

УДК 343.983:629.33:614.84



<https://doi.org/10.33994/kndise.2026.71.35>

Голубенко Олег Миколайович

Генеральний директор ТОВ «Україно-німецьке підприємство «ДЕКРА Експерт» - дочірнього підприємства європейського експертного концерну DEKRA SE, член Європейської асоціації з дослідження та аналізу аварій (EVU), оцінювач колісних транспортних засобів з 2001 року



<https://orcid.org/0000-0002-9545-6515>
vakula.ua@gmail.com

Каширін Олег Вікторович

Керівник центру технічної підтримки (2003 -2024) АТ «Рено Україна» - дочірнього підприємства автомобільного концерну Renault Group, експерт за спеціальностями «Дослідження технічного стану транспортних засобів» та «Дослідження обставин і механізму дорожньо-транспортних пригод»



<https://orcid.org/0009-0002-9014-9716>
techliner505@gmail.com

Бібліографічний опис статті: Голубенко О.М., Каширін О.В. (2026). Оцінка технічного стану та відновлювального ремонту автомобілів після впливу небезпечних чинників пожежі в підземних паркінгах. *Криміналістика і судова експертиза*, 71, 532–562. doi: <https://doi.org/10.33994/kndise.2026.71.35>

ОЦІНКА ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ТА ВІДНОВЛЮВАЛЬНОГО РЕМОНТУ АВТОМОБІЛІВ ПІСЛЯ ВПЛИВУ НЕБЕЗПЕЧНИХ ЧИННИКІВ ПОЖЕЖІ В ПІДЗЕМНИХ ПАРКІНГАХ

Стаття присвячена дослідженню особливостей визначення обсягу та вартості відновлювального ремонту автомобілів, які перебували в зоні дії небезпечних чинників пожежі в підземних паркінгах без прямого впливу полум'я. Актуальність роботи зумовлена поширеністю випадків пошкодження транспортних засобів унаслідок теплового випромінювання, підвищених температур і задимлення, наслідки яких часто недооцінюються під час стандартної оцінки пошкоджень. **Метою дослідження** є обґрунтування комплексного підходу до визначення технічної можливості та економічної доцільнос-

ті відновлювального ремонту автомобілів, що зазнали непрямого впливу пожежі. **Наукова новизна** роботи полягає в обґрунтуванні застосування лінії критичних температур як інструменту визначення обсягу післяпожежного ремонту автомобілів без прямого горіння. Практичне значення результатів полягає у формуванні методичного підходу до комплексної оцінки технічного стану транспортних засобів після впливу пожежі та визначення вартості їх відновлення. У роботі застосовано методи пожежно-технічного аналізу, автотехнічної експертизи та матеріалознавчих досліджень. Запропоновано використання методу лінії критичних температур для визначення зон автомобіля, у яких температурний вплив перевищував допустимі режими працездатності електронних, електричних і полімерних компонентів. Проведено ідентифікацію полімерних матеріалів пошкоджених деталей та аналіз їх температурної стійкості. Оцінено вплив задимлення на санітарно-гігієнічний стан транспортного засобу. Установлено, що температура 70–80 °C є критичною для більшості електронних систем (зокрема системи пасивної безпеки SRS) та значної частини полімерних матеріалів. **Висновки.** Доведено, що навіть за відсутності видимих ознак горіння автомобіль може зазнавати прихованих ушкоджень, які впливають на його безпеку та надійність. Показано, що вартість повного відновлювального ремонту таких автомобілів може становити близько 50% їх ринкової вартості, що ставить під сумнів економічну доцільність ремонту.

Ключові слова: пожежа в підземному паркінгу, теплове випромінювання, задимлення, лінія критичних температур, полімерні матеріали, відновлювальний ремонт, економічна доцільність.

Golubenko Oleg

CEO of LLC 'Ukrainian-German enterprise 'DEKRA Expert' – a subsidiary of the European expert group DEKRA SE; member of the European Association for Accident Research and Analysis (EVU); vehicle appraiser since 2001



<https://orcid.org/0000-0002-9545-6515>
vakula.ua@gmail.com

Kashyrin Oleg

Head of the Technical Support Center (2003–2024), JSC 'Renault Ukraine' – a subsidiary of the Renault Group; expert in the specialties 'Study of the technical condition of vehicles' and 'Study of the circumstances and mechanism of road traffic accidents'



<https://orcid.org/0009-0002-9014-9716>
techliner505@gmail.com

ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION AND RESTORATIVE REPAIR OF VEHICLES AFTER EXPOSURE TO HAZARDOUS FIRE FACTORS IN UNDERGROUND PARKING GARAGES

To cite this article: Golubenko O.M., Kashyryn O.V. (2026). Otsinka tekhnichnoho stanu ta vidnovliuvalnoho remontu avtomobiliv pislia vplyvu nebezpechnykh chynnykiv pozhezhi v pidzemnykh parkinhakh [Assessment of the technical condition and restoration repair of vehicles after exposure to hazardous fire factors in underground parking lots]. *Criminalistics and Forensics*, 71, 532–562 doi: <https://doi.org/10.33994/kndise.2026.71.35>

The article is dedicated to the study of the specifics of determining the scope and cost of restoration repairs for vehicles located in the zone of hazardous fire factors in underground parkings without direct flame contact. The relevance of the work is driven by the prevalence of vehicle damage resulting from thermal radiation, elevated temperatures, and smoke — the consequences of which are often underestimated during standard damage assessments. **The purpose of the study** is to justify a comprehensive approach to determining the technical feasibility and economic viability of restoration repairs for vehicles subjected to indirect fire exposure. **The scientific novelty** of the work lies in the justification of applying the “critical temperature line” as a tool for determining the scope of post-fire repairs for vehicles without direct combustion. The practical significance of the results consists in the formation of a methodological approach for the comprehensive assessment of the technical condition of vehicles after fire exposure and the determination of their restoration cost. The study applies methods of fire-technical analysis, automotive forensic examination, and material science research. The use of the critical temperature line method is proposed to identify vehicle zones where temperature exposure exceeded the permissible operational modes of electronic, electrical, and polymer components. The research includes the identification of polymer materials of damaged parts and an analysis of their thermal stability. The impact of smoke on the sanitary-hygienic condition of the vehicle is also evaluated. It has been established that a temperature of 70–80 °C is critical for most electronic systems (specifically the Supplemental Restraint System — SRS) and a significant portion of polymer materials. **Conclusions.** It is proven that even in the absence of visible signs of combustion, a vehicle may sustain hidden damages that affect its safety and reliability. It is shown that the cost of full restoration repairs for such vehicles can amount to approximately 50% of their market value, which calls into question the economic feasibility of the repair.

Key words: underground parking fire, thermal radiation, smoke contamination, critical temperature line, polymer materials, restorative repair, economic feasibility.

Постановка проблеми

Автомобільні пожежі є досить розповсюдженим явищем, в наслідок якого щорічно сотні автомобілів зазнають досить серйозних пошкоджень, більшість із яких роблять післяпожежний ремонт нерентабельним або технічно неможливим. Втім до цього часу вважалося за можливе відновлення автомобілів, які не було пошкоджено вогнем, але які зазнали дії таких небезпечних чинників як теплове випромінювання, задимлення та висока температура.

Найбільш часто пошкодження автомобіля без прямого його горіння стається у підземних паркінгах під час пожежі, що виникла в іншому автомобілі, коли між автомобілями є відстань, яка перевищує 4 метри, в наслідок чого вогонь фізично не може перекинутися на інший автомобіль. Тим не менш, навіть такої відстані достатньо для того, щоб цей автомобіль зазнав пошкоджень у вигляді оплавлення деталей, які виготовлені із полімерних матеріалів, задимлення салону, моторного відсіку та багажника.

Як правило, для відновлення таких автомобілів застосовувались такі види ремонтного впливу, які мийка, хімічстка та заміна пошкоджених деталей. Але, як показує практика, в більшості випадків ці технологічні операції не є достатніми для того, щоб відремонтований автомобіль зберіг свої експлуатаційні та споживчі якості, серед яких найбільш важливими є його безпека, комфорт та довговічність.

Ця стаття має за мету підняти та освітити проблему ремонту таких автомобілів, а також запропонувати методи та підходи до визначення обсягу та повноти ремонту, а також оцінки його вартості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

У наукових і прикладних публікаціях, присвячених автомобільним пожежам, значна увага традиційно приділяється причинам загоряння транспортних засобів, динаміці процесу горіння та небезпечним чинникам пожежі [1–3]. Разом з тим, у більшості таких робіт основний акцент робиться на випадках прямого горіння автомобіля, тоді як питання оцінки пошкоджень транспортних засобів, що перебували в зоні теплового та димового впливу без безпосереднього контакту з полум'ям, розглядається фрагментарно.

