

WYBRANE PROBLEMY NAPRAW POJAZDÓW W ASPEKcie BEZPIECZEŃSTWA DROGOWEGO

pod redakcją
Piotra Aleksandrowicza
Tomasza Kałaczyńskiego
Michała Lissa

WYBRANE PROBLEMY NAPRAW POJAZDÓW W ASPEKTCIE BEZPIECZEŃSTWA DROGOWEGO

pod redakcją
Piotra Aleksandrowicza
Tomasza Kałaczyńskiego
Michała Lissa

Recenzent
dr hab. inż. Michał Pająk, prof. URad

Opracowanie redakcyjne i techniczne
mgr Aleksandra Górską, mgr inż. Daniel Morzyński

Projekt okładki
lic. Olga Wierzbicka

© Copyright
Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Bydgoskiej
Bydgoszcz 2025

Utwór w całości ani we fragmentach nie może być powielany
ani rozpowszechniany za pomocą urządzeń elektronicznych,
mechanicznych, kopiujących, nagrywających i innych
bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich.

ISBN 978-83-68285-14-7

Wydawnictwa Uczelniane Politechniki Bydgoskiej
Redaktor Naczelny
dr hab. inż. Marcin Zastempowski, prof. PBŚ
ul. Sucha 9B, 85-796 Bydgoszcz, tel. 52 3749482, 52 3749426
e-mail: wydawucz@pbs.edu.pl <https://wydawnictwa.pbs.edu.pl>

Wyd. I. Ark. aut. 9,5. Ark. druk. 10,7.
Zakład Małej Poligrafii PBŚ

SPIS TREŚCI

PRZEDMOWA	5
Szymon Baranowski, Juliy Boyko, Michał Liss NAPRAWY POWYPADKOWE POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH	7
Sylwester Borowski, Radosław Figura SPOSÓB POMIARU STOPNIA ZUŻYCIA REFLEKTORÓW SAMOCHODOWYCH W CELU WYZNACZENIA MODELU NAPRAW I WYMIAN PREWENCYJNYCH	19
Ewa Kuliś, Tomasz Kałaczyński, Radosław Goncarzewicz, Serhiy Horiashchenko ANALIZA PROCESU NAPRAWY KAROSERII POJAZDU SAMOCHODOWEGO NA WYBRANYM PRZYKŁADZIE	42
Piotr Aleksandrowicz, Katarzyna Markowska MODELOWANIE PROCESU LIKWIDACJI SZKÓD POJAZDÓW W ASPEKCIE OGRANICZENIA WYPŁAT NIENALEŻNYCH ODSZKODOWAŃ	53
Michał Liss, Kacper Krause, Jose Miguel Martinez Valle ANALIZA WYBRANYCH TECHNOLOGII NAPRAW BLACHARSKICH POJAZDÓW	69
Agnieszka Sołtysiak, Dawid Lasek, Robert Sołtysiak BEZPIECZEŃSTWO POJAZDÓW DROGOWYCH W ASPEKCIE PRZEWOZU TOWARÓW NIEBEZPIECZNYCH W POLSCE	85
Kostyantyn Holenko, Serhii Matiukh, Tomasz Kałaczynski, Aleksandr Dykha THE INFLUENCE OF AN ADDITIONAL RING IN THE STRUCTURE OF AN ALLOY RIM ON ITS STRENGTH ANALYSIS	97
Tomasz Kałaczyński, Mateusz Borkowski, Aleksandr Dykha CHARAKTERYSTYKA OCENY STANU POWŁOK PROSZKOWYCH	104

Bogdan Landowski, Paweł Frąszczak

METODA DOBORU ŚRODKÓW TECHNICZNYCH
DO SYSTEMÓW LOGISTYCZNYCH 118

Mirosław Szubartowski, Magdalena Czyżewska, Andrzej Neubauer,
Klaudiusz Migawa

ANALIZA RYZYKA WYSTĄPIENIA ZDARZEŃ NIEPOŻĄDANYCH
W SYSTEMIE NAPRAW PREWENCYJNYCH AUTOBUSÓW
MIEJSKICH 132

Małgorzata Malinowska, Łukasz Muślewski, Lubomir Hujo

ANALIZA WYBRANYCH WŁASNOŚCI OLEJÓW ROŚLINNYCH
Z PUNKTU WIDZENIA MOŻLIWOŚCI ICH ZASTOSOWANIA
W SILNIKACH SPALINOWYCH..... 146

Szymon Szczukowski, Tomasz Jarzyna

BADANIE SZTYWNOŚCI SPRĘŻYN ZAWIESZEŃ POJAZDÓW
SAMOCHODOWYCH 161

PRZEDMOWA

Bezpieczeństwo napraw pojazdów to tematyka szerokiej dyskusji w gremiach naukowych i branżowych, która obejmuje zagadnienia związane z popularyzacją wiedzy w zakresie naprawy środków transportu, transferu wiedzy i technologii napraw, jak i tworzenie platformy współpracy środowiska praktyków z jednostkami naukowymi.

To również okazja do dyskusji i wymiany informacji na temat najnowszych osiągnięć nauki i przemysłu w następujących dziedzinach tematycznych:

- bezpieczeństwo środków transportu,
- technologia napraw środków transportu,
- systemy oceny napraw powypadkowych,
- specyfika napraw pojazdów użytkowych,
- technika warsztatowa i jej zastosowania w naprawach,
- prezentacja wyników badań i ich zastosowania,
- zarządzanie wiedzą o eksploatacji środków transportu.

Tematyka ta wpisuje się w potrzebę wprowadzenia na rynek napraw pojazdów określonych rozwiązań systemowych w zakresie oceny, weryfikacji i analizy jakości wykonywanych napraw powypadkowych pojazdów samochodowych.

Według aktualnych danych liczba zarejestrowanych pojazdów w grudniu 2021 roku wynosiła 25 879 900 sztuk i wciąż rośnie średnio o około 3% rocznie. Nie jest zatem niczym zaskakującym fakt, że największy udział w corocznych raportach Komendy Głównej Policji dotyczącej wypadków drogowych przypada właśnie pojazdom. Rosnąca liczba pojazdów w ruchu drogowym biorących udział w różnych zdarzeniach drogowych, jak i okres ich eksploatacji determinują konieczność wykonywania napraw. Naprawy te powinny być wykonywane zgodnie z procedurami, aby pojazdy nie stanowiły dodatkowego zagrożenia w ruchu drogowym oraz były „bezpieczne” dla użytkowników.

Przedstawiony w monografii materiał pozwala na zapoznanie się z tematyką bezpieczeństwa napraw pojazdów oraz z głównymi problemami w zakresie oceny jakości przeprowadzonych napraw powypadkowych.

Książka przeznaczona jest dla szerokiego grona odbiorców: badaczy, młodych pracowników nauki, studentów inżynierów, pracowników zaplecza technicznego zakładów pracy oraz użytkowników pojazdów.

NAPRAWY POWYPADKOWE POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH

Szymon Baranowski^{1*}, Juliy Boyko², Michał Liss¹

¹ Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska

² Khmelnytskyi National University, Department of Telecommunications, Faculty of Information
Technologies, 11 Instytut'ska Str., Khmelnytskyi, 29016, Ukraine

Streszczenie. Transport drogowy odgrywa istotną rolę w łańcuchu dostaw towarów i usług. Wysoka liczba pojazdów ciężarowych na drogach publicznych zwiększa również prawdopodobieństwa udziału tego typu pojazdów w wypadkach drogowych. Kluczowym elementem konstrukcyjnym w budowie pojazdów ciężarowych jest rama nośna, która spełnia wiele istotnych funkcji, począwszy od zapewnienia sztywności, na bezpieczeństwie kończąc. Ze względu na istotne znaczenie tego elementu jego naprawa powinna zostać przeprowadzona w sposób zgodny z technologią oraz z użyciem odpowiednich systemów naprawczych. W publikacji przedstawiono zagadnienie związane z naprawą ram nośnych pojazdów ciężarowych.

Słowa kluczowe: łańcuch dostaw, wypadki drogowe, systemy naprawcze

1. WPROWADZENIE

Według danych Głównego Urzędu Statystycznego w Polsce na dzień 31 grudnia 2022 roku odnotowano zarejestrowanych 3 713 217 samochodów ciężarowych, co w stosunku do całościowej liczby pojazdów silnikowych stanowi wartość 11%. Transport drogowy odgrywa istotną rolę w polskiej gospodarce i jest nieodzownym elementem w codziennym funkcjonowaniu społeczeństwa.

Tak znacząca liczba pojazdów ciężarowych na drogach ma wpływ na wzrost ryzyka udziału w kolizjach, wypadkach drogowych tego typu pojazdów (rys. 1). W aspekcie konstrukcyjnym w porównaniu z większością pojazdów osobowych pojazdy ciężarowe wyróżniają się tym, iż ich nadwozie nie jest „samonośne”, a montowane na ramę nośną, w odniesieniu do której stawia się wiele wymagań.

Pomimo iż zasada napraw pojazdów ciężarowych użytkowych nie różni się zbyt wiele od zasady napraw pojazdów osobowych, to w praktyce zwłaszcza przy uszkodzeniach o dużej deformacji różni się znacznie, m.in. ze względu na fakt, iż w pojazdach z konstrukcją ramy nośnej elementy nadwozia i rama naprawiane są oddzielnie i z wykorzystaniem odmiennych technologii. Istotne czynniki mające wpływ na deformacje to masa własna pojazdów ciężarowych oraz fakt, iż w większości przypadków przewożą ładunek.

* adres korespondencyjny: szymon.baranowski@pbs.edu.pl

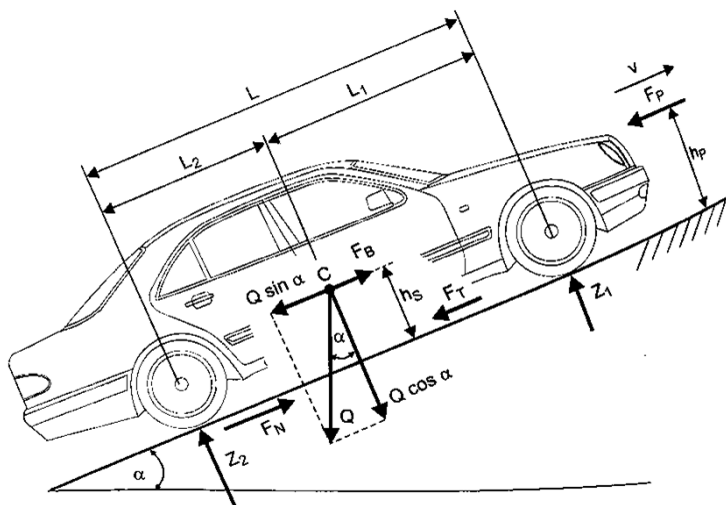
W pracy przedstawiono fizyczne aspekty oddziałujące na pojazd, przegląd konstrukcji najczęściej stosowanych ram nośnych, technologie napraw wykorzystywane przy pojazdach ciężarowych oraz przykładowe warianty rozliczeń szkód komunikacyjnych, w których uwzględniono naprawy ramy.



Rys. 1. Pojazdy ciężarowe marki Mercedes Benz [3]

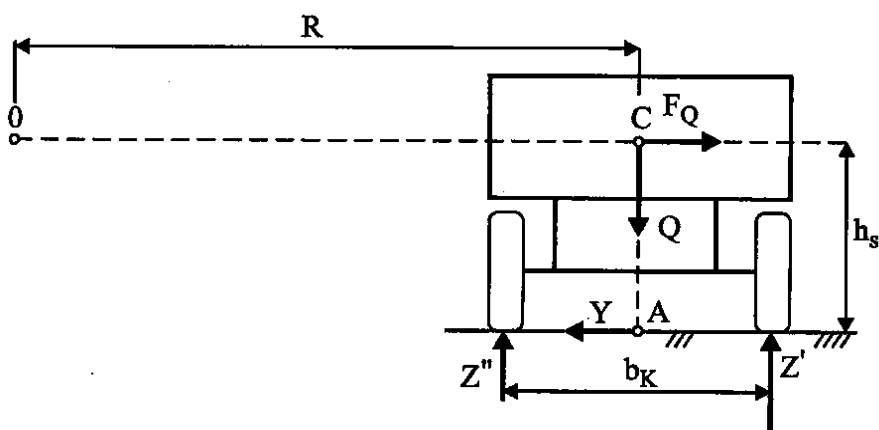
2. SIŁY DZIAŁAJĄCE NA POJAZD

Istotnym elementem poprawności rozliczenia, a przede wszystkim naprawy pojazdu ciężarowego jest świadomość naprawiającego o wartościach oddziaływania sił na dany pojazd w trakcie poruszania się. Choć rodzaje sił działających w ruchu na pojazd osobowy i pojazd ciężarowy są w większości tożsame, to ich wartość i rozkłady są inne (rys. 2). Podstawowe parametry, które różnią obie konstrukcje, to usytuowanie środka masy pojazdu oraz wartość masy własnej. Te dwa elementy stanowią kluczową kwestię w zachowaniu stateczności pojazdu ciężarowego, która jest najważniejszą cechą w kontekście zachowania bezpieczeństwa czynnego. Należy również podkreślić fakt, iż znaczącym czynnikiem poruszania się samochodu ciężarowego, który często tworzy zespół pojazdów, np. z naczepą, jest przewożony ładunek.



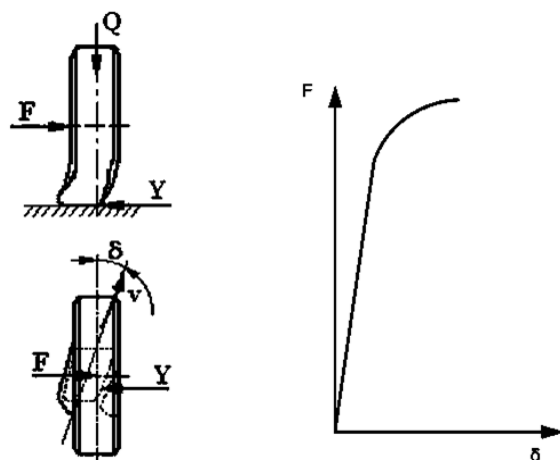
Rys. 2. Podstawowy układ sił działających na samochód [6]

Potocznie stateczność pojazdu nazywana jest zdolnością do zachowania kierunku jazdy nadanego mu przez kierowcę. O ile w ruchu prostoliniowym utrata stateczności przez pojazd jest mało prawdopodobna, o tyle w ruchu krzywoliniowym stanowi dużo większe prawdopodobieństwo wystąpienia. Związane może być to z niedostosowaniem prędkości pojazdu przez kierującego w zakręcie drogi (rys. 3), z nierównościami drogami, czynnikami zewnętrznymi (podmuchami wiatru). W przypadku każdego z uprzednio wymienionych przykładów spotykane jest zachowanie kierującego pojazdem w postaci gwałtownej zmiany kierunku jazdy przy jednoczesnym hamowaniu.

