; визначення відмінностей у структурі між новими та зістареними зразками; дослідження локального хімічного складу матеріалу в різних ділянках поверхні.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Для аналізу елементного складу застосовувалася система енергодисперсійного рентгенівського аналізу (EDS), інтегрована в мікроскоп. Вона дозволила визначити розподіл хімічних елементів у вибраних точках та ділянках поверхні зламу, що дало змогу оцінити можливі зміни складу матеріалу внаслідок старіння або експлуатаційних навантажень.

Використання скануючої електронної мікроскопії дозволило: встановити особливості мікромеханізмів руйнування матеріалу; оцінити вплив процесів старіння на структуру та цілісність матеріалу; порівняти морфологію поверхні зламу нових і експлуатованих зразків; виявити локальні концентрації елементів, що можуть впливати на механічні властивості; отримати об'єктивні дані для подальшого аналізу причин деградації матеріалу.

Таким чином, застосування SEM-аналізу забезпечило комплексне дослідження мікроструктурних характеристик матеріалу та дозволило отримати достовірну інформацію щодо змін, спричинених процесами старіння і механічного навантаження.

2.3 Обладнання для аналізу матеріалів.

Для комплексного аналізу структури та стану матеріалів зразків доцільно застосовувати поєднання світлової мікроскопії та скануючої електронної мікроскопії (SEM). Ці методи доповнюють один одного: світлова мікроскопія забезпечує загальну оцінку мікроструктури, тоді як SEM дозволяє досліджувати морфологію поверхні та хімічний склад з високою роздільною здатністю.

Світловий мікроскоп використовується для первинного аналізу структури матеріалу, визначення характеру макро- та мікрордефектів, дослідження зернистої структури, фазового розподілу та загальної морфології поверхні після шліфування і травлення.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
						46
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У контексті дослідження матеріалів елементів систем безпеки автомобіля (металів, сплавів, полімерів) він дозволяє: оцінити структуру матеріалу до та після старіння; визначити розмір і форму зерен; виявити тріщини, пори, включення; дослідити зони пластичної деформації; виконати попередній аналіз характеру руйнування.

Основні технічні характеристики. Типові параметри лабораторного металографічного світлового мікроскопа [14]:

- Діапазон збільшення: 50× – 1000× (інколи до 1500×)
- Роздільна здатність: приблизно 0,2 мкм
- Тип освітлення: відбите та/або проходяче світло
- Методи контрастування: світлопольний режим; темнопольний режим; поляризаційна мікроскопія; диференціально-інтерференційний контраст (DIC)
- Цифрова фіксація зображення: камера високої роздільної здатності
- Можливість вимірювань: програмне забезпечення для аналізу розмірів структур.

Переваги: швидка підготовка та дослідження; можливість аналізу великих ділянок поверхні; відносно проста експлуатація; невисока вартість досліджень.

Обмеження: обмежена роздільна здатність; неможливість детального аналізу наноструктури; відсутність прямого елементного аналізу.

Скануючий електронний мікроскоп (SEM). Скануючий електронний мікроскоп використовується для детального дослідження мікро- та субмікроструктури поверхні зламу, аналізу механізмів руйнування, а також визначення локального хімічного складу матеріалу.

У даному дослідженні SEM дозволяє: досліджувати топографію поверхні зламу; визначати тип руйнування (крихке, в'язке, втомне); виявляти мікротріщини, пористість, включення; аналізувати зміни структури після старіння; виконувати локальний елементний аналіз (EDS).

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		47

Типові параметри сучасного SEM лабораторного класу:

- Діапазон збільшення: 20× – 500 000× (інколи більше)
- Роздільна здатність: 1 – 10 нм (залежно від моделі та режиму)
- Прискорююча напруга електронного пучка: 0,5 – 30 кВ
- Глибина різкості: значно більша, ніж у світлового мікроскопа
- Режими детектування: вторинні електрони (топографія); зворотно відбиті електрони (контраст за атомним номером)
- Елементний аналіз: енергодисперсійна спектроскопія (EDS)
- Вакуумна система: високий або змінний вакуум
- Можливість картування елементів по поверхні.