Експериментальні дослідження пожеж автомобілів у замкнених просторах підтверджують, що під час горіння в підземних паркінгах формується зона гарячих газів і диму з підвищеними температурними показниками. Зокрема, результати повномасштабних випробувань, наведених у роботах [1], свідчать про те, що температура диму в умовах пожежі може досягати значень, критичних для полімерних матеріалів та електронних компонентів транспортних засобів, навіть за відсутності перекидання полум'я. Це створює передумови для виникнення прихованих термічних ушкоджень автомобілів,

розташованих поблизу осередку пожежі.

У роботах, присвячених поширенню пожежі між транспортними засобами [1, 2], показано, що вирішальну роль у пошкодженні суміжних об'єктів відіграють не лише контакт полум'я, а й теплове випромінювання та конвективний перенос нагрітих продуктів горіння. Для підземних паркінгів характерним є накопичення гарячих газів під перекриттям, що обумовлює тривалий тепловий вплив на верхні частини кузова автомобілів і розташовані в них елементи.

Важливим нормативним підґрунтям для оцінки наслідків такого впливу є стандарт ISO 16750-4 [4], який встановлює допустимі температурні режими експлуатації електричного та електронного обладнання автомобілів залежно від місця їх встановлення. Аналіз положень цього стандарту показує, що для значної частини компонентів, розміщених у салоні, дверях і багажному відсіку, верхні межі робочих температур є істотно нижчими за температури, які можуть виникати під час пожежі в підземному паркінгу. Це дає підстави вважати перевищення таких температур потенційно небезпечним навіть у разі відсутності зовнішніх ознак пошкодження.

Окрему групу публікацій становлять роботи, присвячені впливу диму та продуктів горіння на матеріали й середовище після пожежі [5-8]. У них показано, що дрібнодисперсні частинки та токсичні сполуки адсорбуються поверхнями й матеріалами та можуть зберігатися протягом тривалого часу. Зазначається, що стандартні методи очищення не завжди забезпечують повне усунення небезпечних речовин і потребують комплексного підходу до оцінки та відновлення. Хоча ці дослідження здебільшого стосуються будівельних конструкцій, їхні висновки є релевантними й для оцінки стану салонів автомобілів після задимлення.

Таким чином, аналіз наявних досліджень і публікацій свідчить, що проблема впливу теплового випромінювання, високої температури та диму на автомобілі в умовах пожежі є добре обґрунтованою з пожежно-технічної та нормативної точок зору. Водночас у літературі недостатньо систематизовано підходи до визначення обсягу відновлювальних робіт і вартості ремонту автомобілів, які не зазнали прямого горіння, але перебували в зоні дії небезпечних чинників пожежі. Це зумовлює необхідність розроблення комплексних методів оцінювання, що поєднують пожежно-технічні, матеріалознавчі та автотехнічні критерії, що і є предметом подальшого дослідження в цій статті.

Мета дослідження

Метою дослідження є обґрунтування комплексного підходу до визначення обсягу та вартості відновлювального ремонту автомобілів, які зазнали впливу пожежі в підземних паркінгах без прямого горіння, із урахуванням дії високої температури, теплового випромі-

нювання та задимлення.

Для досягнення поставленої мети у роботі передбачено:

1. встановлення умов і характеру теплового та димового впливу на автомобіль у замкненому просторі під час пожежі;
2. визначення критичних температурних меж для електронних, електричних і полімерних компонентів транспортного засобу на підставі нормативних і матеріалознавчих даних;
3. обґрунтування можливості застосування методу лінії критичних температур для ідентифікації зон потенційно небезпечного термічного впливу;
4. оцінювання впливу задимлення на експлуатаційні, безпекові та санітарно-гігієнічні властивості автомобіля;
5. розроблення підходів до визначення обсягу відновлювальних робіт і розрахунку вартості ремонту з урахуванням вимог безпеки та нормативної документації.

Виклад основного матеріалу

Об'єктом дослідження був автомобіль LEXUS LX 450d та обставини, за яких він зазнав впливу пожежі в підземному паркінгу.



Зображення 1. Світлини, на яких зафіксоване місце знаходження автомобіля LEXUS LX450d в паркінгу багатоквартирного житлового будинку під час виникнення пожежі

Встановлено, що автомобіль знаходився на відстані 7,0–7,5 м від автомобіля AUDI Q5, у якому виникла пожежа внаслідок короткого замикання в електропроводці.



Зображення 2. Світлина, на якій зафіксоване місце знаходження автомобіля LEXUS в паркінгу по відношенню до автомобіля на якому виникла пожежа

Під час огляду автомобіля LEXUS зафіксовано такі пошкодження: термічну деформацію заглушок молдингів даху; деформацію та часткове обуглення корпусу антени; деформацію накладок дверей; деформацію корпусів зовнішніх дзеркал заднього виду; порушення герметичності задніх ліхтарів; ушкодження ущільнювачів дверей. У салоні автомобіля виявлено сліди задимлення у вигляді відкладень сажі.

За результатами огляду, проведеного фахівцями СТО офіційного дилера марки LEXUS, було складено рахунок на відновлювальний ремонт на суму 222 623,58 грн.

Згідно з указаним рахунком, передбачалося виконання заміни таких складників: спойлера даху; хромованих накладок правих і лівих задніх дверей; задніх ліхтарів (правого та лівого) і декоративних накладок до них; корпусу антени; скла задніх боковин (правої та лівої); молдинга скла передніх правих дверей; молдингів кузова; молдингів даху разом із заглушками; ущільнювачів дверей; кожухів

бічних дзеркал та ручок дверей. Крім того, до рахунку включено роботи з розбирання та збирання, мийки, полірування і фарбування правих передніх та правих задніх дверей, а також вартість відповідних матеріалів.



Зображення 3. Світлини, на яких зафіксовані пошкодження автомобіля LEXUS

Пожежно-технічна оцінка умов впливу. Як відомо, явища, що супроводжують пожежу, мають просторові зони впливу, які умовно поділяють на зону горіння, зону теплової дії, а також зону задимлення і поширення токсичних газів.

У досліджуваному випадку автомобіль LEXUS перебував поза зоною горіння, однак знаходився в зоні теплової дії та зоні задимлення і поширення токсичних газів. Вплив зазначених чинників проявився у вигляді термічної деформації окремих полімерних деталей автомобіля, а також у відкладенні сажі на його поверхнях і в салоні.

Тепловий вплив на автомобіль здійснювався внаслідок **теплого випромінювання** та **конвективного перенесення тепла гарячими газами/продуктами горіння** [9], Типові температури для вуглеводневих пожеж становлять порядок **~1100 °C**, а у випробуваннях горіння транспортних засобів фіксуються локальні максимуми понад **1000 °C** [10]. Для сусідніх транспортних засобів у багатоповерхових/підземних паркінгах інцидентні рівні теплового потоку можуть залишатися **нижче 5 кВт/м²** (а в окремих зонах — **нижче 3 кВт/м²**), що узгоджується з оцінками безпечних/граничних умов поширення пожежі між автомобілями [11].

З урахуванням наведеного можна стверджувати, що в досліджуваному випадку умови для загоряння автомобіля LEXUS були відсутні, що підтверджується відсутністю слідів прямого горіння. Водночас дія теплового випромінювання та нагрітих продуктів горіння призвела до ушкодження низки елементів автомобіля.

Під час зовнішнього огляду зафіксовано численні ознаки термічного впливу, зокрема деформацію спойлера та корпусу антени, зміну кольору молдингів кузова, локальні деформації зовнішніх пластикових накладок дверей і корпусів зовнішніх дзеркал заднього виду. Скляні елементи кузова та дверей візуально ушкоджень не мали. Встановлено також початкові ознаки термодеструкції гумових ущільнювачів дверей, переважно у їх верхніх частинах.

Огляд салону автомобіля показав, що після пожежі проводились роботи з очищення, однак у багажному відділенні, суміщеному з салоном, збереглися відкладення сажі. Після повторної мийки виявлено запотівання внутрішньої поверхні задніх ліхтарів, що свідчить про порушення їх герметичності внаслідок термічного впливу та деградації ущільнювальних матеріалів.