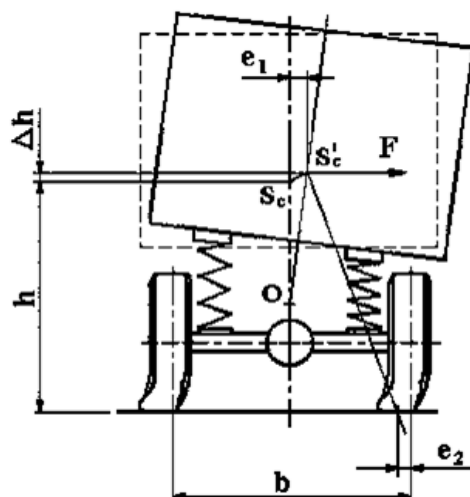


Rys. 3. Siły działające na pojazd na łuku drogi [6]

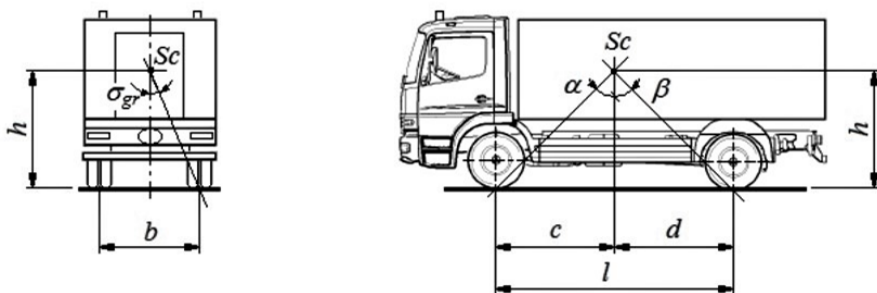
W analizie poruszania się pojazdu zwłaszcza po łuku drogi należy również uwzględnić wpływ oddziaływania i zachowania się ogumienia, ponieważ właśnie ogumienie jest jedynym elementem łączącym pojazd z drogą. Zaznaczyć ponadto należy, iż nawet w trakcie poruszania się pojazdu w ruchu prostoliniowym na koło działają siły poprzeczne. Spowodowane jest to np. nachyleniami drogi, nierównościami. Nie bez znaczenia pozostaje również rodzaj zastosowanego zawieszenia. Wśród pojazdów ciężarowych w większości spotykane jest zawieszenie pneumatyczne. Jedną z zalet zastosowania tego rozwiązania jest zapewnienie pojazdowi większej płynności jazdy (rys. 4–6).



Rys. 4. Zjawisko bocznego znoszenia opony [6]



Rys. 5. Przesunięcie środka masy spowodowane oddziaływaniem zawieszenia i podatnością opon podczas jazdy po łuku drogi [1]



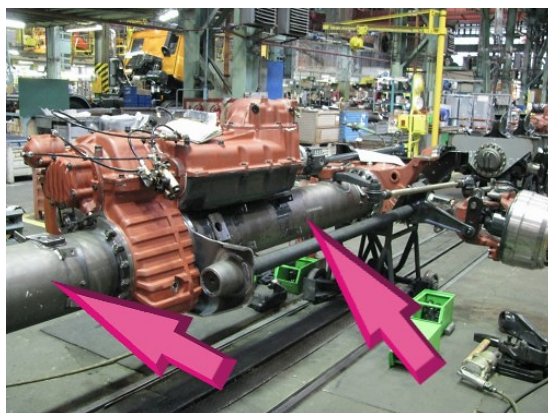
Rys. 6. Parametry niezbędne do obliczeń stateczności pojazdu [1]

3. PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ KONSTRUKCYJNYCH RAM NOŚNYCH I TECHNOLOGIE JEJ NAPRAWY

Kluczowym elementem budowy pojazdów ciężarowych/użytkowych jest ich rama nośna, która jednocześnie musi nadać sztywność całemu pojazdowi oraz wytrzymać przenoszone obciążenie wynikające z normalnych warunków eksploatacyjnych. Do ramy mocowane są wszystkie elementy pojazdu: kabina, elementy układu napędowego, elementy układu jezdnego, układu zasilania, jak i innych układów, np. oczyszczania spalin. Kolejno rama pojazdu ciężarowego przejmuje wszelkie obciążenia i siły uderzenia działające na pojazd podczas kolizji drogowej, wypadku. Bez wątpienia jest istotnym elementem ww. pojazdów pod względem bezpieczeństwa użytkowników.

Rodzaje ram nośnych najczęściej zastosowanych w pojazdach ciężarowych:

- **rama centralna** – stosowana w pojazdach ciężarowych przeznaczonych do użytkowania w trudnych warunkach terenowych, np. pojazdy marki TATRA. Konstrukcja tego typu ram składa się z jednej podłużnicy o przekroju rurowym (rys. 7),



Rys. 7. Rama centralna pojazdu marki TATRA [5]

- **rama podłużnicowa** – podstawowymi elementami tego typu konstrukcji są dwie belki podłużne połączone ze sobą za pomocą belek poprzecznych (rys. 8).

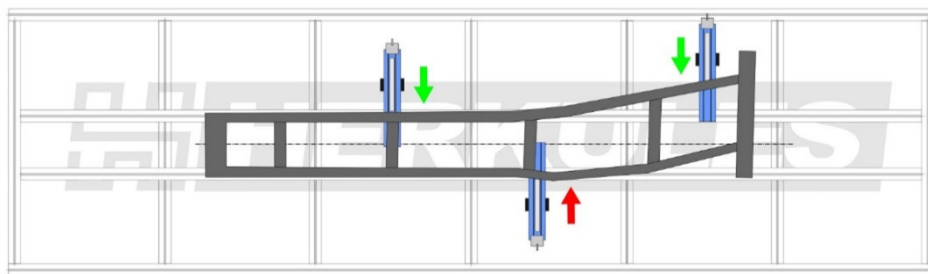


Rys. 8. Rama podłużnicowa w pojeździe marki Mercedes Benz Arocs (opracowanie własne)

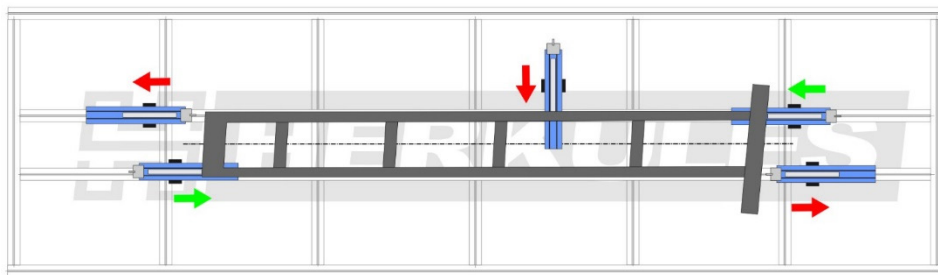
3.1. Typowe uszkodzenia ram

Naprawa powypadkowa jest kwestią indywidualną, ponieważ nie ma dwóch takich samych wypadków drogowych. Niemniej jednak można wyróżnić cztery kierunki uszkodzeń, na które narażone są ramy nośne:

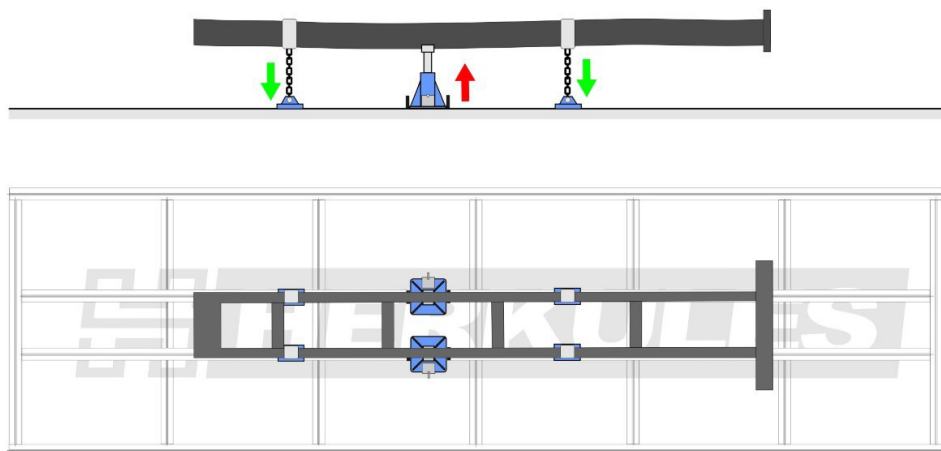
- boczne (rys. 9),
- diagonalne (rys. 10),
- pionowe (rys. 11),
- skręcanie (rys. 12).



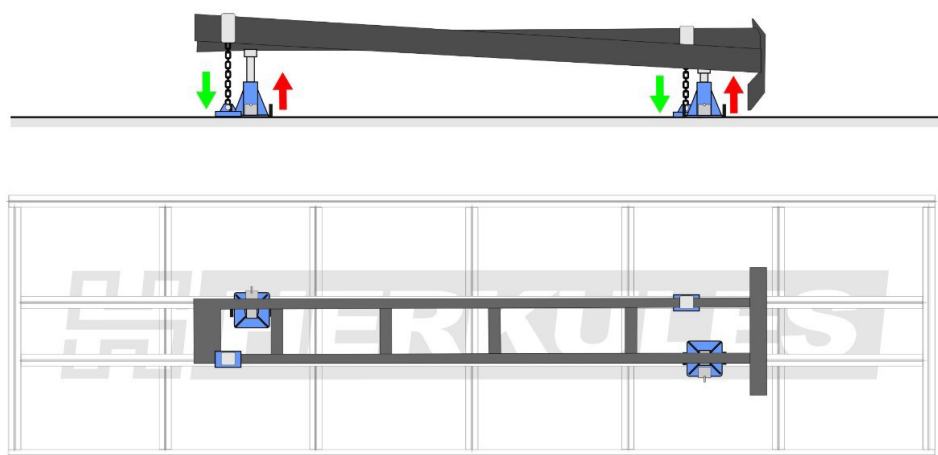
Rys. 9. Uszkodzenie boczne ramy nośnej [2]



Rys. 10. Uszkodzenie diagonalne ramy nośnej [2]



Rys. 11. Uszkodzenie pionowe ramy nośnej [2]

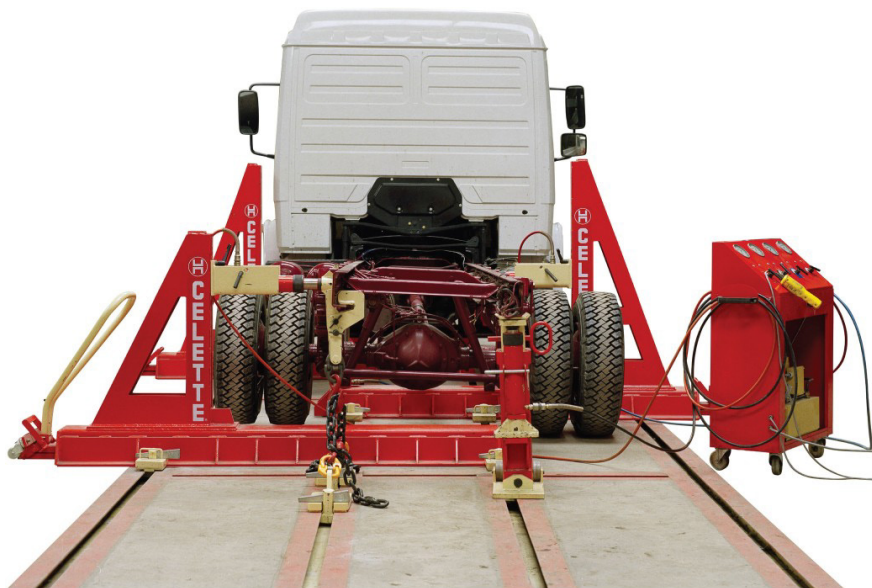


Rys. 12. Uszkodzenie ramy nośnej wskutek skręcenia [2]

3.2. Systemy naprawcze ram nośnych

Ze względu na wymagania, które stawia się w odniesieniu do ram nośnych pojazdów ciężarowych, o czym wspomniano we wcześniejszej części publikacji, konieczne jest przeprowadzenie ich naprawy w specjalistycznym zakładzie naprawczym. Niedopuszczalne jest przeprowadzenie naprawy w warunkach, które nie zapewnią prawidłowego przywrócenia cech konstrukcyjnych, oraz z użyciem technologii, która pozbawi element nośny tych cech, np. podgrzewanie elementów palnikiem. Do naprawy ram nośnych pojazdów powinno się wykorzystywać stanowiska pozwalające na zastosowanie różnego układu sił oraz urządzeń umożliwiających kształtowanie obrabianego materiału, np. nagrzewnic indukcyjnych. Stanowiska naprawcze osadzone są integralnie z podłożem zakładu naprawczego (rys. 13). Do osadzonej konstrukcji w podłożu oraz wzdłużnych i poprzecznych prowadnic mocuje się:

- siłowniki o układzie pionowym wywołujące siły prostujące (ciągące lub pchające),
- kątowniki umożliwiające wywołanie poziomych kierunków sił,
- podpory pionowe i poziome (rys. 14),
- zaczepy.



Rys. 13. Stanowisko naprawcze ram firmy Blowtherm system CELETTE [4]

Pierwszym etapem, od którego należy zacząć naprawę pojazdu ciężarowego z uszkodzoną ramą nośną, jest wykonanie pomiarów sprawdzających, pozwalających zdefiniować zakres i rozmiar uszkodzeń (rys. 15, 16). Wielokrotnie spotykana jest praktyka wykorzystania urządzeń pomiarowych ram, jak i układów jezdnych

obsługiwanych na jednym stanowisku naprawczym. Pomiarów dokonuje się kilkunastokrotnie podczas naprawy.



Rys. 14. Stanowisko naprawcze ram Blowtherm system Cellete z wykorzystaniem podpór [4]



Rys. 15. System pomiaru ramy RAM-EXAM™ marki HERKULES [4]



Rys. 16. Elementy systemu TRUCK-EXAM™ marki HERKULES [4]

W większości przypadków naprawy pojazdów ciężarowych, w których przeprowadza się również naprawę ramy nośnej, proces odbywa się wieloetapowo, m.in. konieczne jest odłączenie kabiny kierowcy od ramy nośnej.

4. NAPRAWA RAMY W KOSZTORYSIE SZKODY

Koszty naprawy ramy naprawczej jak i operacji niezbędnych do jej wykonania (rys. 17, 18) przeważnie są uwzględnione w całościowym kosztorysie naprawy szkody. Pomimo że dostępne są systemy kosztorysowania (Audatex, Eurotax) naprawy pojazdów samochodowych (rys. 19), wprowadzenie i uwzględnienie kosztów związanych z operacją naprawy ramy odbywa się poprzez zadanie operacji przez użytkownika systemu.