Переваги: надвисока роздільна здатність; тривимірно подібне зображення поверхні; аналіз локального хімічного складу; дослідження механізмів руйнування; велика глибина різкості.

Обмеження: складніша підготовка зразків; необхідність вакууму; висока вартість обладнання; більший час дослідження.

Узагальнення щодо застосування в роботі.

Поєднання світлової та електронної мікроскопії забезпечує багаторівневий аналіз матеріалу наведений в таблиці 2.1 [14]:

Таблиця 2.1 – Основна інформація методу аналізу.

Метод	Рівень дослідження	Основна інформація
Світлова мікроскопія	Мікроструктурний	Загальна структура, зерна, дефекти
SEM	Мікро- та нанорівень	Морфологія зламу, механізми руйнування, елементний склад

Таким чином, використання обох методів дозволяє отримати повну картину структурного стану матеріалу, змін після старіння та причин руйнування елементів систем безпеки автомобіля.

Для дослідження мікроструктури матеріалу зразків, визначення наявності включень, дефектів лиття, а також аналізу змін після старіння деталей катушки ременя безпеки доцільно використовувати металографічний світловий мікроскоп Olympus BX53M, рис. 2.1 [15].



Рисунок 2.1 – Світловий мікроскоп Olympus BX53M

Цей мікроскоп належить до професійного лабораторного обладнання для дослідження непрозорих матеріалів, зокрема металів, сплавів і литих деталей, що робить його придатним для аналізу елементів системи безпеки автомобіля.

Основні технічні характеристики [15]:

- оптична система UIS2 з корекцією на нескінченність;
- робота у відбитому світлі (металографічні дослідження);
- поле зору до FN 22 або FN 26,5 залежно від конфігурації;
- хід фокусування до 25-30 мм;
- мінімальний крок точного фокусування: до 1-2 мкм;
- можливість встановлення біокулярних або триокулярних насадок;
- можливість підключення цифрової камери для фіксації зображень;
- максимальна висота зразка до 35-105 мм залежно від конфігурації.

Мікроскоп Olympus BX53M дозволяє: досліджувати мікроструктуру металу після травлення; виявляти шлак, пористість, неметалеві включення;

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		49

порівнювати структуру зразків; документувати мікроструктурні зміни; виконувати кількісні металографічні вимірювання.

Висока оптична якість та стабільна механіка забезпечують можливість отримання репрезентативних результатів при аналізі матеріалу торсійної трубки або інших литих деталей катушки ременя безпеки.

Для детального аналізу морфології поверхні зламу та визначення локального хімічного складу матеріалу використовується скануючий електронний мікроскоп JEOL JSM-IT500 InTouchScore, рис. 2.2 [16].



Рисунок 2.1 – Скануючий електронний мікроскоп JEOL JSM-IT500.

Це універсальний електронний мікроскоп з можливістю роботи у високому та низькому вакуумі, який широко застосовується для дослідження матеріалів, фрактографії та мікроаналізу.

Основні технічні характеристики [16]:

- просторове розділення до 3 нм (при 30 кВ);
- діапазон збільшення від $5\times$ до $300000\times$;
- прискорююча напруга 0,3-30 кВ;
- струм зонда 1 пА – 1 мкА;
- режими зображення: вторинні електрони, композиційний контраст, топографія;
- автоматичне налаштування фокусування та стигматизму;
- можливість роботи у низькому вакуумі (10-650 Па);

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

- інтегрована система енергодисперсійного рентгенівського аналізу (EDS);
- можливість побудови карт розподілу елементів;
- максимальний розмір зразка до 200 мм у діаметрі.

Скануючий електронний мікроскоп дозволяє: досліджувати морфологію поверхні зламу; визначати механізм руйнування (крихкий, втомний, пластичний); виявляти мікропори, тріщини, сегрегацію; визначати локальний хімічний склад матеріалу; аналізувати включення та домішки; порівнювати структуру після старіння та без старіння.