Огляд моторного відсіку не виявив візуальних ознак термічних ушкоджень полімерних і гумових деталей, а також не було зафіксовано слідів теплового впливу на шини коліс автомобіля.

З урахуванням характеру тепломасопереносу в закритому приміщенні з переважним накопиченням нагрітих продуктів горіння під перекриттям можна зробити висновок, що в зоні розташування даху автомобіля LEXUS температура під час пожежі могла досягати значень до 200 °С, з поступовим зниженням у напрямку до підлоги паркінгу. Подальші дослідження виконувалися із застосуванням методів автотехнічної та автотоварознавчої експертизи, а також матеріалознавчого аналізу.

Критерії оцінки характеру пошкоджень. Оцінка автомобіля, пошкодженого внаслідок пожежі, передбачає визначення вартості та рентабельності можливого відновлювального ремонту, необхідного для забезпечення його подальшої належної експлуатації. Окрім видимих пошкоджень, у таких транспортних засобів можуть бути наявні приховані ушкодження, зокрема термічно уражені кабелі та джгути електропроводки, деформовані пластикові елементи інтер'єру, електричні з'єднання та інші компоненти [12].

Крім того, салон автомобіля, що зазнав впливу пожежі, як правило, забруднений продуктами горіння та токсичними речовинами, оскільки ущільнення скла і дверей не забезпечують повної герметичності внутрішнього простору [14]. За даними досліджень, навіть у випадках, коли транспортний засіб має лише зовнішні ознаки пошкоджень, його внутрішні об'єми зазнають контамінації. Відсутність характерного запаху не може розглядатися як доказ безпечності салону для перебування людей, оскільки, зокрема, діоксини, що утво-

рюються під час горіння полімерних матеріалів, є небезпечними канцерогенними сполуками [13].

Базовими критеріями для визначення обсягу відновлювального ремонту у дослідженні були вимоги пункту 4.7 Методики визначення обсягу ремонтних дій при встановленні розміру матеріального збитку [15], згідно з якими технічна можливість відновлювального ремонту передбачає:

а) забезпечення подальшої безпечної експлуатації колісного транспортного засобу відповідно до нормативно-правових актів України;

б) вибір способів відновлювального ремонту з урахуванням вимог виробника КТЗ, законодавства та цільового призначення складників, які забезпечують технічно справний стан КТЗ, його міцність, жорсткість, довговічність, надійність та зовнішній вигляд, максимально наближений до стану до пошкодження;

в) застосування матеріалів і складників, що забезпечують проведення якісного відновлювального ремонту;

г) наявність відповідних технологій усунення виявлених пошкоджень;

г) наявність згоди виробника КТЗ на застосування технологій ремонту, не розроблених безпосередньо виробником;

д) дотримання вимог виробника ремонтного обладнання щодо технології виконання ремонтних робіт;

е) виконання екологічних та санітарно-гігієнічних вимог безпеки відповідно до чинного законодавства.

Відповідно до пункту 4.10 зазначеної Методики, виконання вимог до відновлювального ремонту в частині безпеки означає, що відремонтований КТЗ повинен забезпечувати не нижчий рівень безпеки для водія, пасажирів, пішоходів і довілля, ніж той, який існував до отримання первісних пошкоджень.

Метод лінії критичних температур. З метою аналізу характеру та походження складників транспортного засобу, що виникли внаслідок пожежі, у дослідженні використано підхід, описаний у роботі «Indicazioni per l'attività di indagine relativa ad incendi di autoveicoli», підготовленій підрозділом поліції м. Рим з розслідування пожеж [16]. Зазначений підхід ґрунтується на візуальній інтерпретації деформацій і слідів термічного впливу на кузовні елементи автомобіля із застосуванням умовно нанесених «червоних ліній», розбіжність або викривлення яких дає змогу відмежувати ділянки, що зазнали впливу пожежі чи стороннього механічного втручання, від ділянок без відповідних ушкоджень.

Таблиця 1. Зведені дані з таблиці 1 та таблиці А1 стандарту ISO 16750-4-2010.

Місце встановлення		Код рекомендаційних робочих температур (Згідно з таблицею 1 стандарту ISO 16750-4-2010)	Мінімально допустиме значення (Т°С).	Максимально допустиме значення (Т°С).
Моторне відділення	в конструкції	L, O	- 40	110-125
	в оточенні	H	- 40	90
	на двигуні	O, Q	- 40	125-140
	в двигуні	O, Q	- 40	125-140
	на трансмісії	Q	- 40	140
	в трансмісії	Q	- 40	140
Пасажирський салон	без особливих вимог	D	-40	70
	ті, на які впливає сонячне випромінювання	H	-40	90
	ті, на які впливає теплове випромінювання	J	-40	100
Багажне відділення/вантажне відділення		E	-40	75
Монтаж зовні / в порожнинах	в конструкції	E	-40	75
	в оточенні	E	-40	75
	під кузовом / колісної аркою	H	-40	90
	в/на дверях салону	E	-40	75
	в капоті	N	-40	120
	в кришці/дверях багажного відділення	D, E	-40	70-75
	в інших порожнинах.	D	-40	70

У межах цього дослідження зазначений метод було адаптовано для відокремлення зон автомобіля, в яких температурні значення перевищували допустимі теплові режими, встановлені для відповідних складників.

Температурні режими працездатності електричних та електронних компонентів, що застосовуються в конструкції сучасних автомобілів, визначаються стандартом ISO 16750-4:2010 «Дорожньо-транспортні засоби. Умови навколишнього середовища і випробування

електричного та електронного обладнання. Частина 4. Кліматичні навантаження» [4], положення якого було використано як нормативну основу подальшого аналізу.

Таким чином, у ході дослідження встановлено, що температура 80 °С є критичною граничною для сучасних автомобілів. Це зумовлено передусім тим, що температурний режим працездатності значної частини електронних компонентів, які розміщуються в пасажирському салоні та багажному відсіку, перебуває в діапазоні від -40 до 70–75 °С (див. таблицю 1). Аналогічні температурні обмеження характерні і для джгутів електропроводки, для яких максимальна допустима температура становить до 83 °С у підкапотному просторі та до 73 °С — в інших зонах автомобіля.



Зображення 4. Фотографія автомобіля LEXUS LX 450d на місці пожежі з зазначенням лінії, на якій під час пожежі температура могла скласти 89 °С

Електронні компоненти, що встановлюються в моторному відділенні, як правило, розраховані на дещо вищі температурні режими працездатності (див. таблицю 1), однак і для них перевищення встановлених меж може призводити до деградації матеріалів та порушення функціонування. Як буде показано далі, температура 80 °С є також критичною для низки полімерних матеріалів, з яких виготовляються кузовні деталі та інші конструктивні елементи автомобіля.

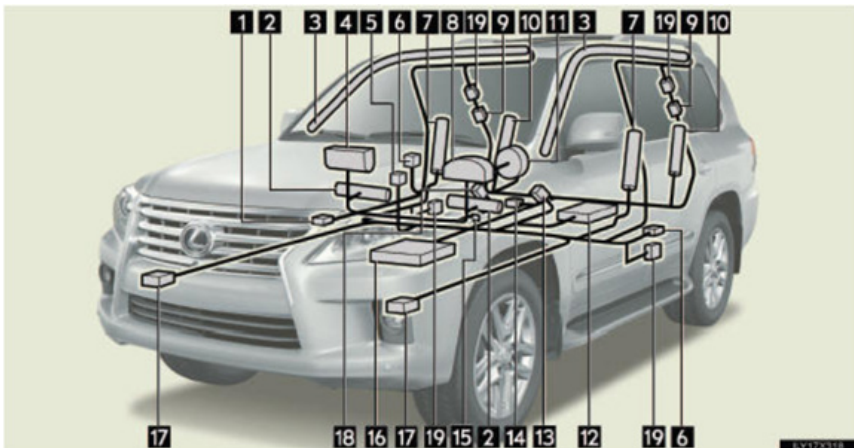
З огляду на викладене, для подальшого дослідження принципово важливим є визначення лінії критичних температур, що відповідає температурному діапазону 70–80 °С. Її положення було ви-

вих і електричних чинників на елементи пасивної безпеки [17].