Rys. 17. Pojazd po szkodzie z uszkodzoną ramą nośną oraz pomocniczą (opracowanie własne)



Rys. 18. Deformacja ramy nośnej oraz pomocniczej w pojeździe ciężarowym po demontażu skrzyni ładunkowej (opracowanie własne)

		I NAPEŁNIĆ		
47-4100	01	ZBIORNIK PALIWA L WYB/WBUD	1	14
47-4011	ZAX	ZBIORNIK PALIWA PRZ L OCZYŚCIĆ	1	2
47-4030	ZAX	ZBIORNIK PALIWA PRZ L DO ZŁOMOWANIA	1	3
		PRZYGOTOWAĆ		
47-4603	01	ZBIORNIK PALIWA L WYMIENIĆ	1	8
		(ZBIORNIK WYBUDOWANY)		
		OBEJMUJE: CZUJNIK PRZEŁOŻYĆ, OCHRONY DOL		
		EWTL WYMIENIĆ		
47-5732	ZAX	OBYDWIE KONSOLE ZBIORNIKA PALIWA L	1	7
		WYB/WBUD (ZBIORNIK WYBUDOWANY)		
14-8012	ZAX	DOZOWANIE ADBLUE SPRAWDZIĆ	1	9
		KRÓTKIM TESTEM		
88-4327	ZAX	VORDERKOTFLUEGEL DER 2. V-ACHSE L	2	7
		WYBUDOWANIE/WBUDOWANIE		
88-4329	ZAX	VORDERKOTFLUEGEL DER 2. V-ACHSE L	2	3
		WYMIANA (WYBUDOW)		
88-4332	ZAX	VORDERKOTFLUEGEL DER 2. V-ACHSE R	2	7
		WYBUDOWANIE/WBUDOWANIE		
88-4334	ZAX	VORDERKOTFLUEGEL DER 2. V-ACHSE R	2	3
		WYMIANA (WYBUDOW)		
31-5510	ZAX	POPRZECZKA TYLNA WYB/WBUD	1	30
BRAK NR		DOD Z POPRZECZKA TYLNA	1	24
		(WYB/WBUD WSPORNIKA WZMOCN)		
BN		ŁĄCZNIK STABILIZ T L WYB-WBUD/WYMIANA	1*	18*
BN		PODU ZAWIESZ T L WYB-WBUD/WYMIANA	1*	12*
BN		RAMIĘ PRZEKŁ KIER WYB-WBUD/WYMIANA	1*	8*
BN		OSŁONA TERMIN WYDECH WYB-WBUD/WYMIANA	1*	3*
BN		BELKA POPRZ ŚRD WYB-WBUD/WYMIANA	1*	36*
BN		PRZEWÓD KALAN ADBLUE WYB-WBUD/WYMIANA	1*	3*
BN		PRZE KAT POW WYB-WBUD/WYMIANA	1*	3*
1000		ZABUDOWA DEMONTAŻ		1500.00*
--				--
1000		RAMA SAMOCHODU NAPRAWA		32664.00*
1000		ZBIOR ADBLUE L 25 L SPRAWDZENIE	1*	4* 53.33
1000		SILNIK + NAPĘDY SPRAWDZENIE	1*	60* 800.00
1000		ZABUDOWA PO DEMONTAŻ POMIARY	1*	12* 160.00
9401		SAMOCOD OPTYCZNIE POMIAR Z REGULACJĄ	1	72* 960.00
9402		SAMOCOD OPTYCZNIE POMIAR B/REGULACJI	1	48* 640.00
9412		RAMA POMIARY	1	120* 1600.00
			SYSTEM AUDATEX	STRONA 4

Rys. 19. Wyszczególnienie prac związanych z naprawą ramy i niezbędnymi operacjami powiązanymi w systemie Audatex (opracowanie własne)

Innym sposobem przedstawienia kosztów naprawy ramy jest wyodrębnienie ich z kalkulacji systemu i przedstawienie w formie wyceny szczątkowej (rys. 20).

Obrazki

WYCENA

Numer

Strona

Obrazki

Nr wyceny	Data utworzenia	Ważne od	Ważne do	Data płatności	Termin płatności	Forma płatności	Numer PARMA	Numer klienta	Ref. klienta
Typ pojazdu									
Nr raportacyjny									
Nr ramy									
VIN									
Stan licznika									
Kod produktu									
Data odbioru pojazdu									
Numer kontraktu									
Uwagi klienta									

Numer Operacji/Części	Nazwa Operacji/Części	VST	J.M.	Isk	Stawka/Cena	UP	Upust(%)	VAT(%)	Wartość VAT	Netto
0	Weryfikacja i naprawa ramy pojazdu	32.00	godz.	1.0						
	Robotnicza									
	demontaż - montaż elementów (									
	Wzrost napędowy, osprzęt	4.00	godz.	1.0						
	Pomiar									
0	Pomiar prowadności ramy pojazdu - po naprawie	8.00	godz.	1.0						
	Pomiar									
	Sprawdzenie i regulacja geometrii osi	8.00	godz.	1.0						
L	ŁABEPCONWANE									
0	Materiał techniczny 40%	70.00	godz.	1.0						
	Robotnicza									
	Naprawa ramy pojazdu									
	MATERIAŁY I TECHNOLOGICZNE		szk.	20.0						

Rys. 20. Wyszczególnienie prac związanych z naprawą ramy w ujęciu roboczegodzin (opracowanie własne)

5. PODSUMOWANIE

Złożoność konstrukcyjna pojazdów ciężarowych, ich wymiary oraz zadania, do realizacji których są wykorzystywane, determinują utrzymanie wysokiego poziomu ich stanu technicznego w trakcie eksploatacji. Aby to było możliwe, niezbędne jest dokonywanie napraw bieżących, okresowych oraz szkodowych w wyspecjalizowanych warsztatach. W aspekcie napraw powypadkowych, a w szczególności w przypadkach uszkodzenia ramy nośnej pojazdu niezbędne jest przeprowadzenie naprawy w odpowiedniej technologii z wykorzystaniem najnowocześniejszych systemów oraz przez wyszkolony do tego personel. Rama nośna jest najważniejszą częścią pojazdu ciężarowego. Do niej mocowane są pozostałe elementy wyposażenia, m.in. układu jezdnego, napędowego, zasilania oraz tego, za pomocą którego ściśle są one rozmieszczone. Ma pierwszorzędne znaczenie w wymiarze bezpieczeństwa użytkownika ze względu na przejmowanie wszystkich sił. Nieprawidłowe wykonanie naprawy powypadkowej ma znaczący wpływ zarówno na użytkownika pojazdu, jak i pozostałych uczestników ruchu drogowego. Istotną rolę w całym procesie naprawy odgrywają warsztat naprawczy oraz jego personel, który powinien zagwarantować wysoką jakość wykonania usługi przy równoczesnym prawidłowym jej rozliczeniu. Na rynku obecnie można wyróżnić ponadto kilkunastu dostawców systemów naprawczych ram i kabin pojazdów ciężarowych, którzy oferują sprzęt pozwalający sprostać wysokim oczekiwaniom jakościowym.

LITERATURA

- [1] Gontarz A., Czerwienko D., Pogorzelski I., Jurecki L., 2012. Bezpieczeństwo samochodów pożarniczych w czasie jazdy i na miejscu akcji. Monografie CNOBP-PIB, Józefów.
- [2] <https://truck.herkules-sc.pl>
- [3] <https://www.daimlertruck.com>
- [4] <https://www.lakiernik.com.pl>
- [5] <https://www.zssplus.pl>
- [6] Prochowski L., Unarski J., Wach W., Wicher J., 2008. Podstawy rekonstrukcji wypadków drogowych. WKiŁ, Warszawa.

SPOSÓB POMIARU STOPNIA ZUŻYCIA REFLEKTORÓW SAMOCHODOWYCH W CELU WYZNACZENIA MODELU NAPRAW I WYMIAN PREWENCYJNYCH

Sylwester Borowski*, Radosław Figura

Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska

Streszczenie. W pracy zaproponowano nową metodę diagnostyczną opartą na analizie obrazów w zakresie stanu technicznego kloszy reflektorów samochodowych. Zaobserwowano związek pomiędzy przebiegiem histogramu a stanem technicznym reflektora potwierdzonym za pomocą uznanego badania diagnostycznego. Pozyskiwanie danych o dynamice destrukcji kloszy reflektorów samochodowych może zostać wykorzystane do opracowania modeli matematycznych do wyznaczania optymalnego czasu do naprawy lub wymiany prewencyjnej reflektorów ze względu na dwie funkcje kryterialne: koszty napraw lub wymian prewencyjnych (minimalizacja) oraz niezawodność (maksymalizacja).

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo transportu, analiza strumieniowa, algorytm Forda

1. NAPRAWY – *PERFECT I MINIMAL REPAIR*

Użytkowanie pojazdów samochodowych wymaga odpowiedniego przygotowania z uwzględnieniem określania ich stanu technicznego zarówno ze względów bezpieczeństwa, jak i spełniania kryteriów stanu technicznego pozwalającego na uzyskanie pozytywnej oceny w trakcie corocznych badań technicznych. Pojazd samochodowy ze względu na jego złożoność można rozpatrywać jako obiekt techniczny składający się z wielu elementów stanowiących nierozłączną całość. Niezawodność takiego obiektu pozwala użytkować pojazd zgodnie z jego przeznaczeniem w odpowiednim czasie i z określonymi parametrami. Jednak użytkowanie każdego obiektu technicznego związane jest z występowaniem procesu degradacji. Powstające uszkodzenia mają negatywny wpływ na bezpieczeństwo i koszty pracy obiektu oraz systemów technicznych, w których on funkcjonuje.

Uszkodzenia mogą powodować powstawanie nie tylko innych defektów tych samych pojazdów, lecz także obiektów współpracujących, takich jak przyczepy. Jest to niekorzystne zarówno dla całego obiektu, jak i systemu. W celu zmniejszenia liczby uszkodzeń obiektów technicznych do zarządzania systemami wprowadza się różne strategie działań profilaktycznych. Jednak takie działania obarczone są zwiększonymi kosztami utrzymania systemów. Aby ograniczyć te koszty, należy opracować skuteczną strategię napraw i wymian.

* adres korespondencyjny: sylwester.borowski@pbs.edu.pl

Zarządzanie wymianami i naprawami w systemach przemysłowych wymaga wprowadzania do systemu różnych działań związanych z utrzymaniem odpowiedniego poziomu niezawodności i gotowości systemu. Działania te dzielą się na dwa rodzaje: profilaktyka prewencyjna (*preventive maintenance* PM) i naprawy (*corrective maintenance* CM). Ze względu na wzrastające koszty części wymiennych *corrective maintenance* są obecnie szeroko stosowane.

Użytkowanie pojazdów samochodowych łączy się zwykle z ich codzienną pracą związaną z wykonywaną funkcją, np. jako osobistego środka transportu lub środka lokomocji wykorzystywanego w ramach działalności danego przedsiębiorstwa. Taki stan powoduje problemy z wycofaniem pojazdu z użytkowania dla potrzeb przeprowadzenia koniecznych napraw. Nie bez znaczenia jest także gotowość warsztatów naprawczych do wykonania czynności w warunkach ich dużego obciążenia pracą.

W praktyce działania *corrective maintenance* są prowadzone w dwóch wariantach: po naprawie system jest „dobry jak nowy” (*perfect repair*) albo „zły jak stary” (*minimal repair*).

Prowadzenie napraw minimalnych bardzo często związane jest z koniecznością zapewnienia możliwości użytkowania pojazdu do momentu, gdy możliwe jest wyłączenie go z użytkowania i przekazanie do naprawy lub warunkowane ekonomicznie wysoką ceną części zamiennych. W związku z tym prowadzi się naprawy minimalne, które przywracają system do jego stanu niezawodnościowego tuż przed uszkodzeniem. Jednak te działania przywracają system do stanu pośredniego pomiędzy stanem niezdatności a stanem zdatności „dobry jak nowy”. Taki stan jest określany jako niedokładne utrzymanie (*imperfect maintenance*). Różnorodne modele niedokładnego utrzymania szczegółowo przedstawiono w pracach przeglądowych [7, 9].

Stosując odpowiednie strategie działań prewencyjnych i napraw, można zmniejszyć koszty utrzymania systemów. Podstawowe czynności w ramach takich strategii to wymiany ważnych elementów systemu oraz ustalenie częstotści przeglądów (określanie stanu technicznego). Harmonogram tych czynności jest często ustalany przez projektanta systemu lub producenta. Bardzo często po zakończeniu opieki gwarancyjnej harmonogram jest modernizowany przez użytkowników. Często to oni podejmują decyzję o wymianach zużytych elementów. Zawsze działania *corrective maintenance* wymagają uprzedniej diagnozy uszkodzenia oraz jego identyfikacji. Z tego powodu są kosztowne i wymagają wysokich umiejętności personelu.

Koszty napraw są na ogół wyższe od kosztów profilaktyki prewencyjnej. Podobnie średnie czasy napraw są większe od średnich czasów profilaktyki prewencyjnej. W przypadku niektórych systemów użytkownik decyduje się na naprawienie uszkodzonego komponentu bez jego wymiany. Ten rodzaj naprawy można uznać za minimalną naprawę (MR). Minimalna naprawa przywraca uszkodzony obiekt do stanu przed wystąpieniem uszkodzenia. Z tego punktu widzenia niektóre wymiany można uznać za minimalne naprawy. Opierając się na tej argumentacji, w literaturze zaproponowano dużo praktycznych modeli wymian z minimalną

naprawą. Z tych powodów opracowanie różnych strategii działań prewencyjnych, w ramach których proponowane są optymalne modele decyzyjne w celu zmniejszenia kosztów utrzymania systemu i zmniejszenia ryzyka zdarzeń niepożądanych, jest ważnym tematem badawczym w inżynierii niezawodności. Modele utrzymania prewencyjnego, ze względu na ich znaczenie gospodarcze, wzbudziły rosnące zainteresowanie badaniami niezawodności systemów.

Koncepcję napraw minimalnych w odniesieniu do teorii niezawodności wprowadzili w swojej pracy Barlow i Hunter [1]. W pracy tej rozpatrzony został model wymian okresowych i napraw minimalnych, zgodnie z którym zakłada się, że po każdej naprawie minimalnej uszkodzony system techniczny jest przywracany tylko do takiego samego stanu awaryjnego jak przed uszkodzeniem. W sposób formalny pojęcie napraw minimalnych zostało zdefiniowane przez Nakagawę i Kowadę w pracy [8]. Brown i Proschan [2] również rozważają kwestię minimalnej naprawy. Autorzy zakładają, że w przypadku uszkodzenia obiektu technicznego naprawę doskonałą wykonuje się z prawdopodobieństwem p , a naprawę minimalną z prawdopodobieństwem $q = 1 - p$. Zmodyfikowaną wersję takiego modelu zaproponowali Fontenot i Proschan [6]. W opracowanym modelu obiekt jest zastępowany nowym po czasie T i przeprowadzana jest naprawa doskonała lub naprawa minimalna z prawdopodobieństwami odpowiednio p i q dla uszkodzeń przerywanych.