Використання EDS-аналізу дозволяє ідентифікувати фазовий склад і встановити наявність сторонніх елементів, що можуть впливати на міцність матеріалу.

Для комплексного дослідження матеріалу деталей катушки ременя безпеки доцільно застосовувати поєднання світлової та електронної мікроскопії. Металографічний мікроскоп Olympus BX53M забезпечує аналіз загальної мікроструктури та дефектів матеріалу, тоді як скануючий електронний мікроскоп JEOL JSM-IT500 дозволяє досліджувати поверхню зламу на мікро- та нанорівні, а також визначати елементний склад.

Поєднання цих методів забезпечує всебічний аналіз структурних змін матеріалу, викликаних старінням або низькотемпературним руйнуванням.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		51

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЗРАЗКІВ РОЛІКІВ РЕМЕНЯ БЕЗПЕКИ

Випробувальний об'єкт, який не піддавався старінню та знаходився при кімнатній температурі, не тріскається під час випробування маятником. У таблиці 3.1 показано різні стани випробувального об'єкта та те, як вони пройшли випробування маятником. Короткий опис того, як випробувальний об'єкт пройшов випробування маятником, наведено в таблиці 3.2. У таблицях показано лише 18 зразків, оскільки два зразки довелося відбракувати через фактори руйнування.

Таблиця 3.1 – Результати після випробування маятником на роликах ременя РОЗ за різних температур.

№	Висота маятника, м	Старінню піддавали / не піддавали	Температура (°C)	Випробування на злам
1	2	піддавали	RT	Ні
2	2	піддавали	-38	Так
3	2	піддавали	-36	Ні
4	2	піддавали	-36	Ні
5	2	піддавали	-38	Ні
6	2	піддавали	-40	Так
7	2	піддавали	-40	Так
8	2,4	не піддавали	-40	Так
9	2,4	не піддавали	-38	Ні
10	2,4	не піддавали	-38	Ні
11	2,4	не піддавали	-40	Ні
12	2,4	не піддавали	-36	Ні
13	2,4	не піддавали	-34	Ні

14	2,4	не піддавали	-40	Ні
15	2,4	не піддавали	-38	Так
16	2,4	не піддавали	-36	Ні
17	2	не піддавали	-36	Ні
18	2	не піддавали	-38	Ні

Таблиця 3.2 – Короткий опис.

Температура (°C)	Старінню піддавали, злам	Старінню не піддавали, злам
-34	-	1 шт. ні
-36	3 шт. ні	2 шт. ні
-38	1 шт. так	2 шт. ні
-38	1 шт. так	2 шт. ні
-40	2 шт. так	1 шт. так
-40	2 шт. так	2 шт. ні

Випробування маятником показує, що властивості матеріалу Zamak 5 змінилися у зістареному та охолодженому стані. Зміна відбувається при -38°C як у зістареному, так і в новому стані. Зверніть увагу на висоту маятника. Це пояснюється тим, що для нових деталей потрібна була більша висота, оскільки вони не були ослаблені старінням.

Таблиця 3.3 показує, що немає різниці в твердості між новим та зістареним Zamak 5.

На рисунках 3.1 та 3.2 показано зображення поверхні зламу зістареного та нового зразка, отримані за допомогою скануючого мікроскопа. В обох випадках злам є крихким і його можна відрізнити тим, що він плоский та має різні напрямки залежно від розташування зерен та критичних площин зсуву.

Таблиця 3.3 – Результати вимірювання твердості методом Віккерса з HV5.