Крім того, у керівному документі корпорації General Motors «Product Safety Recall 15043 – Driver Air Bag Replacement» компоненти системи SRS (подушки безпеки, переднатягувачі ременів, пристрої активації дуги безпеки) класифікуються як піротехнічні вибухи, для яких вплив температур понад $+100\text{ }^{\circ}\text{C}$ (для переднатягувачів ременів і пристроїв активації дуги безпеки) є критичним, а також прямо зазначено, що такі компоненти підлягають обов'язковій заміні навіть у разі їх падіння на тверду поверхню без видимих механічних пошкоджень [18].

Суворі температурні обмеження для елементів SRS встановлюються і в сервісній документації Tesla, де вказується, що модулі подушок безпеки та переднатягувачів ременів не допускається піддавати нагріванню понад $85\text{--}93\text{ }^{\circ}\text{C}$, що підтверджує їх високу чутливість до теплового впливу [19].

Небезпечний характер дії підвищених температур на компоненти системи пасивної безпеки також підтверджується матеріалами Національного управління безпеки дорожнього руху США (NHTSA) у межах розслідувань і відкликань подушок безпеки Takata, де встановлено, що тривалий вплив високих температур і теплового старіння може призводити до деградації піротехнічних елементів, неконтрольованого спрацювання або вибухового руйнування інфляторів, що створює безпосередню загрозу життю та здоров'ю людей [20,21].



Зображення 6. Схематичний вигляд системи пасивної безпеки SRS автомобіля LEXUS LX 450d де під номером 3 зазначено місце розташування бічних шторок під дахом автомобіля [27]

Таким чином, сукупність вимог автовиробників і матеріалів регуляторних органів свідчить про те, що навіть короточасний вплив підвищених температур на компоненти системи SRS є неприпустимим і повинен розцінюватися як фактор, що може зумовлювати втрату експлуатаційної придатності та безпечності таких елементів.

Шторки безпеки SRS (Supplemental Restraint System) конструктивно установлюються вздовж верхньої частини бічних лонжеронів даху і закриті зсередини обшивкою стелі. Зовні вони відокремлені від нагрітого газового шару під перекриттям даху тонким зовнішнім металевими листами (у зоні підсилення лонжерона — 2–3 листи), повітряними порожнинами короба й внутрішньою обшивкою стелі (неткані/ткані шари з поліуретановою піною). Сукупно ці шари формують термічний бар'єр між гарячим підстельовим струменем і повітрям безпосередньо під обшивкою. Посилення ізоляції, відповідно до конструктивних особливостей автомобілів, зменшує проникнення тепла до салону саме у верхній зоні, збільшуючи тебровий «бар'єр».

Під час пожежі під перекриттям формується гарячий підстельовий струмінь, температура якого і її затухання з відстанню описуються в роботі [27]. Саме цю температуру під стелею над дахом авто доцільно брати як T_{ext} у розрахунках. Температура повітря безпосередньо під обшивкою може бути істотно нижчою за T_{ext} , але при високих зовнішніх температур перепад ΔT на «бар'єрі» обмежений і верхня зона салону здатна досягати порогів обмеження для систем SRS

$$T_{cab,top} \approx T_{ext} - \Delta T_{бар'єр},$$

де:

$T_{cab,top}$ — температура повітря під обшивкою стелі (у зоні шторок),

T_{ext} — зовнішня температура гарячого шару під перекриттям,
 $\Delta T_{бар'єр}$ — ефективний перепад на пакеті «дах– обшивка стелі».

З урахуванням для зведених моделей салонів приймаємо реалістичний коридор $\Delta T_{бар'єр} = 20\text{--}60$ °C: нижча межа відповідає інтенсивному обдуванню й мінімальній ізоляції; вища — наявності ізоляційних/відбивних прошарків і слабкої внутрішньої конвекції біля стелі.

Враховуючи те, що модулі подушок безпеки (в даному випадку бічних шторок) не допускається піддавати нагріванню понад 85–93 °C, розраховуємо мінімально небезпечні зовнішні температури найменша $T_{ext, min}$, за якої зона шторок досягає критичного діапазону SRS:

$$T_{ext,min} = T_{поріг\ SRS} + \Delta T_{бар'єр}.$$

Для нижнього порогу T попір $SRS=85^{\circ}\text{C}$:

- ◆ за «слабкого» бар'єра ($\Delta T=20$): $T_{\text{ext,min}} \approx 105^{\circ}\text{C}$;
- ◆ за «сильнішого» бар'єра ($\Delta T=60$): $T_{\text{ext,min}} \approx 145^{\circ}\text{C}$

Для верхнього порогу T попір $SRS=93^{\circ}\text{C}$:

- ◆ за «слабкого» бар'єра ($\Delta T=20$): $T_{\text{ext,min}} \approx 113^{\circ}\text{C}$;
- ◆ за «сильнішого» бар'єра ($\Delta T=60$): $T_{\text{ext,min}} \approx 153^{\circ}\text{C}$

Тобто уже за зовнішніх $105\text{--}113^{\circ}\text{C}$ зона шторок стає критичною при «слабкому» бар'єрі, а за кращої ізоляції критичний рубіж досягається приблизно при $145\text{--}153^{\circ}\text{C}$

Конструкція даху (зовнішні листи + коробки/порожнини) і ізоляційний оббивка дійсно формують термічний бар'єр, але при пожежних температурах під стелею верхня зона салону досягає критичних для SRS $85\text{--}93^{\circ}\text{C}$ навіть за коротких час впливу.

Отже, за встановлених вогнетехнічно зовнішніх температур $\geq 105\text{--}113^{\circ}\text{C}$ (для «слабкого» бар'єра) або $\geq 145\text{--}153^{\circ}\text{C}$ (для «сильнішого» бар'єра) системи SRS (шторки) підлягають вибраковці незалежно від наявності видимих термодефектів.

Крім системи SRS , небезпечного температурного впливу зазнали також електронні та електричні компоненти інших систем автомобіля. Зокрема, у зоні критичних температур (зображення 27) знаходилися: елементи системи контролю тиску в шинах, блоки керування люком, мультимедійними та електроприводними системами, блоки керування електроприводом задніх дверей, дзеркалами, паливним насосом, системами ANC , $TEMS$, $Multiplex$ та інші електронні модулі.

Відповідно до стандарту $ISO\ 16750\text{-}4:2010$, з урахуванням місць розташування зазначених компонентів, максимально допустима температура навколишнього середовища для них становить $70\text{--}75^{\circ}\text{C}$. З огляду на те, що фактична температура впливу була істотно вищою, такі компоненти підлягають заміні навіть за відсутності видимих пошкоджень, оскільки їх подальша працездатність і надійність не можуть бути гарантовані.

Крім того, у зоні критичних температур перебували численні електронні компоненти, розміщені на панелі приладів автомобіля, зокрема: комбінація приладів, перемикачі освітлення, склоочисників і систем допомоги водієві, мультимедійні та навігаційні модулі, елементи керування кліматичною системою, системами безпеки, паркування, доступу до салону, освітленням і допоміжними функціями. З урахуванням їх функціонального призначення та температурних обмежень, такі компоненти також розглядаються як потенційно небезпечні для подальшої експлуатації після високотемпературного впливу.

Матеріалознавчий аналіз полімерних деталей. Як зазначалося вище, окрім електронних та електричних компонентів, у зоні критичного температурного впливу перебувала також значна кількість кузовних деталей і інших автомобільних компонентів, виготовлених із полімерних матеріалів. З метою оцінки впливу підвищених температур на зазначені елементи було складено зведену таблицю, в якій наведено інформацію щодо типів полімерів, з яких виготовлені відповідні компоненти автомобіля, а також значення температур, критичних для їхньої експлуатаційної придатності

Таблиця 2. Полімери, що застосовуються в конструкції сучасних автомобілів, та їх температурні показники