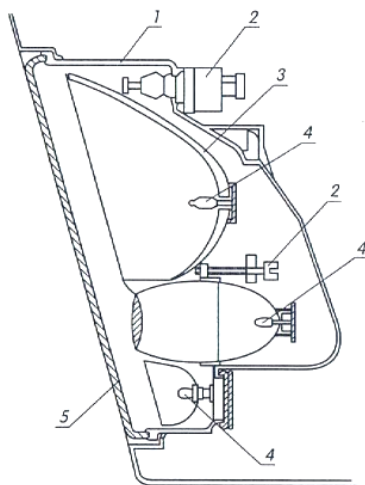
Podstawowym problemem w eksploatacji obiektów technicznych, takich jak środki transportu, jest określenie przez osobę podejmującą decyzję sposobu, bieżącego lub przyszłego, obchodzenia się z obiektem. Podstawą do podjęcia odpowiednich decyzji jest określenie stanu obiektu czy typu strategii obsługiwanego niezbędnego do zastosowania w danej sytuacji eksploatacyjnej.

Skuteczność podjętej decyzji jest bezpośrednio uzależniona od szybkości jej podjęcia oraz trafności.

2. REFLEKTORY SAMOCHODOWE

Reflektory główne są ważnym elementem wyposażenia podstawowego samochodu, zapewniają komfort podróżowania, ale przede wszystkim bezpieczeństwo. Ich budowę określa szereg norm i przepisów zależnych od rodzaju pojazdu oraz rynku, na jaki został wypuszczony [5]. Na rysunku 1 przedstawiono budowę reflektora samochodowego.

Od momentu wprowadzenia poliwęglanowych kloszy pojawił się problem starzejących się reflektorów. Wcześniejsze, szklane klosze były bardziej trwałe i odporne na czynniki atmosferyczne niż klosze stosowane współcześnie. Ich wymiana była łatwa, części dostępne, a regeneracja była niemożliwa lub nieoptymalna. Poliwęglan – w porównaniu ze szkłem – jest znacznie mniej wytrzymały, ale tym samym jest łatwiejszy w obróbce, co otwiera możliwość regeneracji, która jest dużo bardziej opłacalna od wymiany.



Rys. 1. Budowa reflektora samochodowego [4]: 1 – obudowa, 2 – urządzenia regulacyjne, 3 – odbłyśnik (lustro), 4 – źródła światła, 5 – klosz

Klosze rozpraszające (rys. 2) były najczęściej wykonane ze szkła, pojawiały się również z tworzywa sztucznego, ale raczej jako klosze lamp wskazujących lub tylnych. Wynikało to w głównej mierze z technologii tamtych czasów, czyli do około połowy lat 90. XX wieku. Klosze takie były bardzo odporne na warunki atmosferyczne oraz wysokie temperatury pochodzące ze źródła światła. Wadą była jednak kruchość materiału. Szkło jest bardziej wrażliwe na odpryski w porównaniu z obecnymi kloszami z tworzywa sztucznego. Kolejną wadą były możliwości formowania, co ograniczało prace projektantów, dlatego większość aut do połowy lat 90. miała reflektory o dużych, płaskich powierzchniach, zbliżonych do prostokąta lub okręgu [5].



Rys. 2. Reflektor ze szklanym kloszem rozpraszającym pochodzący z Mercedesa W124 [10]

Klosz gładki przedstawiony na rysunku 3 spełnia głównie funkcje estetyczną i ochronną. Nie pełni on żadnej funkcji modyfikującej strumień światła, chroni wewnętrzne elementy reflektora przed wpływami zewnętrznymi. Szyby gładkie, w odróżnieniu od szklanych kloszy rozpraszających, wykonane są z odpornego na zarysowania i uszkodzenia mechaniczne tworzywa sztucznego, którym najczęściej jest poliwęglan. Zastosowanie tworzywa zamiast szkła pozwoliło na znaczne zredukowanie masy reflektora, a w konsekwencji całego pojazdu.



Rys. 3. Reflektor z gładkim kloszem pochodzący z Mercedesa W205 [10]

Korzystną cechą poliwęglanu jako tworzywa jest także to, że jest bardziej przejrzysty oraz dużo łatwiejszy w formowaniu. Cecha ta pozwoliła projektantom na stosowanie wyrafinowanych w formie reflektorów. Jednak ich długotrwałe użytkowanie powoduje, że klosze stają się matowe, wypłowiałe lub żółkną. Jest to spowodowane tym, że tworzywo sztuczne w porównaniu ze szkłem jest znacznie bardziej miękkim materiałem. W celu poprawy trwałości reflektory pokrywa się specjalną powłoką bezbarwną, chroniącą poliwęglan przed warunkami atmosferycznymi. Powłoka ta jednak po kilku latach traci swoje właściwości lub zwyczajnie się wyciera od agresywnej chemii stosowanej na myjniach samochodowych, amplitudy temperatur danego regionu czy też soli i piasku, jakimi posypuje się drogi podczas zimy. To, co jest wadą, czyli miękkość materiału w porównaniu ze szkłem jest także swego rodzaju zaletą, ponieważ jest też łatwiejszy w obróbce, co pozwala na regenerację kloszy. Poliwęglan bardzo łatwo wypolerować, doprowadzając klosz do praktycznie fabrycznego stanu. Należy jednak pamiętać, że polerowanie to technika ścierna, a więc z klosza usuwana jest całkowicie powłoka ochronna, którą jednak z łatwością można odtworzyć. Na rynku istnieje wiele preparatów ochronnych do kloszy, których użycie polega na wpolerowaniu środka w klosz, jednak w tego typu preparatach czynność należy powtarzać co kilka miesięcy, jak zaleca producent. Inną formą odtworzenia powłoki ochronnej klosza jest lakierowanie wypolerowanego klosza lakierami bezbarwnymi, które same w sobie mają właściwości chroniące przed warunkami atmosferycznymi. Taki zabieg trwałością dorównuje fabrycznemu rozwiązaniu [5].

3. ZUŻYCIE REFLEKTORA I REGENERACJA

Zużycie jest to naturalny proces, jaki towarzyszy wszystkim elementom, niezależnie od tego, czy są użytkowane często czy sporadycznie. Nawet we właściwie i sporadycznie eksploatowanym pojeździe występują oznaki zużycia. Jedyną stałą wartością, jaka wpływa na stopień zużycia, jest czas. Wraz z biegiem czasu stopień zużycia postępuje bardziej intensywnie. Matowienie, żółknienie, mętnienie, rysowanie czy też odbarwianie się reflektorów samochodowych to tylko niektóre objawy zużycia. Takie reflektory prócz tego, że cechują się złym stanem wizualnym, także ograniczają transmisję światła o kilkadziesiąt procent. Poza ograniczeniem przepływu ilości światła zostaje również zniekształcony jego strumień, co zaburza widoczność oraz oślepia innych kierowców. Rozwiązaniem tego problemu jest wymiana zużytych reflektorów na nowe, jednakże wiąże się to z wysokimi kosztami. Bardzo zbliżony efekt można uzyskać poprzez regenerację takich lamp i to za ułamek ceny nowych [3].

3.1. Degradacja kloszy wykonanych z tworzyw sztucznych

Matowienie i mętnienie kloszy reflektorów

Główną przyczyną matowych kloszy reflektorów są drobne elementy stałe odbijające się od ich powierzchni podczas jazdy. Małe kamyczki, żwir i piasek wyrzucane spod kół innych samochodów uderzają w czoło reflektora, powodując powstawanie mikroporów. Podobny efekt można zaobserwować podczas piaskowania. Z upływem lat wierzchnia warstwa ochronna lampy staje się coraz słabsza, co przyspiesza ten proces. Kolejnym czynnikiem osłabiającym klosz jest światło słoneczne, głównie promieniowanie UV. Na rysunku 4 przedstawiono kilkunastoletni reflektor narażony na piaskowanie i promieniowanie słoneczne [10].



Rys. 4. Matowa i mętna szyba reflektora [10]

Żółknięcie kloszy reflektorów

Promieniowanie ultrafioletowe destruktywnie oddziałujące na reflektor jest główną przyczyną żółknięcia oraz mętnienia powierzchni klosza. Jest to tak zwany proces oksydacji, czyli utleniania powierzchni poliwęglanu, z którego wykonane są klosze. Najbardziej narażona na żółknięcie jest górna część reflektora, na którą promienie UV padają pod kątem zbliżonym do 90° . Na rysunku 5 przedstawiono przykład żółkniętego reflektora [10].



Rys. 5. Przykład procesu oksydacji klosza reflektora [9]

Zarysowania kloszy reflektorów

Nieprawidłowa eksploatacja to podstawowa przyczyna zarysowań kloszy reflektorów. Składa się na nią czyszczenie lamp z kurzu, soli i błota suchą gąbką lub ręcznikiem papierowym, a także zimowe skrobanie ich ze szronu. Zarysowania powstają również podczas kolizji drogowych. Ten rodzaj zużycia różni się od pozostałych tym, że to użytkownik ma bezpośredni wpływ na tempo oraz zaawansowanie zużycia. Na rysunku 6 przedstawiono zarysowania reflektora na przykładzie tylnych lamp, których klosz jest z tego samego tworzywa co przednie reflektory [10].



Rys. 6. Zarysowania klosza na przykładzie tylnego reflektora [10]

Odbarwienia i wżery kloszy reflektorów

Bardzo często na powierzchni reflektora powstają nieregularne zmętnienia, zacieki, plamy czy odbarwienia. Przyczyniają się do tego zbyt agresywne środki chemiczne stosowane przez myjnie lub zawarte w słabej jakości płynie do spryskiwaczy, owady, a także ptasie odchody. Te ostatnie przyczyniają się również do powstawania wżerów na powierzchni poliwęglanowych kloszy. Przykładowy reflektor z tego rodzaju zużyciem przedstawiono na rysunku 7 [10].



Rys. 7. Przykład wżerów, plam i odbarwień na reflektorze [9]

3.2. Regeneracja kloszy wykonanych z tworzyw sztucznych

W ramach użytkowania reflektorów samochodowych część użytkowników prowadzi tzw. regenerację reflektorów. Jest to przykład naprawy minimalnej pozwalającej na przywrócenie zdolności reflektora samochodowego bez wymiany elementu na nowy.

Regeneracja kloszy reflektorów polega na polerowaniu zużytej powierzchni klosza. Pierwszą operacją, od jakiej zaczyna się regenerację, są oględziny reflektora i ocena zaawansowania stopnia zużycia jego powierzchni, ponieważ od tego zależeć będzie intensywność pracy i zapotrzebowania w materiały. Demontaż nie jest wymagany. Po oględzinach, jeśli klosz kwalifikuje się do zregenerowania, tj. nie ma pęknięć, głębokich rys czy odprysków, powinno zabezpieczyć się wszystkie elementy sąsiadujące z lampą. Części wkoło reflektora zabezpiecza się dokładnie taśmą w celu ochrony przed ewentualnym uszkodzeniem lakieru. Prawidłowo zabezpieczony klosz wygląda jak na rysunku 8 [10].



Rys. 8. Zabezpieczenie elementów sąsiadujących z reflektorem [10]

Kolejnym etapem jest wstępne szlifowanie klosza reflektora w celu pozbycia się resztek starej warstwy zabezpieczającej. W ten sposób pozbywa się również głębszych rys, odprysków oraz wżerów. Operację tę wykonuje się za pomocą wodnego papieru ściernego o odpowiedniej gradacji, zależnej od stopnia zużycia. Przy ekstremalnie zdegradowanych reflektorach powinno się zacząć od papieru o gradacji P500, a przy delikatnym zużyciu nawet od P1500. Podczas szlifowania papier powinno się bardzo często płukać w wodzie, aby był czysty i mokry, co ochroni powierzchnię przed niepożądanymi efektami w postaci głębokich rys. Ważną kwestią jest to, że szlifować należy naprzemiennie poziomo i pionowo, ponieważ koliste ruchy mogą pozostawić okrągłe rysy, które w późniejszych etapach regeneracji będą trudne do usunięcia. Celem szlifowania wstępnego jest uzyskanie równomiernie matowej powierzchni tworzywa jak na rysunku 9 [10].



Rys. 9. Klosz po wstępnym szlifowaniu papierem wodnym o gradacjach P500 i P1000 [10]

Niezależnie od tego, od jakiej gradacji rozpoczyna się regeneracja, kolejne etapy szlifowania powinny być przeprowadzane stopniowo coraz to mniejszym ziarnem. Należy zacząć od przykładowo P2000, następnie zastosować P2500,

a skończyć na gradacji P3000. Im więcej stopni się przejdzie, tym lepszy efekt można uzyskać. Po przeprowadzeniu wszystkich potrzebnych etapów szlifowania i po zakończeniu na najwyższej gradacji reflektor powinien być wolny od rys, wżerów i plam. Powierzchnia będzie równomiernie matowa, co przedstawiono na rysunku 10 [10].



Rys. 10. Reflektor po przeprowadzeniu wszystkich etapów prac z papierem wodnym [10]

Kolejnym etapem regeneracji jest polerowanie klosza. Do tej operacji potrzebna jest maszyna polerska, krążki lub pady polerskie oraz pasta polerska. Polerowanie zaczyna się od zamontowania krążka w maszynie lub wiertarce. Następnie należy nanieść niewielką ilość środka polerskiego na zwilżony wodą krążek i bez włączania maszyny rozetrzeć go po powierzchni reflektora. Po wykonaniu takiego przygotowania można rozpocząć polerowanie. Polerować należy płasko przyłożonym padem do powierzchni szkła. Polerowanie należy zakończyć po usunięciu zamglenia, jakie pozostało po wstępnym szlifowaniu papierem. Ma trwać do momentu uzyskania pożądanej przejrzystości. Po wytarciu reflektora mikrofibra z resztek pasty polerskiej uzyskuje się efekt jak na rysunku 11 [10].