№	Новий	Зістарений
1	105 HV	106 HV
2	108 HV	108 HV
3	111 HV	105 HV

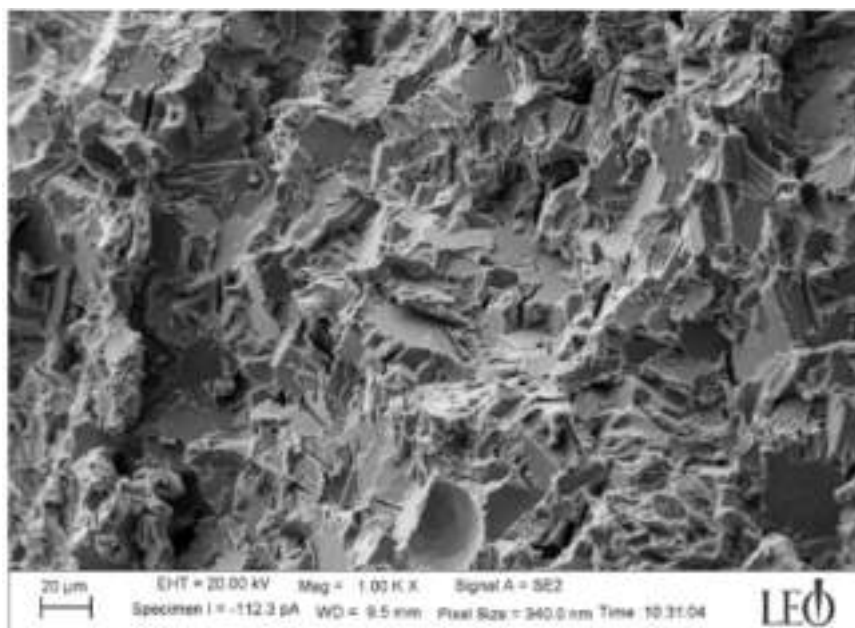


Рисунок 3.1 – Крихке руйнування нового зразка.

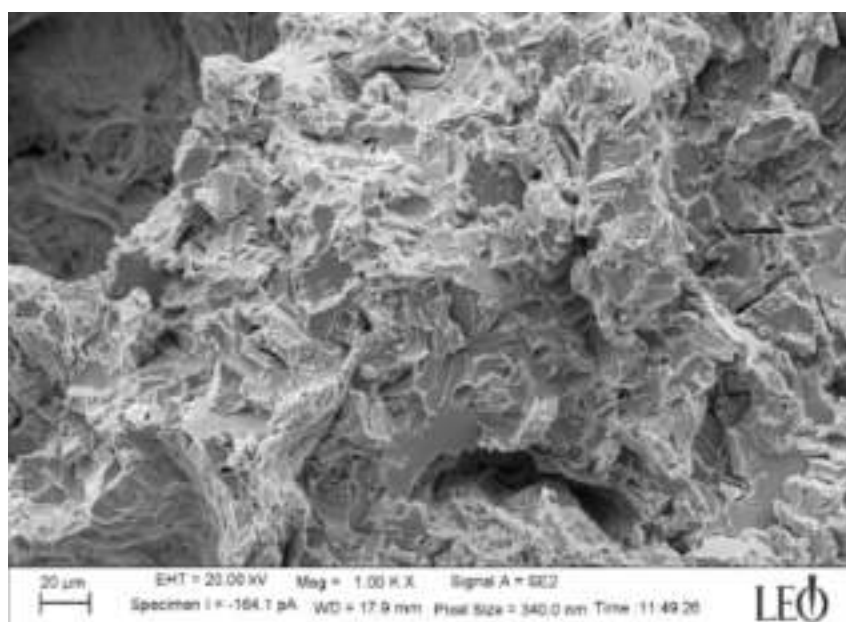


Рисунок 3.2 – Крихке руйнування у зразку після старіння.

На рисунку 3.3 показано осад, який можна побачити у вигляді маленьких чорних цяток. На рисунку 3.4 показано збільшення однієї з цих ділянок. В таблиці 3.4 наведено результат аналізу складу матеріалу, який було проведено, щоб побачити, яким матеріалом збагачені чорні цятки. Аналіз було проведено за допомогою скануючого електронного мікроскопа. Ділянка була збагачена алюмінієм, що вказує на те, що осад складається з алюмінію. Вміст алюмінію в цій ділянці виявився близько 14 %, сплав в цілому повинен містити близько 4 % алюмінію.