Сфера застосування	Тип полімера	Діапазон температур розм'якшення °C за Vicat	Мінімальне та максимальне значення °C
Бампер	PP/PP+EPDM/ABS/PC/RIM PU/ HDPE	85-90/ 140-152/ 90-121/ 150-155/ 85-100/100	85-155
Сидіння	PUR/PP/PVC/ABS/PA	85-100/ 85-90/ 70-80/ 90-121/60- 100	70-121
Панель приладів	PP/ABS/PPE/PC	85-90/ 90-121/ 100/ 150-155	85-155
Паливна система	HDPE/POM/PA/PP/PBT	100/ 120-170/100/ 85-90/ 50-100	85-170
Кузов та кузовні панелі	PP/PPE/UP/ABS-MAT	85-90/ 100/ 120/ 90-121	85-121
Підкапотні компоненти	PA/PP/PBT	100/ 85-90/ 50-100	50-100
Внутрішнє оздоблення	PP/ABS/PET/POM/PVC	85-90/ 90-121/ 70-80/120- 170/ 70-80	70-170
Електричні компоненти	PP/PE/PBT/PA/PVC	85-90/ 60-70/50-100/ 100/ 60-80	60-100
Зовнішні пластикові елементи кузова	ABS/PA/PBT/POM/ASA/PP/TPE	90-121/ 100/50-100/ 120-170/ 50-100/ 85-90/ 70-80 °C	50-170
Світлотехніка	PP/PC/ABS/PMMA/UP	85-90/ 150-155/ 90-121/ 84-108/120	84-155
Обшивка салону	PVC/PUR/PP/PE	70-80/85-100/ 85-80/ 60-70	60-100
Бачки для технологічних рідин	PP/PE/PA	85-90/ 60-70/ 100	60-100

Примітка: Температурні показники полімерних матеріалів наведено відповідно до даних міжнародних матеріалознавчих баз **MatWeb** та довідкових ресурсів організації **PlasticsEurope**, що узгоджуються з типами полімерів, які застосовуються у конструктив-

них елементах сучасних автомобілів (PP, ABS, PC, PA, PBT, PET, PVC, HDPE, PMMA). Дані цих джерел підтверджують діапазони температур розм'якшення/робочих температур полімерних матеріалів, аналогічні до наведених у таблиці.

Як видно з таблиці 2, діапазони критичних температур для різних полімерних матеріалів істотно відрізняються, у зв'язку з чим ідентифікація типу полімеру, з якого виготовлено окремі компоненти автомобіля LEXUS LX 450d, має принципове значення.

Ідентифікація полімерів може здійснюватися шляхом зчитування маркування, нанесеного на пластикові деталі. У разі відсутності маркування або неможливості його зчитування застосовуються методи визначення фізико-хімічних властивостей, характерних для конкретних видів полімерів. За відсутності можливості використання зазначених методів ідентифікація може здійснюватися шляхом аналізу довідкових та відкритих інформаційних джерел.

З метою зчитування маркування полімерних матеріалів було проведено додатковий огляд автомобіля LEXUS як у частково розібраному стані, так і окремо демонтованих пластикових деталей. У результаті зчитування маркування встановлено, що зняті з автомобіля пластикові елементи виготовлені з полімерів ASA, ABS, PP та PE.

Під час огляду підземного паркінгу, в якому сталася пожежа, у зоні розташування автомобіля LEXUS було виявлено пластиковий елемент кріплення, який з високою ймовірністю належав цьому транспортному засобу (Зображення 7-8). З метою перевірки його фізичних властивостей проведено простий експеримент: елемент було поміщено у воду. У ході експерименту встановлено, що зазначений елемент не тоне (Зображення 8-9), що відповідає характеристикам полімерних матеріалів, використаних у конструкції досліджуваного автомобіля.



Зображення 7. Узлове фото правої задньої частини даху автомобіля LEXUS LX 450d.



Зображення 8. Детальне фото пластикового елемента кріплення, який було знайдено під час огляду місця події.



Зображення 9. Фотофіксація експерименту з пластиковим елементом (вид на ємкість з пластиковим елементом зверху)



Зображення 10. Фотофіксація експерименту з пластиковим елементом (вид на ємкість з пластиковим елементом збоку)

Згідно з інформацією, наведеною у відкритому науково-довідковому джерелі [22], у воді не тонуть полімери HDPE, LDPE та PP, оскільки їх щільність є меншою за щільність води.

З урахуванням того, що полімер HDPE у автомобілебудуванні використовується переважно в елементах сидінь із піноматеріалами, у системах бамперів, а також для виготовлення складників паливної системи [23], а полімер LDPE у конструкціях автомобільних деталей практично не застосовується, є підстави вважати, що виявлений під час огляду підземного паркінгу пластиковий елемент кріплення виготовлений з полімеру PP (поліпропілену).

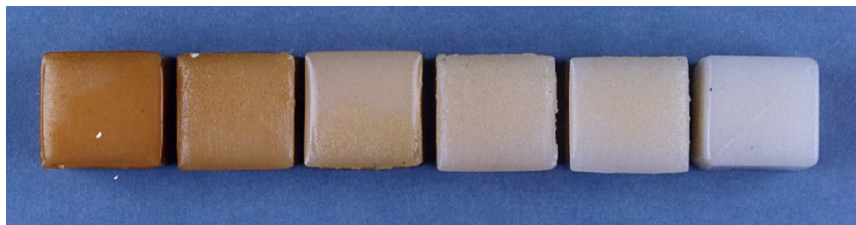
На підставі отриманої інформації було складено зведену Таблицю 3 з зазначенням типів матеріалів, з яких виготовлено конкретні деталі автомобіля.

Таким чином, завдяки ідентифікації типів полімерів, з яких виготовлено пластикові деталі, що зазнали впливу пожежі, а також аналізу їх фізико-механічних властивостей, можна дійти висновку, що температури, яким піддавалися зазначені елементи під час пожежі, суттєво перевищували їхні допустимі робочі режими. Зокрема, встановлено, що температурний вплив перебував вище температури плавлення для полімерів ASA, PP та EPDM, або в межах температурного діапазону плавлення для полімерів TPE та ABS.

Отримання інформації про те, що накладка заднього бічного скла виготовлена з полімеру ABS, дозволило також обґрунтувати зміну її кольору з хромованого на коричнево-жовтий під час пожежі (зображення 55). Згідно з науковими даними, за тривалого впливу підвищених температур на поверхні матеріалу ABS може спостерігатися характерна зміна кольору. Зокрема, дослідження, проведені австралійськими вченими, показали, що за витримування зразків ABS протягом 168 годин при температурі 120 °C відбувається утворення коричнево-жовтого забарвлення поверхні полімеру (Зображення 11) [17].

Таблиця 3. Температурні показники полімерів, які були встановлені на автомобілі Lexus.

Найменування деталі	Тип полімера	Спосіб визначення	Робоча температура	Температура плавлення/деструкції	Посилання в Інтернеті
Корпус антени	TPE	Маркування	60 °C.	171 – 221 °C.	https://www.pmcplastics.com/materials/tpe/
Заглушки на молдінгах даху	PP	Експеримент	82,2 °C	163,8° C	https://www.marlinwire.com/blog/7-need-to-know-polypropylene-material-properties
Накладки дверей	ASA	Маркування	75 °C	105 °C	https://www.pmcplastics.com/materials/asa/
Корпуси зовнішніх дзеркал заднього виду	ABS	Інформація з Інтернету https://bigl.ua/p269888468-ko-pusa-zerkal-Lexus	61,9 - 76,9 °C	190 - 270 °C	https://www.plastikcity.co.uk/useful-stuff/material-melt-mould-temperatures https://dielectricmfg.com/knowledge-base/abs/
Накладки на скло задньої боковини	ABS	Маркування	61,9 - 76,9 °C	190 - 270 °C	https://www.plastikcity.co.uk/useful-stuff/material-melt-mould-temperatures https://dielectricmfg.com/knowledge-base/abs/
Задній спойлер	ABS	Маркування	61,9 - 76,9 °C	190 - 270 °C	https://www.plastikcity.co.uk/useful-stuff/material-melt-mould-temperatures https://dielectricmfg.com/knowledge-base/abs/
Ущільнювач дверей	EPDM-синтетичний каучук	Інформація з Інтернету https://www.aliexpress.com/i/33038152048.html		210 °C	https://www.setaram.com/application-notes/an186-thermal-stability-of-elastomer-joints/



Зображення 11. Зміна кольору ABS в залежності від часу випробувань (зліва, 168 годин; справа, 0 годин) при 120 ° С.

В ході дослідження було проведено порівняння забарвлень, які набула окантовка скла боковини лівої з забарвленням експериментальних зразків, що представлені на Зображенні 12.



Зображення 12. Порівняння забарвлень, які набула окантовка скла боковини лівої з забарвленням експериментальних зразків

Як видно з фотоматеріалів, окантовка скла боковини після пожежі набула коричневожовтого відтінку, який відрізняється від порівнюваних зразків (зображення 12) наявністю більш вираженої жовтої складової спектра. Таку особливість можна пояснити впливом високих температур на хромоване напилення зазначеного елемента.