Rys. 11. Reflektor po przeprowadzeniu wszystkich etapów prac z papierem wodnym [10]

Proces regeneracji można na tym etapie uznać za zakończony, jednak do pełnej odnowy brakuje ochrony świeżo wypolerowanego klosza przed warunkami atmosferycznymi. Taka przejrzystość bez warstwy ochronnej utrzyma się przez kilka miesięcy, następnie klosz zacznie się znów degradować, ponieważ polerowanie spowodowało usunięcie fabrycznej warstwy ochronnej. Po zabezpieczeniu klosza przed warunkami atmosferycznymi efekt powinien utrzymać się przez kilka lat. Powierzchnię klosza można zabezpieczyć na dwa sposoby. Pierwszy z nich to użycie specjalistycznego środka do ochrony reflektorów lub twardego wosku najlepiej z filtrem UV, które aplikuje się poprzez wcieranie ich w powierzchnię poliwęglanu, a następnie się ją poleruje. Wadą takich środków jest to, że nie są one permanentne i wymagają ponownych aplikacji co kilka miesięcy. Drugim rozwiązaniem, które daje permanentny efekt i zabezpieczenie jak z fabryki, jest lakierowanie klosza lakierem bezbarwnym. Problemem przy lakierowaniu jest styczność lakieru do powierzchni klosza. Powłoki lakierowane potrzebują odpowiednio zmatowionej powierzchni, dlatego szlifując z wykorzystaniem tej przy tej metody, kończy się na gradacji P2500 lub mniej. Lakier podczas aplikacji powinien zalać wszystkie rysy i zmatowienia pozostałe po szlifowaniu, w efekcie z matowego klosza uzyskuje się ładną przejrzystą powierzchnię. Ten sposób regeneracji ma sporą grupę przeciwników, którzy uważają to rozwiązanie za nieprofesjonalne, ponieważ gołym okiem reflektor może i jest przejrzysty, ale pod lakierem pozostaje zmatowiona powierzchnia. Zaletą lakierowania jest długotrwała ochrona przed warunkami atmosferycznymi, a także drogowymi w postaci soli czy kamyków. Lakier należy nanieść na czystą i odtłuszczoną powierzchnię klosza, a następnie wypolerować utwardzony lakier. Na rysunku 12 przedstawiono reflektor po całkowitej regeneracji [10].



Rys. 12. Reflektor po całkowitym procesie regeneracji klosza [9]

4. NOWA METODA BADAŃ STOPNIA ZUŻYCIA KLOSZA REFLEKTORA

Zaistniała potrzeba opracowania nowej metody diagnostycznej pozwalającej na ściśle określenie stanu technicznego reflektora samochodowego. Badania odbywające się podczas okresowego badania technicznego na stacji kontroli pojazdów z wykorzystaniem specjalnego przyrządu do pomiaru ustawienia i światłości świateł samochodów nie pozwalają określić tego stanu precyzyjnie. Badanie techniczne pozwala jedynie na określenie stanu zdadności. Reflektor może być zakwalifikowany jako zdadny lub niezdadny – kwalifikujący się do naprawy.

4.1. Opis stanowiska badawczego

Do badań zostały wykorzystane dwa używane reflektory samochodowe. Pierwszy z nich (rys. 13) pochodził z Opla Vectry C z 2004 roku. Klosz reflektora nosił widoczne ślady zużycia mieszanego w postaci zmatowienia, rys oraz odbarwień i wżerów. Po przeprowadzeniu serii badań reflektor został poddany regeneracji (rys. 14) do dalszej części pracy. Drugi reflektor pochodził ze Skody Fabii I z 2006 roku. Były na nim widoczne ślady degradacji w postaci zmatowienia oraz żółknięcia klosza, co przedstawiono na rysunku 15. Efekt po regeneracji drugiego reflektora zaprezentowano na rysunku 16. W obu reflektorach zastosowano nową żarówkę H7 świateł mijania w celu ujednolicenia warunków badań.



Rys. 13. Reflektor przed regeneracją z samochodu Opel Vectra C 2004 rok (opracowanie własne)



Rys. 14. Reflektor po regeneracji z samochodu Opel Vectra C 2004 rok (opracowanie własne)



Rys. 15. Reflektor przed regeneracją z samochodu Skoda Fabia I 2006 rok (opracowanie własne)



Rys. 16. Reflektor po regeneracji z samochodu Skoda Fabia I 2006 rok (opracowanie własne)

Reflektory następnie podłączono do tego samego źródła zasilania, jakim był w pełni naładowany akumulator żelowy MWS 7.2-12 (12 V, 7.2 Ah). Po każdym użyciu podczas badania akumulator zostawał na nowo maksymalnie naładowywany.

4.2. Metodyka badań

Badanie reflektorów na okręgowej stacji kontroli pojazdów

Badanie przeprowadzono w celach porównawczych jako punkt odniesienia dla pozostałych testów. Podczas sprawdzania reflektorów zostały zachowane wszystkie możliwe warunki jak podczas badania technicznego.

Do testów wykorzystano specjalistyczny przyrząd typu USP-20 PLA do pomiaru światłości, natężenia światła oraz ustawienia świateł oświetleniowych samochodów (rys. 17). Urządzenie jest wykorzystywane na okręgowych stacjach kontroli pojazdów. Przyrząd miał aktualny przegląd oraz spełniał wszystkie niezbędne przepisy do podejmowania takowych badań [3, 8].

Reflektory podczas badania ustawiono nieruchomo przed „okiem” urządzenia, a następnie przeprowadzono test przed regeneracją oraz w późniejszym czasie, po niej. Test przeprowadzono na światłach mijania.



Rys. 17. Przyrząd do pomiaru ustawienia i światłości świateł oświetleniowych samochodów (opracowanie własne)

Badanie powierzchni klosza za pomocą mikroskopu cyfrowego

Cele analizy to badanie powierzchni klosza reflektora oraz wykonanie za pomocą zdjęć mikroskopowych przed i po regeneracji, oraz porównanie ich ze zdjęciami fabrycznie nowych lamp. Wizualna ocena powiększonej powierzchni

ma zobrazować, na czym tak naprawdę polega problem zużycia i jak to zjawisko w praktyce wygląda z bliska.

Do badań za pomocą tej metody jako innowacyjny tester został wykorzystany mikroskop cyfrowy ze skalą powiększenia od 20 do 1000 razy. Urządzenie jest wyposażone w regulację przybliżenia, przycisk do robienia zdjęć oraz 8 diod led. Do obsługi mikroskopu niezbędny jest komputer z zainstalowanym oprogramowaniem załączonym do zestawu. Drugą ciekawą opcją obsługi mikroskopu jest możliwość jego podłączenia do smartfona z systemem operacyjnym Android lub iOS, niezbędna w tym przypadku będzie darmowa aplikacja obsługująca mikroskop. Druga opcja sprawia, że urządzenie staje się mobilnym testerem i można je wykorzystywać praktycznie w każdych warunkach.

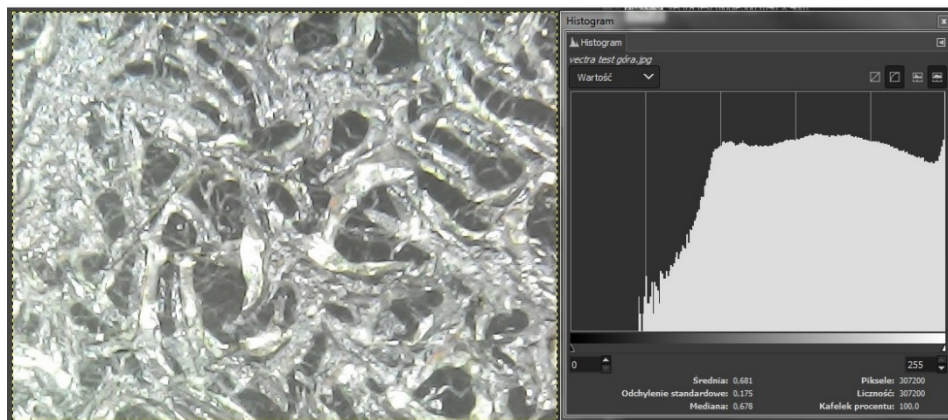
Badanie powierzchni klosza zostało przeprowadzone na wyłączonych reflektorach, w różnych jego punktach opisanych w późniejszej części. Test przeprowadzono dwukrotnie, odpowiednio przed, jak i po regeneracji. Dodatkowo dla porównania wyników przeprowadzono testy na fabrycznie nowych reflektorach u autoryzowanego dealera KIA. Badanie nigdy nieużywanych reflektorów miało posłużyć jako punkt wyjściowy skali przy diagnozowaniu z wykorzystaniem tej metody. Włączone reflektory podczas tego badania nie wносиły nowych odmiennych wniosków, dlatego zostały pominięte.

Mikroskop podczas testów przystawiono do powierzchni klosza stykowo, a następnie ustawiono ostrość. Przybliżenie podczas badania, według producenta, wynosiło około 900 razy względem nieuzbrojonego ludzkiego oka. Większe przybliżenie uniemożliwiałoby złapanie ostrości. Na rysunku 18 przedstawiono metodę przeprowadzania badania.



Rys. 18. Metodyka badań za pomocą mikroskopu cyfrowego (opracowanie własne)

Uzyskane w ten sposób cyfrowe fotografie mikroskopowe za pomocą programu graficznego GIMP zostały przedstawione w postaci histogramu logarytmicznego jak na rysunku 19. Histogram wskazuje ilość pikseli danego koloru względem całego zdjęcia. Taki zabieg umożliwił ocenę stanu reflektora jednoznacznie w sposób ilościowy.



Rys. 19. Histogram logarytmiczny fotografii mikroskopowej reflektora przed regeneracją (opracowane własne)

4.3. Wyniki badań

Badanie reflektorów na okręgowej stacji kontroli pojazdów

Badanie reflektorów przed regeneracją potwierdziło niesprawność obu reflektorów wynikającą z poziomu ich zużycia. Pojazd wyposażony w takie reflektory nie uzyskałby pozytywnego wyniku badania technicznego, a diagnosta zaleciłby ich naprawę.

Reflektor pochodzący ze Skody Fabii przed regeneracją rzucał jednolitą plamę światła na tablicę wzorcową urządzenia o dość sporym rozmyciu, dodatkowo plama była zamglona. Przyczyną tego według diagnosty była matowa powierzchnia klosza reflektora, która rozpraszała odcięcie rzucanego światła. Na wynik mógł również wpłynąć stan odbłyśników, którego analiza została pominięta na potrzeby tej pracy, choć lustra reflektora były w dobrej kondycji. Plama świetlna rzucona przez zregenerowany reflektor była bardzo dobrze widoczna, miała prawidłowe odcięcie i charakterystyczne załamanie. Według diagnosty samochód z takim reflektorem, po niewielkiej regulacji, przeszedłby badanie techniczne z wynikiem pozytywnym.

Pomiar natężenia oświetlenia światła mijania przed regeneracją wskazał wyniki od 1730 do 2200 lx, w zależności od mierzonego skupiska. Polskie normy nie narzucają minimalnej wartości luksów natężenia oświetlenia dla światła mijania. Dla diagnosty ważniejsza jest plama światła oraz granica świa-

tlócenia. Na rysunkach 20 i 21 przedstawiono rzuty plamy światła reflektora Skody przed i po regeneracji na tablicę wzorcową urządzenia diagnostycznego USP-20 PLA. Po regeneracji wartość natężenia oświetlenia zauważalnie wzrosła, mieszcząc się w przedziale od 2870 do 3190 lx.



Rys. 20. Rzut plamy świetlnej świateł drogowych reflektora Skody przed regeneracją (opracowanie własne)



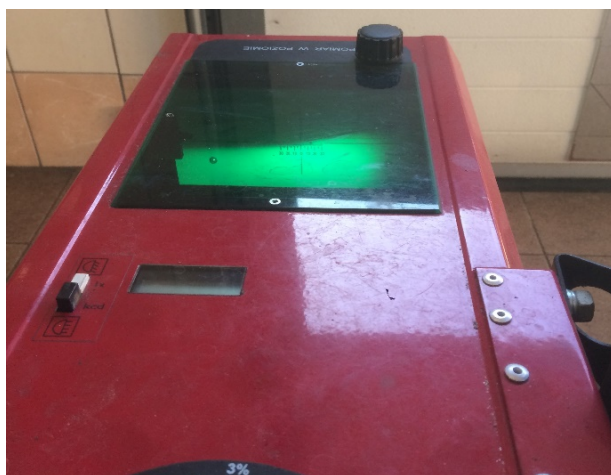
Rys. 21. Rzut plamy świetlnej świateł drogowych reflektora Skody po regeneracji (opracowanie własne)

Test reflektora pochodzącego z Opla Vectry przed regeneracją również został przeprowadzony na światłach mijania. Wyniki natężenia oświetlenia oscylowały w granicach od 560 do 730 lx, w zależności od złapanego skupiska. Wartość pomiaru była bardzo niska w porównaniu z pierwszym reflektorem,

a to za sprawą bardzo mocno zużytej powierzchni klosza w obrębie soczewki światła mijania. Badanie natężenia oświetlenia tego reflektora po regeneracji wykazało dużą poprawę. Wartości zmierzone zawierały się w przedziale od 1880 do 2040 lx. Pomimo bardzo niskiego wyniku natężenia oświetlenia odcięcie granicy światłocienia było bardziej zauważalne niż w reflektorze Skody, co można zauważyć na rysunku 22. Reflektor Opla był wyposażony w odbłyśnik elipsoidalny połączony z soczewką, a taki zestaw charakteryzuje się właśnie bardzo wyraźnym odcięciem. Niski wynik natężenia oświetlenia był natomiast skutkiem bardzo mocno zużytego klosza w postaci zmatowienia i głębokich wżerów właśnie w okolicy soczewki światła mijania. Na rysunku 23 przedstawiono rzut plamy świetlnej z tego samego reflektora po regeneracji. Granica światłocienia jest idealnie odcięta oraz ma poprawny kształt.



Rys. 22. Rzut plamy świetlnej reflektora Opla przed regeneracją (opracowanie własne)



Rys. 23. Rzut plamy świetlnej reflektora Opla po regeneracji (opracowanie własne)

W tabeli 1 zestawiono wyniki pomiarów natężenia oświetlenia dla obu reflektorów przed oraz po regeneracji.

Tab. 1. Wyniki pomiaru natężenia oświetlenia przed i po regeneracji (opracowanie własne)

	Reflektor Skody Fabii	Reflektor Opla Vectry
Pomiar natężenia oświetlenia przed regeneracją lx	1750	560
	1730	730
	2200	590
ŚREDNIA	1890	627
Pomiar natężenia oświetlenia po regeneracji lx	3030	1920
	3190	1880
	2870	2040
ŚREDNIA	3030	1950

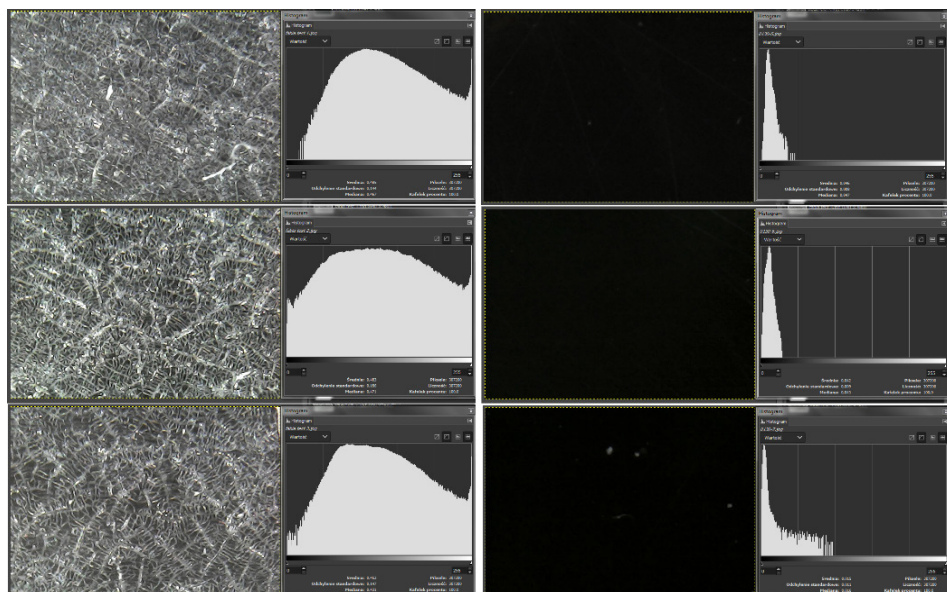
Badanie powierzchni klosza za pomocą mikroskopu cyfrowego

Badanie za pomocą mikroskopu cyfrowego wykazało, na czym tak naprawdę polega zużycie klosza. W wyniku testów przed regeneracją uzyskano ciekawe zdjęcia na poziomie większym od makro, ukazujące z bliska strukturę zużytego poliwęglanu, z którego wykonano klosze obydwu reflektorów, a także powłok, jakimi są pokryte.