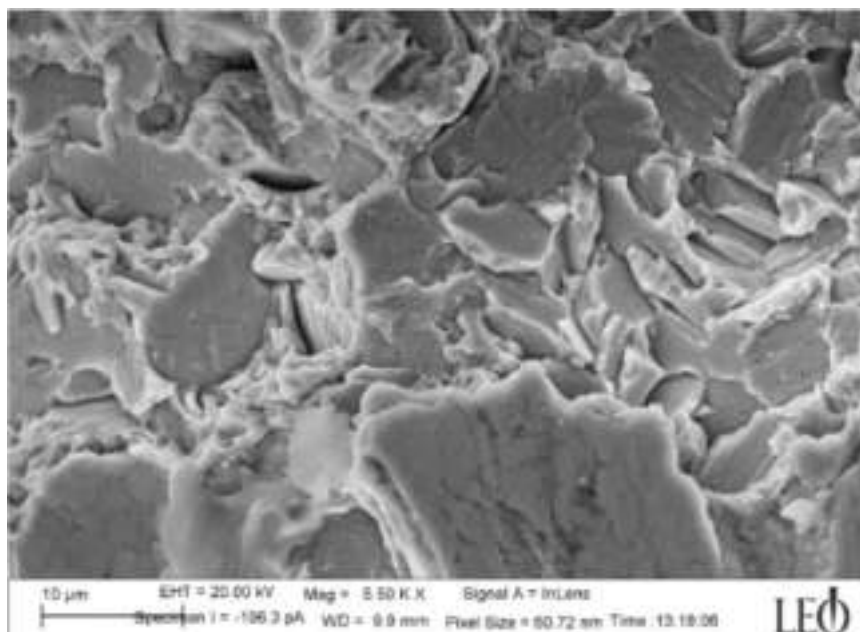


Рисунок 3.3 – Осадження у новому зразку.

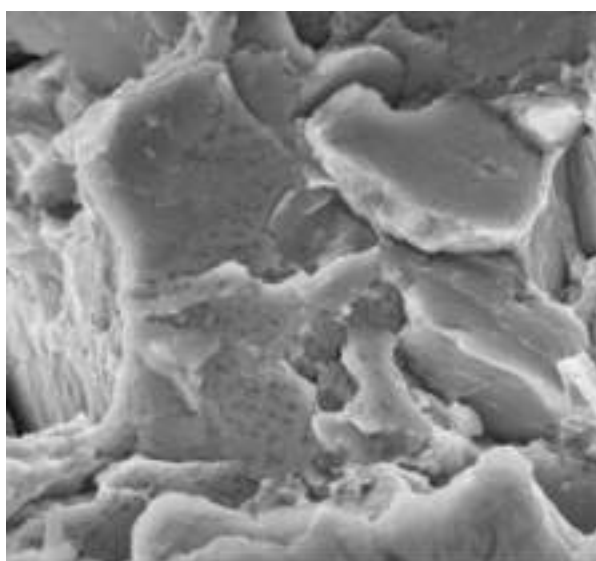


Рисунок 3.4 – Осад.

					КВРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		55

Таблиця 3.4 – Аналіз складу чорної ділянки нового зразка.

Елемент	Ваговий %	Атомний %
OK	1,41	3,8
MgK	1,05	1,86
AlK	19,34	30,81
CuK	0,8	0,54
ZnK	95,77	62,98
Всього	118,38	

На рисунках 3.5 та 3.6 показано осад алюмінію у зістареному зразку. Чітко видно, що осад розташовувався на межах зерен та критичних площинах зсуву. Щоб переконатися, що у зістареному зразку відбувалося осадження алюмінію, було проведено аналіз складу, що наведено в таблиці 3.5.