Отримані дані щодо робочих температур пластикових деталей, які зазнали впливу пожежі (у діапазоні 60–82 °С), дають підстави стверджувати, що лінія критичних температур для компонентів, виготовлених із цих полімерів, практично збігається з лінією критич-

них температур для електронних компонентів, або, щонайменше, розташована безпосередньо поруч із нею. Це означає, що пластикові елементи, розташовані вище цієї умовної межі, зазнали температурного впливу, внаслідок чого могли відбутися зміни їх фізико-механічних властивостей.

Стан лакофарбового покриття та наслідки задимлення. Під час огляду автомобіля була можливість безпосереднього порівняння кольору лакофарбового покриття двох ідентичних автомобілів, однакових за маркою, моделлю, роком випуску та кодом фарби (217). Як видно з фотоматеріалів (зображення 13), колір автомобіля LEXUS LX 450d, що був у зоні пожежі (дальній автомобіль), має виражений коричнюватий відтінок порівняно з контрольним зразком (ближній автомобіль).



Зображення №13. Співставлення кольорів двох автомобілів LEXUS LX 450d.

Таку відмінність можна пояснити або наявністю на поверхні автомобіля захисного керамічного покриття, нанесеного раніше, або зміною фізико-хімічних властивостей лакофарбового покриття внаслідок впливу підвищених температур та/або насичення продуктами горіння.

З метою з'ясування, чи могло нанокерамічне покриття Ceramic Pro, яким було оброблено автомобіль, спричинити зміну відтінку лакофарбового покриття, було направлено запит до СТО офіційного

дилера марки LEXUS. У відповіді СТО зазначено, що після нанесення такого покриття колір автомобіля стає більш насиченим, проте його відтінок не змінюється.

Таким чином, залишається єдине обґрунтоване пояснення зафіксованої зміни кольору — вплив підвищених температур та/або насичення лакофарбового покриття продуктами горіння під час пожежі.

Додатковою ознакою змін у стані лакофарбового покриття є те, що частина поверхні ЛКП задньої лівої стійки набула матового відтінку, який не було усунуто навіть після полірування. Це свідчить про зміну фізико-хімічних властивостей лакофарбового покриття внаслідок дії небезпечних чинників пожежі.



Зображення 14. Вузловий знімок стійки задньої лівої.

У будь-якому випадку необхідним є додаткове комплексне обстеження всього лакофарбового покриття (ЛКП) автомобіля, під час якого доцільно перевірити його стан на предмет наявності ефекту змелення поверхні з використанням методів, описаних у стандартах DIN 53159 та DIN 53223, а також оцінити відповідність кольору згідно з методом, наведеним у стандарті ISO 3668-76 «Матеріали лакофарбові. Метод візуального порівняння кольору».

Разом з тим, однією з найбільш суттєвих проблем для подальшої безпечної експлуатації автомобіля є задимлення під час пожежі. Дим являє собою складну суміш токсичних газів і твердих частинок, що утворюються внаслідок горіння широкого спектра матеріалів

[24,25]. Одну з найбільших загроз для здоров'я становлять дрібно-дисперсні та ультрадрібні частинки, які можуть проникати глибоко в дихальні шляхи та спричиняти різноманітні порушення — від подразнення очей і слизових оболонок до загострення хронічних захворювань серцево-судинної та дихальної систем [5].

Дим містить тверді частинки (сажу та пил), у складі яких можуть бути соляна кислота, діоксид сірки, оксиди азоту, аміак, формальдегід і бензол. Крім того, до його складу входять задушливі та високотоксичні гази, зокрема вуглекислий газ, ціаністий водень, монооксид вуглецю, сульфід водню, акролеїн і фосген, який, зокрема, класифікується як бойова отруйна речовина. Інтенсивне утворення диму характерне для горіння матеріалів на основі стиролу, широко застосовуваних у конструкції автомобілів, зокрема ABS-пластику та бутадієн-стирольних каучуків.

Як зазначається у роботі [5], для ефективної нейтралізації шкідливих речовин необхідним є попереднє дослідження проб повітря з метою визначення типів і концентрацій хімічних сполук та твердих частинок. Це дозволяє уникнути небажаної взаємодії реагентів, що використовуються під час очищення, з наявними в повітрі речовинами, яка може призвести до утворення ще більш токсичних побічних продуктів.

Подальші заходи повинні включати фільтрацію повітря із застосуванням НЕРА-фільтрів, очищення поверхонь, дезодорацію повітря та герметизацію відкритих пористих матеріалів. Після завершення комплексу очищувальних робіт доцільним є залучення незалежної екологічної лабораторії для проведення контрольних випробувань і підтвердження безпечності середовища.

Визначення обсягу та вартості ремонту. Визначення обсягу відновлювальних робіт, переліку необхідних запасних частин і матеріалів здійснювалося на підставі результатів огляду автомобіля, а також результатів пожежно-технічних, автотехнічних і матеріалознавчих досліджень.

Відповідно до пункту 4.3 Методики [2], відновлювальний ремонт та визначення вартості матеріального збитку, заподіяного власнику колісного транспортного засобу (КТЗ), здійснюються на таких принципах:

- а) відновлення права особи користуватися КТЗ у технічному стані та з тими самими споживчими властивостями, які існували до пошкодження;
- б) технічної можливості виконання відновлювального ремонту;
- в) економічної доцільності відновлювального ремонту.

У результаті проведених розрахунків встановлено, що вартість відновлювального ремонту досліджуваного автомобіля становила 1 372 573,15 грн, що приблизно у шість разів перевищує суму, зазначену в рахунку СТО. Із цієї суми вартість складників, які підлягають за-

міні, становила 1 326 255,40 грн, вартість ремонтно-відновлювальних робіт — 21 416,00 грн, вартість матеріалів — 24 901,75 грн.

З урахуванням того, що ринкова вартість досліджуваного автомобіля становила 2 936 230 грн (згідно з даними онлайн-платформи оцінки КТЗ «КАРБЕРТ»), вартість відновлювального ремонту складала близько 47 % від його ринкової вартості, що ставить під сумнів економічну доцільність такого ремонту.

Порівняння результатів дослідження з інформацією про наслідки аналогічної події. У практиці авторів цієї статті мав місце досвід розслідування причин та обставин аналогічної події, що сталася 10.04.2016 року в м. Києві у підземному паркінгу 16-поверхового житлового будинку та стосувалася автомобіля MITSUBISHI LANCER. Унаслідок пожежі тоді повністю згоріли чотири автомобілі — LEXUS, SUBARU, VOLKSWAGEN, FORD, а ще два автомобілі — RANGE ROVER та MITSUBISHI — зазнали суттєвих пошкоджень.

Під час огляду автомобілів, які повністю згоріли, було встановлено, що лише у автомобіля VOLKSWAGEN, розташованого між автомобілями SUBARU та LEXUS, пожежею були також повністю зруйновані колісні диски, що свідчить про інтенсивніший тепловий вплив у цій зоні.

За результатами огляду автомобіля MITSUBISHI встановлено значні пошкодження кузовних, скляних, гумових, пластикових та електричних елементів, зокрема: деформацію та ушкодження даху і водостічних жолобів, порушення геометрії кузова, пошкодження вітрового та заднього скла з елементами кріплення, численних ущільнювачів дверей і вікон, зовнішніх та внутрішніх дзеркал, світлотехнічних приладів, елементів внутрішнього оздоблення салону, а також головного кабельного джгута і лакофарбового покриття. У прихованих порожнинах кузова спостерігалися відкладення кіптяви та продуктів горіння.



Зображення 15. Світлини, на яких зафіксовано пошкоджений автомобіль MITSUBISHI

За інформацією власника автомобіля, після виконання відновлювального ремонту, вартість якого становила майже половину ринкової вартості автомобіля, приблизно через півтора року після

пожежі почали проявлятися вторинні негативні наслідки, зокрема: розвиток корозії кузова, утворення купоросу на мідних контактах електропроводки, періодичні короткі замикання, відмови автомобільної аудіосистеми та збої в роботі датчиків ABS. Крім того, зі слів власника, одразу після пожежі вийшли з ладу всі амортизатори, що, ймовірно, було зумовлено втратою експлуатаційних властивостей ущільнювальних елементів під впливом високої температури.

Таким чином, наведений випадок підтверджує висновок, зроблений у межах цього дослідження, про те, що автомобіль, який перебував у зоні впливу високих температур, теплового випромінювання та задимлення, навіть після якісного та повного відновлювального ремонту може втрачати свої експлуатаційні, надійні та безпекові характеристики у середньо- та довгостроковій перспективі.