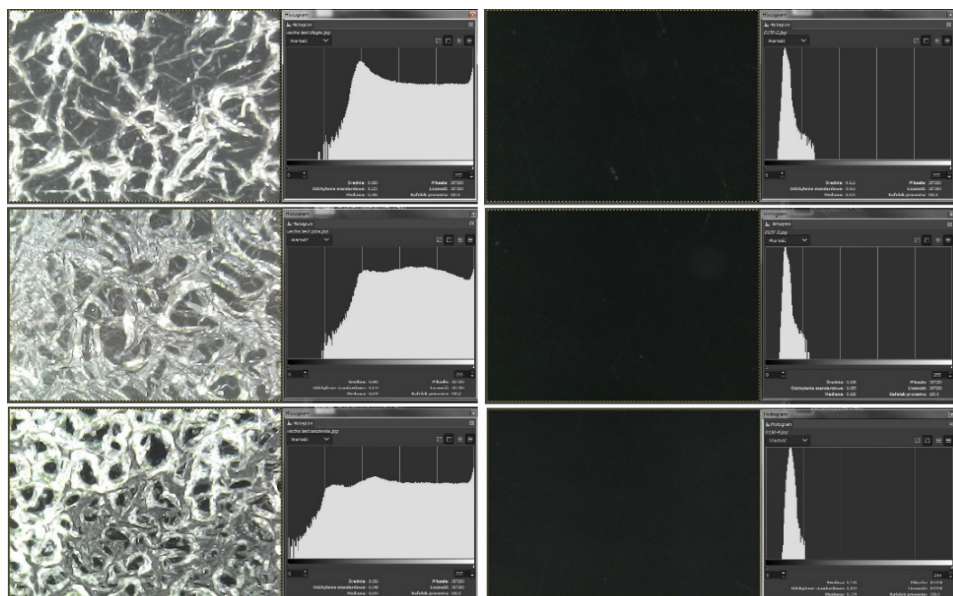
Zdjęcia wykonane przed regeneracją wykazały mikropęknięcia, wżery i porowatości powierzchni poliwęglanu. Uszkodzenia te gołym okiem widać na reflektorze w postaci zamglenia lub żółknięcia. Fotografie wykonane po regeneracji są jednolite, mają dużo ciemniejszą barwę zbliżoną do czerni. Na niektórych zdjęciach po regeneracji można zaobserwować pojedyncze mikrorysy, których nie widać gołym okiem. Rysy te są pozostałościami po procesie regeneracji. Oprócz pozostałości po szlifowaniu widać również drobne białe punkciki. Są to z reguły głębsze odpryski, których regeneracja nie była w stanie usunąć, lub zanieczyszczenia w postaci kurzu i drobinek włókien.

Porównując zdjęcia po regeneracji z fotografiami nowych reflektorów, można zauważyć bardzo duże podobieństwo. Fotografie mają podobny odcień oraz strukturę, jednak te wykonane na nowych lampach są czystsze. Drobne jaśniejsze plamki to najprawdopodobniej zanieczyszczenia w postaci kurzu oraz smugi po czyszczeniu.

Przykładowe wyniki badań przedstawiono w zestawieniu z histogramami logarytmicznymi z programu GIMP na rysunkach 24 i 25.



Rys. 24. Zestawienie histogramów zdjęć mikroskopowych powierzchni reflektora Skody Fabii (opracowanie własne)



Rys. 25. Zestawienie histogramów zdjęć mikroskopowych powierzchni reflektora Opla (opracowanie własne)

Z histogramu można odczytać liczebność pikseli danego odcienia koloru względem pikseli całej grafiki. Na podstawie tych wartości rysowany jest wy-

kres. Dzięki tym liczbom istnieje możliwość zastosowania skali, która w łatwy i bezinwazyjny sposób umożliwiłaby diagnozę reflektorów samochodowych. W tabeli 2 zestawiono średnie wartości kolorów w skali od 0 – oznaczającego kolor czarny, do 1 – oznaczającego biały.

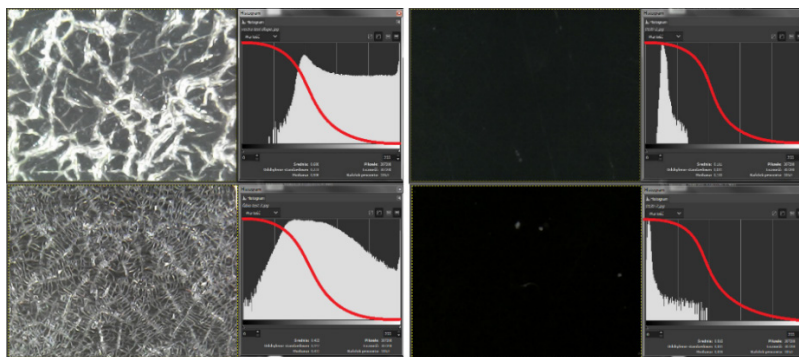
Tab. 2. Wartości odczytane z histogramów programu GIMP (opracowanie własne)

Średnia wartość koloru odczytana z histogramu	Skoda Fabia	Opel Vectra
Przed regeneracją	0,485	0,600
	0,483	0,681
	0,452	0,656
Po regeneracji	0,046	0,111
	0,042	0,108
	0,015	0,130

Wartości po regeneracji są kilkukrotnie niższe, co oznacza, że na zdjęciach przeważał dużo ciemniejszy kolor.

Oprócz zebrania i porównania wyników niezbędna byłaby granica lub punkt, do którego reflektor byłby dopuszczony do eksploatacji, a powyżej którego klasyfikowałby się do wymiany bądź regeneracji. Do ustalenia tak precyzyjnego punktu, który miałby decydować o tak poważnej kwestii jak dopuszczenie do ruchu, niezbędne są rozszerzone badania i więcej danych, żeby utworzyć bazę. Aby metoda była skuteczna, przepisy musiałyby ulec unormowaniom.

Inną metodą do interpretacji histogramów jest nałożenie na wykres pewnej „wzorcowej krzywej granicznej” jak na rysunku 26. Czerwona linia dzieląca histogram wyznaczałaby granicę, w której to wykres powinien się zawierać z lewej strony, jak w przypadku reflektorów po regeneracji. Jeśli wykres barw wystawałby poza granicę wzorcową, wskazywałoby to, że reflektor nosi ślady zużycia i trzeba by wziąć pod uwagę ewentualną wymianę lub regenerację. W celu zoptymalizowania granicy niezbędne byłoby pozyskanie większej ilości danych.



Rys. 26. Histogramy zdjęć reflektorów przed i po regeneracji z naniesioną krzywą graniczną (opracowanie własne)

5. PODSUMOWANIE

Na potrzeby analizy możliwości diagnozowania zostały przeprowadzone badania, mające na celu znalezienie innowacyjnej metody do badania stopnia zużycia kloszy reflektorów samochodowych. Pierwsze badanie, które przeprowadzono na okręgowej stacji diagnostycznej z użyciem specjalistycznego przyrządu typu USP-20 PLA do pomiaru światłości, natężenia światła oraz ustawienia świateł, było traktowane jako próba zerowa potwierdzająca kolejne metody. Badanie zostało przeprowadzone na uznanym i używanym w całym kraju urządzeniu w celu sprawdzenia reflektorów. Jak wykazały wyniki badania, reflektory po regeneracji świeciły z większym natężeniem oświetlenia, niekiedy kilkukrotnie większym, a plama świetlna rzucana na tablicę urządzenia była dużo lepiej wyraźna i miała prawidłowy kształt. Z opinii diagnosty towarzyszącego badaniu jednoznacznie wynikało, że samochód z reflektorami w stanie jak sprzed regeneracji nie uzyskalby pozytywnego wyniku badania technicznego ze względu na niesprawne reflektory. Wynik po regeneracji dla diagnosty byłby wynikiem pozytywnym, a to w połączeniu z wynikami badania potwierdza skuteczność regeneracji.

W ramach opracowywania nowej metody diagnostyki kloszy reflektorów samochodowych zaproponowano metodę oceny histogramów zdjęć reflektorów z naniesioną krzywą graniczną. Zaobserwowano związek pomiędzy przebiegiem histogramu a stanem technicznym reflektora potwierdzonym uznanym badaniem diagnostycznym.

Pozyskiwanie danych o dynamice destrukcji kloszy reflektorów samochodowych może zostać wykorzystane do opracowania modeli matematycznych do wyznaczania optymalnego czasu do naprawy lub wymiany prewencyjnej reflektorów ze względu na dwie funkcje kryterialne: koszty napraw lub wymian prewencyjnych (minimalizacja) oraz niezawodność (maksymalizacja).

LITERATURA

- [1] Barlow R., Hunter L., 1960. Optimum preventive maintenance policies. *Operation Research* 8, 90–110.
- [2] Brown M., Proschan F., 1983. Imperfect repair. *Journal of Applied Probability* 20, 851–859.
- [3] Brzeziński M., Ratujemy stare lampy – regeneracja reflektorów krok po kroku, <https://www.auto-swiat.pl/porady/eksploatacja/ratujemy-stare-lampy-regeneracja-reflektorow-krok-po-kroku-ile-kosztuje-kiedy-warto/n5hk2g3> (dostęp: 28.11.2016).
- [4] Charakterek, Reflektory w samochodzie – od początku do współczesności, <https://www.charakterek.pl/2016/02/reflektory-w-samochodzie-od-poczatku-do.html> (dostęp: 03.11.2022).

- [5] EuroMaster, Oświetlenie, <https://www.euromaster.pl/serwisowanie-auta/oswietlenie> (dostęp: 19.06.2022).
- [6] Fontenot R.A., Proschan F., 1984. Some imperfect maintenance models. [In:] Reliability Theory and Models, ed. M. Abdel-Hameed., E. Çinlar, J. Quinn, Academic Press, London.
- [7] Knopik L., Migawa K., 2017. Optimal age-replacement policy for non-repairable technical objects with warranty. *Maintenance and Reliability* 19(2), 172–178.
- [8] Nakagawa T., Kowada M., 1983. Analysis of a system with minimal repair and its application to replacement policy. *European Journal of Operational Research* 12(2), 176–182.
- [9] Pham H., Wang H., 1996. Imperfect maintenance. *European Journal of Operational Research* 94, 425–438.
- [10] Popkiewicz R., Historia świateł w samochodach, <https://www.auto-motor-i-sport.pl/technika/Historia-swiateł-w-samochodach,19371,1> (dostęp: 29.10.2022).

ANALIZA PROCESU NAPRAWY KAROSERII POJAZDU SAMOCHODOWEGO NA WYBRANYM PRZYKŁADZIE

Ewa Kuliś^{1*}, Tomasz Kałaczyński¹, Radosław Goncarzewicz¹,
Serhiy Horiashchenko²

¹ Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska

² Khmeltsky National University, 11 Instytutska Street, Khmelnytskyi, 29000, Ukraine

Streszczenie. W pracy autorzy analizują kompleksowy proces naprawy karoserii samochodowej. Na przykładzie Opla Astra J 1.6 z 2014 roku omówiono znaczenie karoserii w kontekście bezpieczeństwa, aerodynamiki, estetyki i komfortu użytkowania. Przedstawiono różne typy karoserii oraz metody oceny ich stanu technicznego, w tym metody organoleptyczne oraz zaawansowane pomiary 3D i 2D. Autorzy opisują szczegółowy proces naprawy, począwszy od oceny uszkodzeń, przez demontaż uszkodzonych elementów, na naprawie i wymianie panelowej kończąc. W publikacji zwrócono uwagę na konieczność przestrzegania zaleceń producentów i zastosowania odpowiednich narzędzi oraz metod. Wykazano, że zastosowanie nowoczesnych technologii pomiarowych, takich jak systemy 3D, może znacząco poprawić dokładność i efektywność napraw.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo transportu, naprawa karoserii, systemy pomiarowe, metody naprawy

1. WSTĘP

Karoseria samochodowa, będąca nieodłączną częścią każdego pojazdu, odgrywa istotną rolę w takich aspektach, jak bezpieczeństwo, aerodynamika, estetyka i komfort użytkowania. Nadwozie jest elementem wyróżniającym dany pojazd oraz określającym jego zastosowanie.

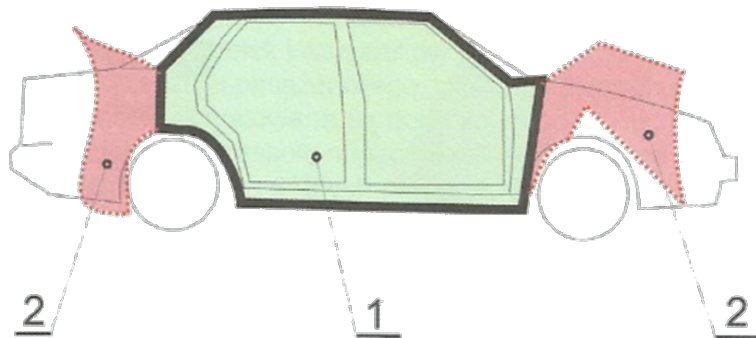
Wskutek rozwoju silników i układów napędowych pozwalających na pokonywanie coraz większych odległości doszło do zwiększenia znaczenia nadwozia. Aby sprostać wymaganiom oraz oczekiwaniom użytkowników pojazdów, karoserię jest stale się modyfikuje w celu poprawienia jej cech. Wraz z rozwojem i wzrostem popularności nowoczesnych karoserii rośnie zapotrzebowanie na coraz bardziej atrakcyjne nadwozia. Skutkiem ubocznym wzrastającej liczby pojazdów na drogach jest zwiększenie częstości uszkodzeń oraz kolizji. Przez swą złożoność coraz trudniej jest przeprowadzić poprawną naprawę blacharską nawet drobnych uszkodzeń konstrukcji nośnej. Postęp w procesach tworzenia nowych typów nadwozi wymusił powstanie nowych możliwości oceny stanu technicznego oraz nowe metody napraw. Proces naprawy blacharskiej karoserii pojazdu samochodowego wiąże się ze ścisłym przestrzeganiem zasad oraz zaleceń proponowanych przez producentów. Główne aspekty tej pracy to

* adres korespondencyjny: ewa.kulis@pbs.edu.pl

szczegółowe zbadanie prawdopodobnych uszkodzeń karoserii w samochodach, określenie metod weryfikacji stanu technicznego karoserii oraz zaprojektowanie procesu naprawy na wybranym przykładzie.