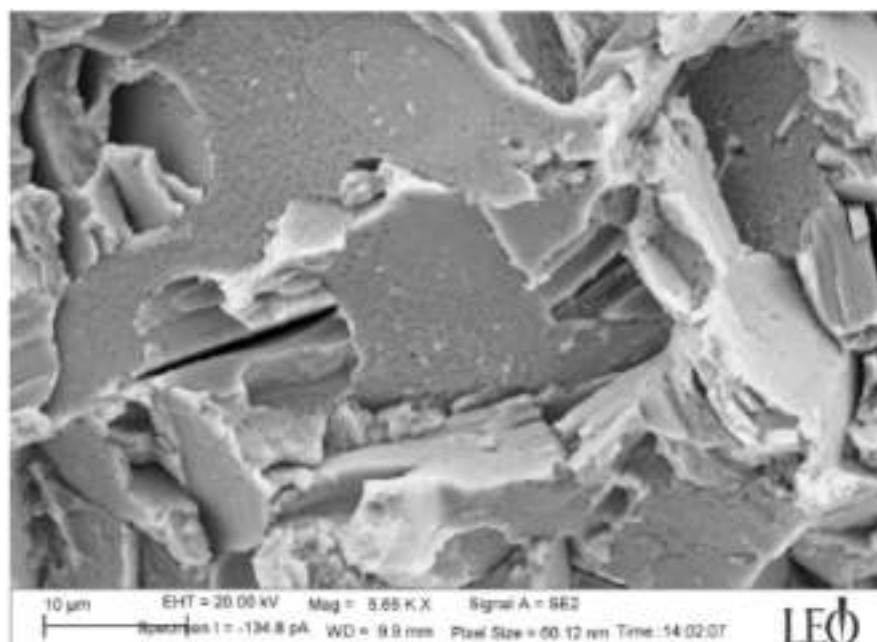


Рисунок 3.5 – Осад у зразку після старіння.

					КВРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

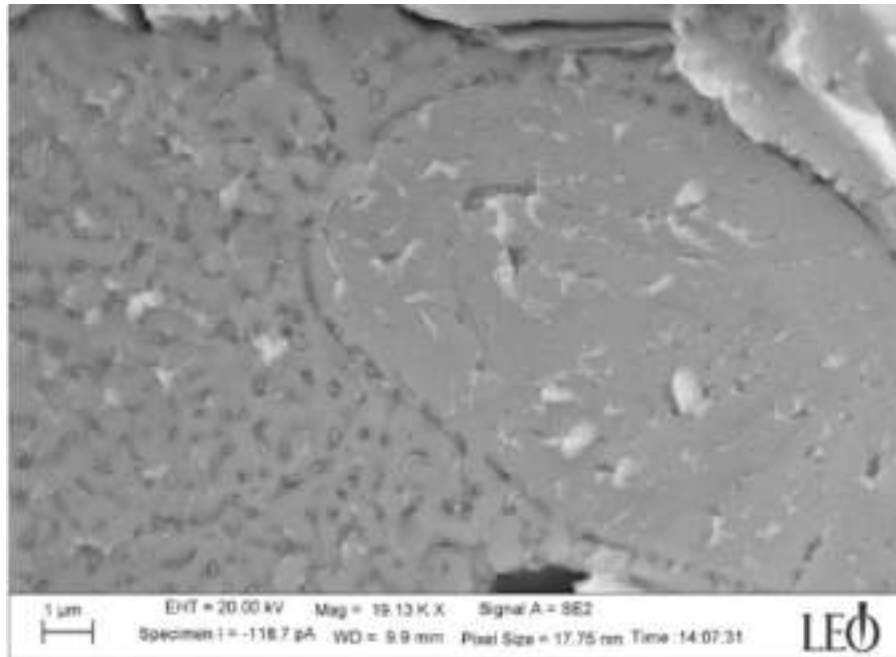


Рисунок 3.6 – Збільшене зображення рисунка 3.5, де можна побачити осадження на зразку після старіння.

Таблиця 3.5 – Аналіз складу чорної ділянки у зістареному зразку.