За результатами оцінки пошкоджень і вартості їх усунення встановлено, що вартість відновлювального ремонту автомобіля MITSUBISHI становила 209 235,91 грн, що за його ринкової вартості 438 360,11 грн складало близько 48 %, тобто перебувало на межі економічної доцільності ремонту.

Висновки

Проведеним дослідженням доведено, що автомобіль, який перебував у підземному паркінгу під час пожежі, навіть за відсутності прямого впливу полум'я, у разі дії інших небезпечних чинників пожежі — підвищеної температури, теплового випромінювання та задимлення — зазнає комплексних ушкоджень. Усунення таких ушкоджень потребує значних матеріальних витрат і технічних зусиль, а їх наслідки не обмежуються лише видимими дефектами.

Встановлено, що ліквідація лише зовнішніх пошкоджень не гарантує подальшої безпечної та комфортної експлуатації автомобіля, оскільки ризик відмов електронних та електричних компонентів, зокрема елементів систем активної та пасивної безпеки, у таких транспортних засобах істотно зростає. Крім того, полімерні елементи кузова та внутрішнього оздоблення під дією високих температур можуть зазнавати деформацій, змін геометрії та втрати фізико-механічних властивостей, що не завжди проявляється одразу після пожежі.

Окремою суттєвою проблемою автомобілів, які зазнали впливу пожежі, є контамінація продуктами горіння. Канцерогенні та токсичні речовини, що містяться в димі, проникають у салон автомобіля та поглинаються матеріалами облицювання, стелі, оббивки сидінь, фільтрами та іншими пористими елементами. При цьому стандартні методи очищення, зокрема мийка та хімчистка, не забезпечують гарантованої нейтралізації таких сполук і не можуть розглядатися як достатні для відновлення санітарно-гігієнічної безпеки транспортного засобу.

Автори статті не стверджують, що відновлювальний ремонт автомобілів, які перебували в зоні дії небезпечних чинників пожежі, є неможливим. Проте результати дослідження свідчать, що вартість

такого ремонту може сягати близько 50 % ринкової вартості автомобіля, як це має місце у досліджуваному та аналогічних випадках. Водночас слід враховувати, що навіть виконання повного обсягу відновлювальних робіт не гарантує збереження експлуатаційних, надійнісних та безпекових характеристик автомобіля у середньо- та довгостроковій перспективі, про що свідчать результати аналізу відкладених наслідків аналогічних подій.

Визначення обсягу та, відповідно, вартості відновлювального ремонту, необхідного для відновлення експлуатаційних і безпекових властивостей таких автомобілів, повинно ґрунтуватися на встановленні лінії критичних температур. Для цього доцільно використовувати дані щодо допустимих і критичних температур електронних компонентів та температур деструкції полімерних матеріалів, які зазнали впливу під час пожежі.

Ідентифікацію типів полімерів доцільно здійснювати шляхом зчитування маркування з деталей, а за неможливості — з використанням експериментальних методів, що дозволяють оцінити їх фізико-хімічні властивості, зокрема плавучість, характер термічних деформацій і зміну кольору.

Отже, дослідження, необхідні для відповіді на питання щодо технічної можливості та економічної доцільності відновлення автомобіля після впливу пожежі, є комплексними та багатфакторними і виходять за межі стандартної автотоварознавчої експертизи, вимагаючи залучення пожежно-технічних, матеріалознавчих та автотехнічних методів аналізу.

Список використаних джерел:

1. Li D., Zhu G., Zhu H., Yu Z., Gao Y., Jiang X. Flame spread and smoke temperature patterns in full-scale car fire tests. *Case Studies in Thermal Engineering*. 2017. Vol. 10. P. 315–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.08.001>.
2. Terziev A. Investigation of fire dynamics in a burning car and analysis of the possibility of fire spreading to an adjacent vehicle. *E3S Web of Conferences*. 2019. Vol. 112. Art. 01015. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911201015>.
3. Kang S., Kwon M., Choi J.Y., Choi S. Full-scale fire tests to evaluate fire risks of battery electric vehicles in underground parking garages. *Fire Technology*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01694-7>.
4. ISO 16750-4:2010. Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 4: Climatic loads. Geneva: International Organization for Standardization, 2010.
5. Addressing Toxic Smoke Particulates in Fire Restoration. *The Red Guide to Recovery*. URL: <https://theredguidetorecovery.com/addressing-toxic-smoke-particulates-in-fire-restoration-2/> (дата звернення: 12.02.2026).
6. Kovar B., King M.L., Chakravarty P. Recommended Guidelines

for the Investigation and Remediation of Smoke Damage Caused by Wildfires. *Journal of Cleaning, Restoration & Inspection*. 2015. Vol. 2. P. 24–32. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1652.3280>.

7. Destailats H., Chan W.R. Restoration of indoor environments impacted by wildfire smoke: A review of available information and research needs. *Indoor Environments*. 2025. Vol. 2, Issue 3. Art. 100112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indenv.2025.100112>.

8. Phalen D., Nieusma J.L. An industrial hygiene method for evaluating toxic contamination in smoke and fire damaged buildings. *Toxicology Mechanisms and Methods*. 2025. DOI: <https://doi.org/10.1080/15376516.2025.2561118>.

9. Filkov A.I., Tihay-Felicelli V., Masoudvaziri N., Rush D., Valencia A., Wang Y. et al. Review of thermal exposure mechanisms and fire spread during major fires in the wildland-urban interface and built environment. *Fire Safety Journal*. 2023. Vol. 140. Art. 103871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103871>.

10. Thermopedia: A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering. Article No. 764. URL: <https://www.thermopedia.com/> (дата звернення: 10.02.2026).

11. Selamet S., Ayva B. Car fires in multi-story parking garages. *Turkish Journal of Civil Engineering*. 2023. Vol. 34, No. 3. P. 83–110. DOI: <https://doi.org/10.18400/tjce.1265492>.

12. Svare M., Nic Daeid N. Forensic Examination of Fire-Damaged Electrical Conductors Using Radiography. *Journal of the National Academy of Forensic Engineers*. 2023. Vol. 40, No. 1. P. 27–39. DOI: <https://doi.org/10.51501/jotnafe.v40i1.845>.

13. Lönnermark A., Blomqvist P. Emissions from an automobile fire. *Chemosphere*. 2006. Vol. 62, Issue 7. P. 1043–1056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.05.002>.

14. Lesage M., Chalet D., Migaud J., Krautner C. Optimizing air quality and energy consumption in electric vehicle cabins using computer simulation. *Journal of Environmental Management*. 2024. Vol. 358. Art. 120861. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120861>.

15. Методика визначення обсягу ремонтних дій при встановленні розміру матеріального збитку, заподіяного власнику колісного транспортного засобу: реєстраційний код у Реєстрі методик проведення судових експертиз 12.2.03; рішення про державну реєстрацію від 12.09.2014.

16. Volkswagen Crafter. Настанови для виробників кузовів. Новий Crafter (з модельного року 2017). Volkswagen Commercial Vehicles. 2018.

17. OEM Passenger Restraint System Parts Search: 2021 Toyota Camry / Camry Hybrid. *I-CAR Repairability Technical Support*. URL: <https://rts.i-car.com/> (дата звернення: 10.06.2026).

18. Safety Recall № 15043: Driver's Frontal Air Bag Inflator Raysei. *National Highway Traffic Safety Administration*. 2016.

19. Airbag and Supplementary Restraint System (SRS) Safety Precautions. *Tesla Model Y Service Manual*. Tesla, Inc. 2024.

20. Takata Airbag Recall Spotlight. *National Highway Traffic Safety*

Administration (NHTSA). URL: <https://www.nhtsa.gov/> (дата звернення: 10.02.2026).

21. Expansion of the Takata Recall Campaign: What Consumers Need to Know. *National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA)*. 2020.

22. Plastics are denser than water: how comes they don't sink? *Physics Stack Exchange*. URL: <https://physics.stackexchange.com/questions/310734/plastics-are-denser-than-water-how-comes-they-dont-sink/310736> (дата звернення: 12.02.2026).

23. Srivastava V., Srivastava R. *Advances in Application and Recycling of Polymeric Materials in Automotive Industry*. Academic Press, 2021.

24. Liu Z., Murphy J., Maghirang R., Devlin D. Health and Environmental Impacts of Wildfire Smoke: A Review. *Journal of Environmental Protection*. 2016. Vol. 7. P. 1860–1885. DOI: <https://doi.org/10.4236/jep.2016.712148>.