2. KONSTRUKCJA KAROSERII

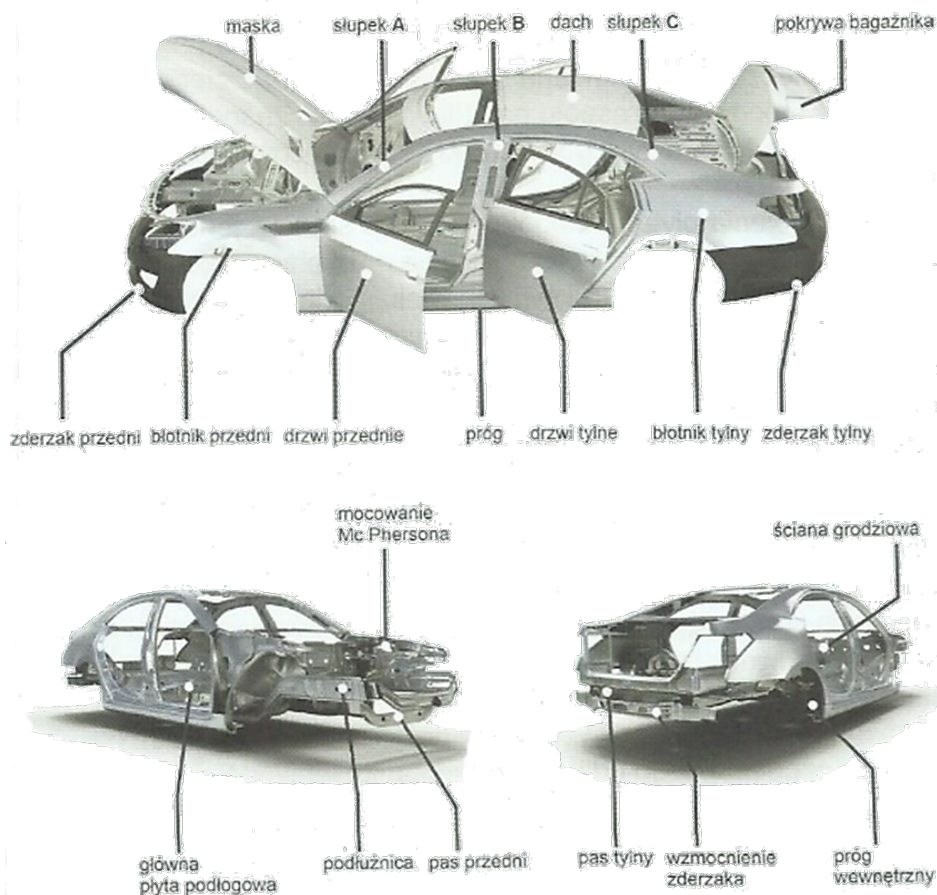
Podziału karoserii samochodowej można dokonać na dwie główne kategorie: ramowe oraz samonośne. Ramowe dzieli się na nieniosące oraz półnośne, natomiast samonośne – na szkieletowe oraz skorupowe. Taki podział wskazuje różnice konstrukcji zespołów nośnych z zachowaniem założenia, że będą pełnić taką samą funkcję. Uwzględniając wszelkie obciążenia, na które są narażone nadwozia pojazdów osobowych, zastosowano podział bryły pojazdu na strefy o różnej wytrzymałości (rys. 1). Miejsca montażu podwozia jednostki napędowej oraz całego osprzętu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 1. Nadwozie pojazdu z wyróżnionymi strefami: 1 – nieodkształcalną i 2 – o dużej odkształcalności [4]

Aktualnie do konstrukcji płyt podłogowych stosuje się elementy wykonane z blachy tłoczonej, które po odpowiednim dopasowaniu są ze sobą zgrzewane. Producenci wzmacniają konstrukcję przez stosowanie różnego rodzaju belek, wsporników i podłużnic. Płyta podłogowa ze względu na swoją złożoność jest najdroższym elementem całego samochodu, jednak dzięki unifikacji na rynku produkcji aut stosuje się te same elementy konstrukcyjne w produkcji wielu modeli samochodów. Podobnie jak w przypadku konstrukcji samonośnych konstrukcje ramowe są tak projektowane, aby zapewnić przede wszystkim bezpieczeństwo kierowcy oraz pasażerom w przypadku niebezpiecznego zdarzenia na drodze. Rama pojazdu jest podzielona na strefy, które mają za zadanie rozproszenie energii uderzenia tak, aby zniwelować energię działającą na przedział pasażerski. Poza zastosowaniem stref zgniotu pojazd o nadwoziu ramowym charakteryzuje się elastycznymi łączeniami oraz elementami złącznymi, takimi jak śruby.

W momencie kolizji te połączenia mogą zostać ścięte, dzięki czemu nadwozie nie przejmuje bezpośredniego uderzenia.



Rys. 2. Budowa karoserii samonośnej [4]

3. METODY OCENY STANU TECHNICZNEGO KAROSERII POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH

Podstawą w poprawnym procesie naprawy jest odpowiednia ocena uszkodzeń, które powstały w wyniku kolizji. Próby przywrócenia właściwej geometrii nadwozia są możliwe jedynie dzięki zdecydowanej i szybkiej ocenie stanu technicznego z zastosowaniem odpowiednich narzędzi i metod.

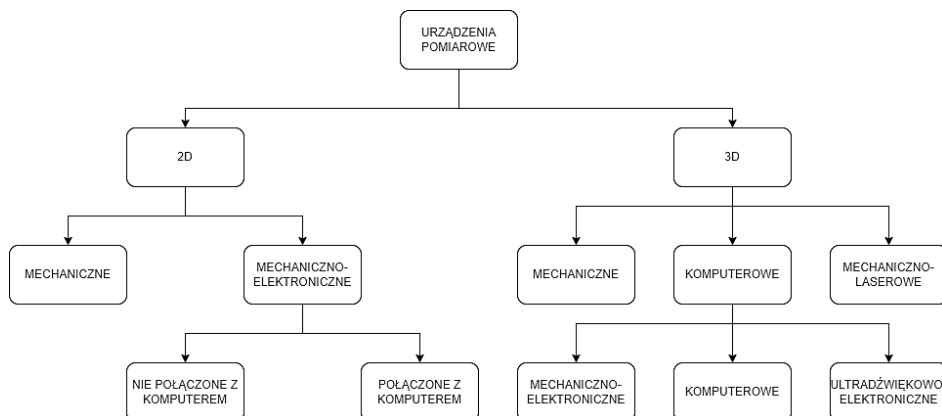
3.1. Organoleptyczna ocena uszkodzeń

Wstępna ocena zakresu uszkodzeń jest zwykle przeprowadzona bez wykorzystania zaawansowanych systemów pomiarowych. Po usunięciu uszkodzonych elementów nadwozia, które zasłaniają uszkodzenie krytyczne karoserii, dokonuje się wstępnej oceny zakresu zniszczeń. Jest to początek prac diagno-

styczno-naprawczych w warsztacie, który podejmuje się naprawy pojazdu i pozwala jedynie na bardzo ogólny szacunek kosztów i dobranie metody dalszej diagnostyki, ponieważ wiele uszkodzeń może być nadal ukrytych i zostaną zidentyfikowane w dalszych etapach pomiarów nadwozia.

3.2. Systemy pomiarowe

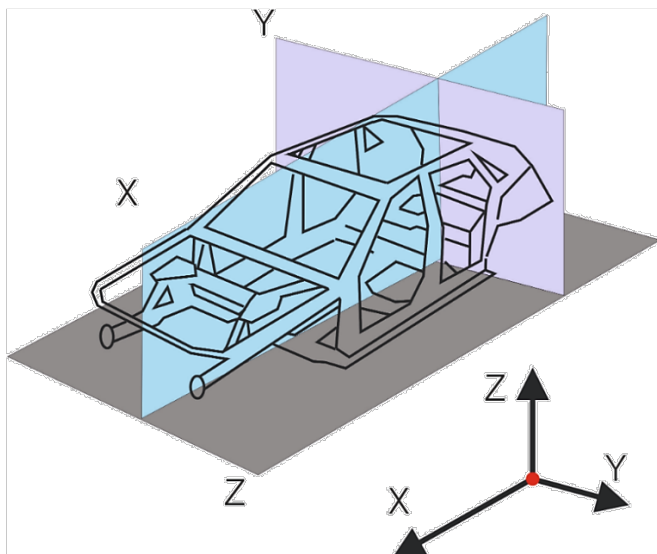
Istnieje wiele systemów pomiarowych, które różnią się między sobą zasadą działania, jednak niezależnie od konstrukcji oraz upływu lat wszystkie spełniają założenia, które zostały im postawione. Podział urządzeń pomiarowych przedstawiono na rysunku 3. Dzięki analizie rynku zauważyć można niewielki stopień rozwoju konstrukcji naprawczo-pomiarowych do napraw powypadkowych. Działanie urządzeń pomiarowych dalej opiera się na pomiarze „trójwymiarowej suwmiarki mechanicznej”, natomiast elektronicznych modułów stosowanych w pomiarach – na technologii ultradźwięków lub lasera.



Rys. 3. Podział urządzeń pomiarowych do karoserii samochodowej (opracowanie własne)

3.3. Pomiar 3D

Urządzenia bazujące na pomiarach punktów w przestrzeni wykorzystują tzw. współrzędnościową technikę pomiarową. Podczas pomiaru z zastosowaniem urządzeń 3D wyznacza się układ odniesienia, który opiera się na głównych elementach, takich jak: wzdłużna płaszczyzna pionowa, płaszczyzna pozioma i płaszczyzna poprzeczna (rys. 4). Dzięki wyznaczeniu tych trzech elementów można wskazać położenie danego punktu. Po wyznaczeniu kilku punktów w przestrzeni można przejść do utworzenia wizualizacji całej konstrukcji karoserii. Za wygenerowanie obrazu odpowiada specjalnie przygotowane oprogramowanie do analizy karoserii. Na podstawie pomiarów i ich opracowania komputerowego porównuje się wyniki obiektu badanego z danymi zawartymi w bazie porównawczej.



Rys. 4. Idea pomiaru trójwymiarowego [2]

3.4. Pomiar 2D

Pomiary 2D pozwalają jedynie na zmierzenie odległości pomiędzy punktami. Ten typ pomiarów nie umożliwia określenia punktów w przestrzeni, jednak pozwala na proste i szybkie zmierzenie możliwych odkształceń. Dokonuje się tego za pomocą prostych narzędzi, takich jak miara zwijana, liniały oraz wzorniki, jednak z powodu skomplikowanej i zawilej budowy bryły pojazdu samochodowego należy stosować specjalistyczne narzędzia pomiarowe, takie jak przymiary blacharskie (rys. 5). Umożliwiają one pomiar między punktami mimo trudnej dostępności i specyficznych kształtów karoserii. Punkty pomiarowe często są zwykłym otworem, otworem podłużnym, śrubą, nakrętką lub narożnikiem. Niektóre przymiary blacharskie są wyposażone w dodatkową, trzecią końcówkę, która umożliwia w niektórych przypadkach pomiar w trzech płaszczyznach, jednak nie jest to dokładne, a wymaga dużego doświadczenia i kwalifikacji. Informacje dotyczące punktów bazowych zazwyczaj są kompletowane w bazach danych, które później są oferowane jako wyposażenie systemów pomiarowych lub są dystrybuowane oddzielnie. Zalecane jest korzystanie z danych zawartych w instrukcjach napraw dostarczanych przez producentów, ponieważ gwarantują one pewne wartości wymiarów, co sprawia, że są najbardziej wiarygodne. Niezależnie od rodzaju bazy danych dopuszcza się wykonywanie pomiarów z zachowaniem zasad symetrii w charakterystycznych punktach, jednak diagnostyka bazująca na takim postępowaniu wymaga dużej ostrożności i mimo wszystko najlepiej sprawdza się kontrola „wielowarstwowa”.



Rys. 5. Mechaniczny przymiar blacharski na nadwoziu pojazdu Hyundai i30 (opracowanie własne)

4. USUWANIE USZKODZEŃ

Usuwanie szkód powstałych w wyniku wcześniej wymienionych przyczyn uszkodzeń można podzielić ze względu na metodę naprawy oraz zastosowane urządzenia na dwie zasadnicze kategorie: bez zastosowania ramy naprawczej oraz z zastosowaniem ramy naprawczej. Przed przystąpieniem do naprawy dokonuje się wstępnej oceny uszkodzeń, która ma na celu dobór odpowiednich metod pomiarów oraz prawdopodobnej naprawy. Po dokonaniu oględzin i późniejszych pomiarach można dobrać metodę naprawy. Zastosowanie zbyt prostej metody może okazać się niewystarczające, natomiast wybór zbyt skomplikowanej – stać się niepotrzebnym problemem i źródłem kosztów. Dobrze wykonana analiza może ułatwić wskazanie odpowiedniej metody. Często o wyborze rodzaju naprawy decydują posiadane środki techniczne.