Елемент	Ваговий %	Атомний %
OK	1,05	3,31
AlK	13,1	24,54
CuK	1,07	0,85
ZnK	92,21	71,3
Всього	107,42	

У зістареному зразку можна спостерігати більші осади, ніж у новому.

Зразки під мікроскопом показують, що виниклі руйнування є крихкими. Можна розрізнити лише кілька заглиблень, що свідчить про незначну пластичну деформацію [8]. Крихке руйнування часто виникає, коли перевищено температуру переходу, і саме тому, ймовірно, виникли руйнування. Температури нижче $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ можна вважати критичними для руйнування при використанні Zamak 5.

Щоб знизити температуру переходу, щоб Zamak 5 міг витримувати навантаження за нижчих температур, можна збільшити вміст міді. Мідь має властивість зміцнювати сплав за нижчих температур. Однак мідь має властивість погіршувати сплав з точки зору старіння [8]. Тому, щоб отримати хороший баланс між легуючими елементами, необхідно провести більше випробувань.

Неметалеві легуючі елементи, інтерметалеві сполуки та інші домішки можуть утворювати осади на межах зерен, що, у свою чергу, призводить до меншої міцності матеріалу. Розмір зерна також має велике значення для міцності за знижених температур. Менший розмір зерна дає більшу міцність [9]. Температуру переходу Zamak 5 можна знизити, зменшивши розмір зерна.

У досліджуваному матеріалі відбувається осадження алюмінію. Осади можна знайти як у зістареному, так і в новому зразку. У зістареному зразку отримані більші осади, ніж у новому. Осад складається з когерентних частинок, які зростали при підвищенні температури, що забезпечує енергію для дифузії. У міру зростання когерентних частинок вони можуть утворювати некогерентні частинки. Ці частинки осідають на межах зерен і в критичних площинах зсуву. Некогерентні частинки не протидіють рухам дислокацій так добре, як когерентні частинки. Це призводить до нижчої межі текучості, що може бути одним із пояснень, чому зістарений зразок руйнувався легше порівняно з новим зразком [9]. Алюміній – це речовина, яка важко розчиняється в цинку, а це означає, що саме з алюмінію складається осад [8]. Щоб запобігти ослабленню матеріалу під час старіння, слід розглянути можливість заміни алюмінію як легуючого елемента. Замість цього потрібен легуючий елемент, який краще розчиняється в цинку та надає сплаву вищу плинність та міцність на розрив, як і алюміній [8].

Загалом, зразки мали багато пор, що може виникати під час лиття. Велика кількість пор послаблює компонент. У деяких тестових об'єктах кількість пор була більшою. Що, ймовірно, є дефектом після лиття. Це може

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
						58
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

бути однією з причин, чому деякі тестові об'єкти зламалися за заданої температури, а деякі ні.

Пористість у виливку виникає головним чином через розчинений газ у розплаві та зміни об'єму під час затвердіння. Газової пористості можна уникнути шляхом дегазації металу. Дегазація - це процес, який видаляє газ, розчинений у розплаві. Окрім виготовлення форми таким чином, щоб затриманий газ міг виходити. Щоб уникнути усадкової пористості, розплав необхідно подавати до останніх зон затвердіння виливка за допомогою живильника. Додаткове охолодження та ізоляція можуть бути використані для контролю затвердіння, щоб усі деталі затверділи одночасно та запобігли усадковій пористості [8].

Щоб переконатися, що саме температура переходу Zamak 5 є причиною крихкого руйнування, слід провести випробування маятником зі стрижнями, відлитими з Zamak5. Випробування проводяться в маятнику, який вимірює, скільки енергії потрібно для руйнування зразка. Ці випробування проводяться за різних температур, щоб визначити температуру, за якої матеріал переходить з пластичного стану на крихкий [8].