25. Wildfire Smoke and Your Patients' Health. *U.S. Environmental Protection Agency*. URL: https://19january2021snapshot.epa.gov/wildfire-smoke-course/why-wildfire-smoke-health-concern_.html (дата звернення: 12.02.2026).

26. Методика товарознавчої експертизи та оцінки колісних транспортних засобів: затверджена наказом Міністерства юстиції України та Фонду державного майна України від 24.11.2003 № 142/5/2092, зареєстрована в Міністерстві юстиції України 24.11.2003 за № 1074/8395; із змінами. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1074-03> (дата звернення: 12.02.2026).

27. LEXSU 662: технічний опис та характеристики. *LEXU Drive*. URL: <https://www.lexudrive.com/lexsu-662.html> (дата звернення: 22.02.2026).

References:

1. Li, D., Zhu, G., Zhu, H., Yu, Z., Gao, Y., & Jiang, X. (2017). Flame spread and smoke temperature patterns in full-scale car fire tests. *Case Studies in Thermal Engineering*, 10, 315–324. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2017.08.001> [in English].

2. Terziev, A. (2019). Investigation of fire dynamics in a burning car and analysis of the possibility of fire spreading to an adjacent vehicle. *E3S Web of Conferences*, 112, Art. 01015. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/201911201015> [in English].

3. Kang, S., Kwon, M., Choi, J. Y., & Choi, S. (2025). Full-scale fire tests to evaluate fire risks of battery electric vehicles in underground parking garages. *Fire Technology*. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10694-024-01694-7> [in English].

4. ISO 16750-4:2010. (2010). *Road vehicles — Environmental conditions and testing for electrical and electronic equipment — Part 4: Climatic loads*. Geneva: International Organization for Standardization [in English].

5. *Addressing Toxic Smoke Particulates in Fire Restoration*. (2026). The Red Guide to Recovery. URL: <https://theredguidetorecovery.com/addressing-toxic-smoke-particulates-in-fire-restoration-2/> (accessed: 12.02.2026) [in English].

6. Kovar, B., King, M. L., & Chakravarty, P. (2015). Recommended Guidelines for the Investigation and Remediation of Smoke Damage Caused by Wildfires. *Journal of Cleaning, Restoration & Inspection*, 2, 24–32. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1652.3280> [in English].
7. Destailhats, H., & Chan, W. R. (2025). Restoration of indoor environments impacted by wildfire smoke: A review of available information and research needs. *Indoor Environments*, 2(3), Art. 100112. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indenv.2025.100112> [in English].
8. Phalen, D., & Nieuwsma, J. L. (2025). An industrial hygiene method for evaluating toxic contamination in smoke and fire damaged buildings. *Toxicology Mechanisms and Methods*. DOI: <https://doi.org/10.1080/15376516.2025.2561118> [in English].
9. Filkov, A. I., Tihay-Felicelli, V., Masoudvaziri, N., Rush, D., Valencia, A., Wang, Y. et al. (2023). Review of thermal exposure mechanisms and fire spread during major fires in the wildland-urban interface and built environment. *Fire Safety Journal*, 140, Art. 103871. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2023.103871> [in English].
10. *Thermopedia: A-to-Z Guide to Thermodynamics, Heat and Mass Transfer, and Fluids Engineering*. (2026). Article No. 764. URL: <https://www.thermopedia.com/> (accessed: 10.02.2026) [in English].
11. Selamet, S., & Ayva, B. (2023). Car fires in multi-story parking garages. *Turkish Journal of Civil Engineering*, 34(3), 83–110. DOI: <https://doi.org/10.18400/tjce.1265492> [in English].
12. Svare, M., & Nic Daeid, N. (2023). Forensic Examination of Fire-Damaged Electrical Conductors Using Radiography. *Journal of the National Academy of Forensic Engineers*, 40(1), 27–39. DOI: <https://doi.org/10.51501/jotnafe.v40i1.845> [in English].
13. Lönnermark, A., & Blomqvist, P. (2006). Emissions from an automobile fire. *Chemosphere*, 62(7), 1043–1056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2005.05.002> [in English].
14. Lesage, M., Chalet, D., Migaud, J., & Krautner, C. (2024). Optimizing air quality and energy consumption in electric vehicle cabins using computer simulation. *Journal of Environmental Management*, 358, Art. 120861. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120861> [in English].
15. *Metodyka vyznachennia obsiahu remontnykh dii pry vstanovlenni rozmiru materialnoho zbytku, zapodiianoho vlasnyku kolisnoho transportnoho zasobu* [Methodology for determining the scope of repair actions when establishing the amount of material damage caused to the owner of a wheeled vehicle]. (2014). Registration code in the Register of Methods of Forensic Examinations 12.2.03; Decision on state registration dated September 12, 2014 [in Ukrainian].
16. *Volkswagen Crafter. Nastanovy dlia vyrobnykiv kuzoviv. Novyi Crafter (z modelnoho roku 2017)* [Volkswagen Crafter. Body builder guidelines. The new Crafter (from model year 2017)]. (2018). Volkswagen Commercial Vehicles [in Ukrainian].
17. *OEM Passenger Restraint System Parts Search: 2021 Toyota Camry / Camry Hybrid*. (2026). I-CAR Repairability Technical Support. URL: <https://rts.i-car.com/> (accessed: 10.06.2026) [in English].
18. *Safety Recall № 15043: Driver's Frontal Air Bag Inflator Rysei*.

(2016). National Highway Traffic Safety Administration [in English].

19. *Airbag and Supplementary Restraint System (SRS) Safety Precautions*. (2024). Tesla Model Y Service Manual. Tesla, Inc [in English].

20. *Takata Airbag Recall Spotlight*. (2026). National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA). URL: <https://www.nhtsa.gov/> (accessed: 10.02.2026) [in English].

21. *Expansion of the Takata Recall Campaign: What Consumers Need to Know*. (2020). National Highway Traffic Safety Administration (NHTSA) [in English].

22. Plastics are denser than water: how comes they don't sink? (2026). *Physics Stack Exchange*. URL: <https://physics.stackexchange.com/questions/310734/plastics-are-denser-than-water-how-comes-they-dont-sink/310736> (accessed: 12.02.2026) [in English].

23. Srivastava, V., & Srivastava, R. (2021). *Advances in Application and Recycling of Polymeric Materials in Automotive Industry*. Academic Press [in English].

24. Liu, Z., Murphy, J., Maghirang, R., & Devlin, D. (2016). Health and Environmental Impacts of Wildfire Smoke: A Review. *Journal of Environmental Protection*, 7, 1860–1885. DOI: <https://doi.org/10.4236/jep.2016.712148> [in English].

25. *Wildfire Smoke and Your Patients' Health*. (2021). U.S. Environmental Protection Agency. URL: https://19january2021snapshot.epa.gov/wildfire-smoke-course/wildfire-smoke-health-concern_.html (accessed: 12.02.2026) [in English].

26. *Metodyka tovaroznavchoi ekspertyzy ta otsinky kolisnykh transportnykh zasobiv* [Methodology of commodity expert examination and evaluation of wheeled vehicles]: approved by the Order of the Ministry of Justice of Ukraine and the State Property Fund of Ukraine dated 24.11.2003 No. 142/5/2092, registered with the Ministry of Justice of Ukraine on 24.11.2003 under No. 1074/8395; as amended. (2003). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1074-03> (accessed: 12.02.2026) [in Ukrainian].

27. *LEXSU 662: tekhnichniy opys ta kharakterystyky* [LEXSU 662: technical description and specifications]. (2026). LEXU Drive. URL: <https://www.lexudrive.com/lexsu-662.html> (accessed: 22.02.2026) [in Ukrainian].

Надійшла до редакції / Received: 08.03.2026

Отримана після доопрацювання / Received after revision: 26.03.2026

Прийнято до друку / Accepted for publication: 27.03.2026

Опубліковано / Published: 29.05.2026

Фінансування: відсутнє / Funding: none.

Конфлікт інтересів: автор(и) заявляє(ють) про відсутність конфлікту інтересів / Conflict of interest: the author(s) declare no conflict of interest.

Дотримання етичних норм: дослідження виконано з дотриманням принципів академічної доброчесності / Ethical compliance: the study was conducted in accordance with the principles of academic integrity.

Дані дослідження: усі дані, необхідні для обґрунтування висновків, наведено у статті / Research data: all data necessary to substantiate the conclusions are presented in the article.