Випробування також слід проводити на стрижнях, які пройшли природний вік протягом тривалого періоду часу, щоб побачити, чи набувають вони тих самих властивостей матеріалу. Потім стрижні слід зберігати при кімнатній температурі протягом кількох років, щоб побачити, чи утворилися некогерентні частинки.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
						59
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

1. Пасивна безпека автомобіля є ключовим елементом захисту водія та пасажирів у разі дорожньо-транспортної пригоди. Вона базується на принципах обмеження руху тіла, поглинання енергії удару та збереження життєвого простору салону. Матеріали, що використовуються у виробництві елементів систем безпеки автомобіля, відіграють ключову роль у забезпеченні ефективного захисту водія та пасажирів.

2. У катушці ременя безпеки сплави Zamak застосовують переважно для литих корпусних, монтажних та кінематичних деталей, які повинні мати високу точність і жорсткість, але не працюють у режимі пружної або пластичної енергопоглинальної деформації.

3. Zamak 5 втрачає міцність у холодному та зістареному стані. Основна причина, чому сплав руйнується в холодному стані, полягає в тому, що температура потім падає нижче температури переходу. Зі старінням сплаву некогерентні частинки утворюються та осідають на межах зерен та критичних площинах зсуву, що призводить до зниження міцності.

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
						60
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Autoliv. Products and innovations. [Електронний ресурс]: <http://www.autoliv.com/ProductsAndInnovations/Pages/default.aspx>, (дата звернення 14.05.2026.)
2. Савченко О. В., Пащенко О. В. Системи пасивної безпеки автомобіля та їх конструктивні особливості // Вісник машинобудування. 2021. № 2. С. 45–53.
3. Бойко В. М., Ковальчук О. І. Надійність та безпека автомобільних транспортних засобів. Львів : Львівська політехніка, 2020. – 280 с.
4. Automotive seat belt market: global industry analysis 2025–2032. Persistence Market Research, 2025. – 200 p.
5. Kim J. H., Park G. J., Kim Y. M. та ін. Effect of seat belt use and airbags deployment on mortality in patients with road traffic injury // Signa Vitae. 2024. Vol. 20, No. 6. P. 58–66.
6. Li P., Zhang X., Wang Y. Study of AEB and active seat belt on driver injury in vehicle collisions // Scientific Reports. 2023. Vol. 13.
7. Airbag 2024 – 16th International Symposium on Integral Car Safety Systems Program. Mannheim, 2024. – 120 p.
8. Мазур В. Л., Дубровін М. І. Матеріалознавство конструкційних сплавів у машинобудуванні. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 352 с.
9. Кузьмін О. І., Ткаченко М. В. Ливарні сплави на основі цинку та їх експлуатаційні властивості. Харків : НТУ «ХП», 2018. – 310 с.
10. Руденко П. М., Мельник І. В. Мікроструктура та механічні властивості литих кольорових сплавів. Київ : НУБіП України, 2022. – 296 с.
11. Kallien, H. & Leis, W. Ageing of zink alloys. Aalen, Germany . International Foundry Research 64 (2011) No. 1, P. 1 – 23.
12. Anderson T. L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. 4th ed. Boca Raton : CRC Press, 2017. 752 p.

					КВРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

13. Williams D. B., Carter C. B. Transmission Electron Microscopy: A Textbook for Materials Science. 2nd ed. New York : Springer, 2018. 760 p.

14. Goldstein J., Newbury D., Joy D., Lyman C., Lifshin E., Sawyer L., Michael J. Scanning Electron Microscopy and X-ray Microanalysis. 4th ed. New York : Springer, 2018. 550 p.

15. Olympus BX53M. [Електронний ресурс]: <https://aina.kyiv.ua/product/mikroskop-medychnyj-mikrofotografichnyj-olympus-bx53/>, (дата звернення 17.05.2026.)

16. JEOL JSM-IT500. [Електронний ресурс] <https://www.labmakelaar.eu/shop/all/saleable/microscopes-and-microtomes/other-microscopes/jeol-jsm-it500-intouchscope-scanning-electron-microscope/>, (дата звернення 17.05.2026.)

					КВРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

ДОДАТКИ

					КвРМТВА. 22137.01.06.00	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		63