5. PROJEKT PROCESU NAPRAWY KAROSERII POJAZDU SAMOCHODOWEGO NA WYBRANYM PRZYKŁADZIE

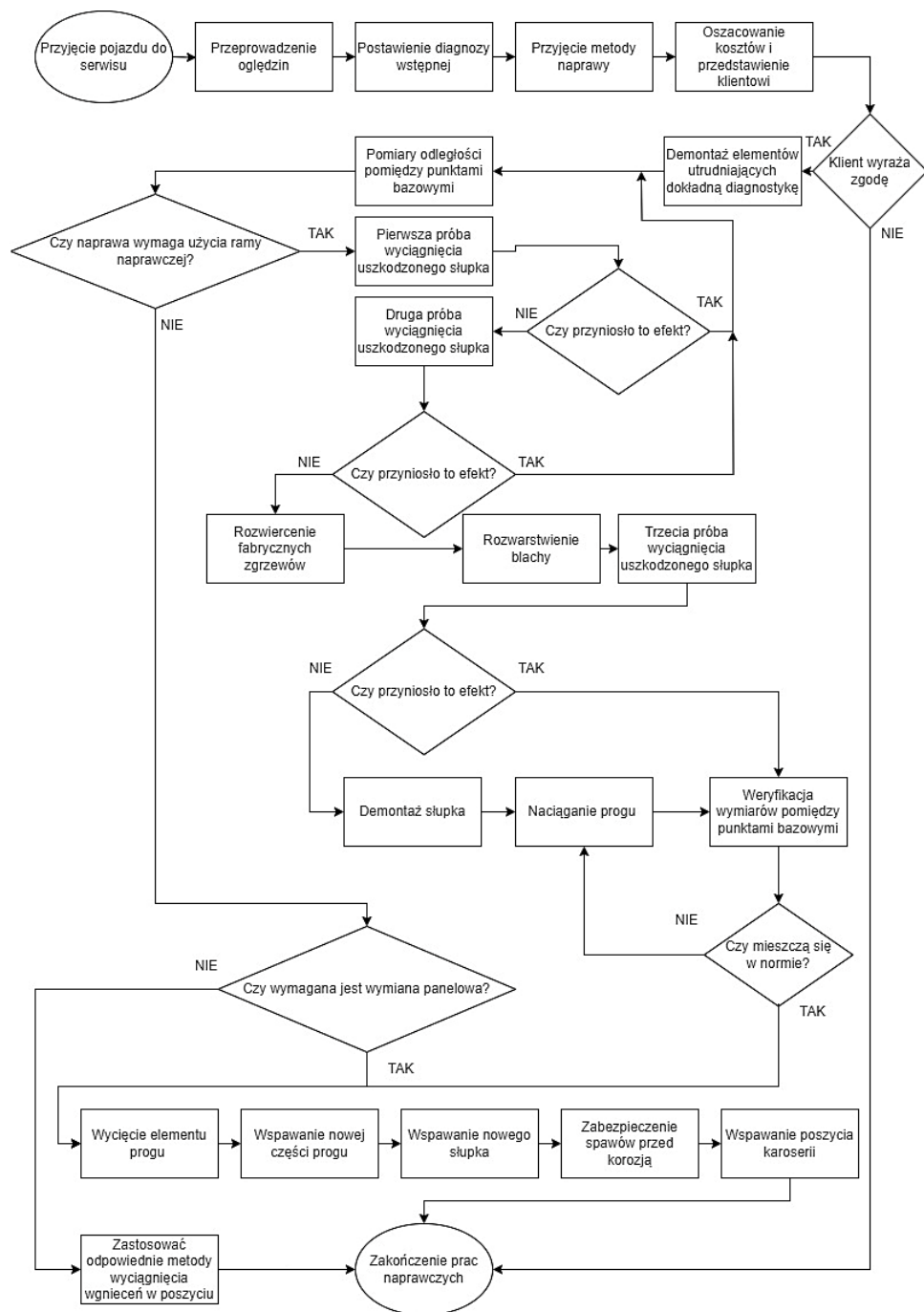
Naprawie poddano samochód Opel Astra J 1.6 wyprodukowany w 2014 roku (rys. 6). Samochód brał udział w niegroźnym zderzeniu dwóch pojazdów i został uszkodzony jego lewy bok. Projekt procesu naprawy Opla przedstawiono na schemacie blokowym (rys. 7).



Rys. 6. Opel Astra J 1.6 2014 (opracowanie własne)

W pierwszej kolejności należy przeprowadzić oględziny oraz diagnozę organoleptyczną, które mają na celu oszacowanie zakresu uszkodzeń, określenie i przyjęcie prawdopodobnej metody naprawy oraz przedstawienie klientowi warsztatu wstępnego zakresu prac i kosztorysu. Po podjęciu przez właściciela pojazdu decyzji o naprawie można rozpocząć pracę. Działania rozpoczyna się od osadzenia pojazdu na ramie naprawczej mobilnej. Następnie wymagane jest, aby zdemontować elementy nadwozia mogące utrudnić poprawną diagnostykę oraz późniejszą naprawę uszkodzeń powstałych w wyniku kolizji.

Przeprowadzone pomiary względem punktów bazowych wykazały, że uszkodzenie nie naruszało płyty podłogowej, co znacznie ułatwiało pracę i zredukowało możliwe koszty naprawy. Pomiar odległości przymiarem blacharskim pomiędzy punktami wykazał, że słupek B został przesunięty do środka pojazdu o 60 mm przy podstawie. Dodatkowo uszkodzeniu uległ próg, który został zgnieciony i przesunięty w kierunku środka pojazdu. Po przeprowadzonych pomiarach można przystąpić do naprawy. Aby przywrócić fabryczne wymiary oraz estetyczny wygląd, trzeba wykorzystać ramę naprawczą do rozprężenia uszkodzonych elementów, a następnie do przeprowadzenia naprawy progu pojazdu w celu umożliwienia wymiany panelowej uszkodzonych elementów poszycia karoserii.



Rys. 7. Schemat blokowy procesu naprawy (opracowanie własne)

W pierwszym etapie naprawy należy podjąć próbę odcignięcia słupka B na zewnątrz pojazdu, aby rozprężyć pofalowany próg (rys. 8). Działania nie przyniosły skutku, ponieważ uszkodzenia okazały się na tyle trwałe, że dalsze próby siłowego wyciągnięcia w punkcie chwytu skończyłyby się pogorszeniem stanu już uszkodzonego pojazdu lub nawet rozerwaniem konstrukcji.



Rys. 8. Próba wyciągnięcia podstawy słupka z lewej strony (opracowanie własne)

Warto podjąć drugą próbę tej samej czynności, jednak z drugiej strony podstawy słupka, która w przypadku obiektu naprawianego również zakończyła się niepowodzeniem.

Aby naciąganie konstrukcji za słupek B przyniosło zamierzony cel, należy rozwinąć fabryczne zgrzewy, co umożliwi wyciągnięcie słupka „warstwa po warstwie”. Przekrój elementów nadwozia składa się z warstw blachy, które mają usztywnić całą konstrukcję oraz zapewnić odpowiednie bezpieczeństwo w przypadku kolizji drogowej.

Zdejmowanie kolejnych warstw blachy nie tylko ma na celu wyciągnięcie wgniecenia, lecz także jest koniecznym etapem w przypadku wymiany panelowej. Do rozwinienia zgrzewów wykorzystano rozwiertak pneumatyczny z frezem $\varnothing 8$. Po przeprowadzonym rozwierceniu zgrzewów rozwarstwiono blachę za pomocą przecinaków blacharskich, co umożliwiło naciągnięcie części słupka i podjęcie dalszych kroków demontażu nadwozia. Przystąpiono do dalszego demontażu słupka oraz progu w celu zwiększenia dostępu do uszkodzonych elementów oraz możliwie jak najlepszego chwytu karoserii. Po kolejnych rozwierceniach i cięciach blachy zdołano rozłączyć oba elementy w celu wyprostowania progu. Dzięki postępującemu demontażowi można było podjąć próbę naprawy najbardziej uszkodzonego miejsca karoserii.

Proces naprawy na ramie umożliwił rozprężenie konstrukcji oraz zbliżenie wartości pomiarów pomiędzy punktami bazowymi do wartości wzorcowych, co wykazały pomiary przeprowadzane w czasie napraw. Niestety urządzenie naprawcze tego typu nie przywróci estetyki oraz dokładnego kształtu uszkodzonych elementów karoserii. Pofalowany próg należało wymienić w ramach wymiany panelowej podobnie jak słupek.

Elementy zamienne muszą być dobrane według numeru VIN pojazdu, aby mieć pewność, że wytłoczenia będą identyczne. Podobnie jak w przypadku uszkodzonych części karoserii pojazdu należy rozwinąć fabryczne zgrzewy, aby rozwarstwić elementy progu oraz słupka. W pierwszej kolejności wspawano za pomocą metody MIG próg, a następnie słupek. Podstawą wymiany panelowej jest spajanie elementów w miejscach fabrycznych zgrzewów. Zapewnia to odwzorowanie oryginału oraz gwarantuje wymiary między punktami bazowymi zbliżone do wartości wzorcowych. Dzięki zachowaniu tej zasady udało się przywrócić konstrukcji odpowiednie wymiary, co zweryfikowano po złączeniu elementów.

Przed kolejnym etapem naprawy panelowej należy zadbać o odpowiednie zabezpieczenie konstrukcji przed korozją w miejscach spawanych. Do tego celu używa się mas uszczelniających na bazie kauczuku. Są one przeznaczone do uszczelniania oraz zabezpieczenia połączeń spawanych, zgrzewanych oraz spoin lutowanych.

W momencie zakończenia prac nad uszczelnieniem nadwozia w miejscach spawanych w celu ich zabezpieczenia rozpoczęto ostatni etap wymiany panelowej progu oraz słupka, jakim jest nałożenie poszycia karoserii. Podobnie, jak w poprzednim etapie elementy tłoczone zostały nałożone na pozostałe i przyspawane w miejscach fabrycznych zgrzewów, co ukazano na rysunku 9.



Rys. 9. Wspawane poszycie progu oraz słupka (opracowanie własne)

6. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Za pomocą projektu naprawy karoserii samochodowej na wybranym przykładzie wykazano, jak ważne jest kompleksowe podejście do procesu naprawy. Dzięki przedstawieniu potencjalnych uszkodzeń, które mogą powstać zarówno podczas kolizji drogowej, jak i przez nieodpowiednią eksploatację pojazdu, można dokonać dokładnej analizy i oceny stanu technicznego uszkodzonego nadwozia. Wybierając odpowiednią metodę pomiarów oraz dostosowując metody naprawy do konkretnego uszkodzenia, można przeprowadzić proces naprawy z dużą dokładnością. Planując proces naprawy, należy postępować zgodnie z zalecaniami zawartymi w literaturze oraz dokumentacjach serwisowych, ponieważ gwarantują odpowiednio przeprowadzoną naprawę. Dzięki przestrzeganiu zaleceń producenta pojazdu oraz dzięki dostarczonym danym serwisowym w postaci wymiarów pomiędzy punktami bazowymi przeprowadzono poprawnie naprawę przedstawionego pojazdu, co stanowi potwierdzenie efektywności przyjętego podejścia. Podstawa przeprowadzania procesu naprawy to dokładna diagnoza i starannie dokonywane działania naprawcze. Karoseria pojazdu została przywrócona do kształtu oraz wymiarów zbliżonych do wartości wzorcowych, wskazanych przez producenta pojazdu.

Aby usprawnić proces diagnostyczny oraz wpłynąć na dokładność napraw, można zaproponować zastosowanie wysoko zaawansowanych metod oceny stanu technicznego w postaci złożonych systemów pomiarowych w technologii 3D. Takie rozwiązanie pozwala wygenerować wizualizację całego pojazdu z dużą dokładnością. Opracowanie to dostarcza cennych wskazówek dla projektantów przyszłych napraw karoserii, podkreślając znaczenie dokładnej analizy, starannego planowania i stosowania nowoczesnych technologii w procesie naprawy. Dzięki temu można było zweryfikować opracowany projekt naprawy.

LITERATURA

- [1] Dokumentacja Techniczno-Ruchowa, HERKULES.
- [2] <https://lakiernik.com.pl/pomiary-karoserii-cz-2> (dostęp: 16.06.2024).
- [3] Kałaczyński T., Łukasiewicz M., Wilczarska J., Sadowski A., Kuliś E., Musiał J., Podgórski J., 2017. Analiza metod oceny trwałości powłok ochronnych. Khmelnitsky National University.
- [4] Kuliś E., 2024. Identification of threats during the bodywork and paint repair process. Matec Web of Conferences.
- [5] Livesey A., Robinson A., 2019. The Repair of Car Bodies. Routledge, Oxon.
- [6] Raatz B., 2020. Blacharstwo samochodowe. RG-Media, Białe Błota.
- [7] Wicher J., 2012. Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego. WKŁ, Warszawa.
- [8] Wielgołaski W., 2023. Pomiedzy blacharstwem a lakiernictwem. RG-Media, Białe Błota.
- [9] Zieliński J., 2008. Konstrukcja nadwozi samochodów osobowych i pochodnych. WKŁ, Warszawa.

MODELOWANIE PROCESU LIKWIDACJI SZKÓD POJAZDÓW W ASPEKcie OGRANICZENIA WYPŁAT NIENALEŻNYCH ODSZKODOWAŃ

Piotr Aleksandrowicz^{1*}, Katarzyna Markowska²

¹ Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska

² Politechnika Śląska, Wydział Transportu i Inżynierii Lotniczej, ul. Akademicka 2A, 44-100 Gliwice, Polska

Streszczenie. W pracy podjęto problematykę modelowania procesu likwidacji szkód komunikacyjnych w pojazdach, umożliwiającego ograniczenie wypłat nienależnych odszkodowań. Omówiono przebieg zdarzeń drogowych, procedury związane z oględzinami pojazdów i miejsca zdarzenia. Przedstawiono też charakterystykę programów symulacyjnych do weryfikacji zdarzeń oraz studium przypadku zderzenia bocznego pojazdów i wykorzystania wyników symulacji do obliczeń kosztów naprawy powypadkowej. Autorzy w pracy zawarli również wnioski i uwagi mogące mieć zastosowanie w praktyce likwidacji szkód oraz w rozwoju systemów informatycznych wspierających weryfikację fraudów ubezpieczeniowych, a także modeli zderzeń w programach symulacyjnych stosowanych w rekonstrukcji wypadków drogowych.

Słowa kluczowe: szkoda komunikacyjna, fraud ubezpieczeniowy, koszt naprawy pojazdu, modele zderzeń, V-SIM, modelowanie procesu, naprawa powypadkowa, bezpieczeństwo naprawy

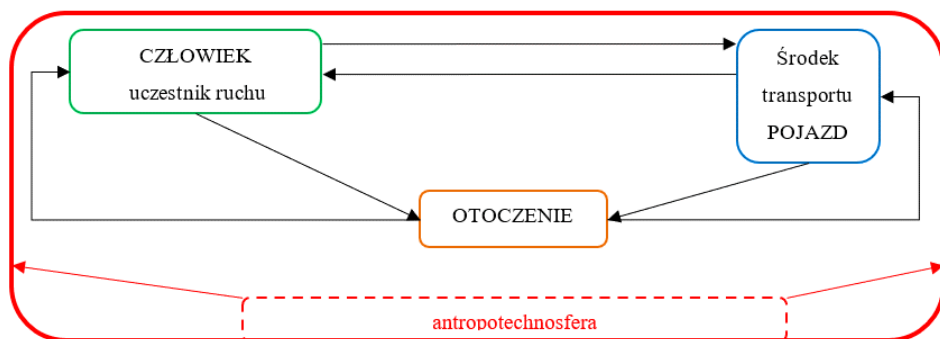
1. RODZAJE ZDARZEŃ DROGOWYCH I ICH PRZEBIEG

Ruchliwość i przemieszczanie ludzi oraz masowy już transport towarów powodują zwiększenie ryzyka powstania zdarzenia drogowego, a w konsekwencji naprawy pojazdu. Każde zdarzenie drogowe jest procesem, którego czynniki analizowane są jako relacje oddziaływań w systemie nazwanym najczęściej C-P-O, czyli człowiek – pojazd – otoczenie [14].

W literaturze przedmiotu wymienia się najważniejsze czynniki mające wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego w odniesieniu do ww. elementów systemu:

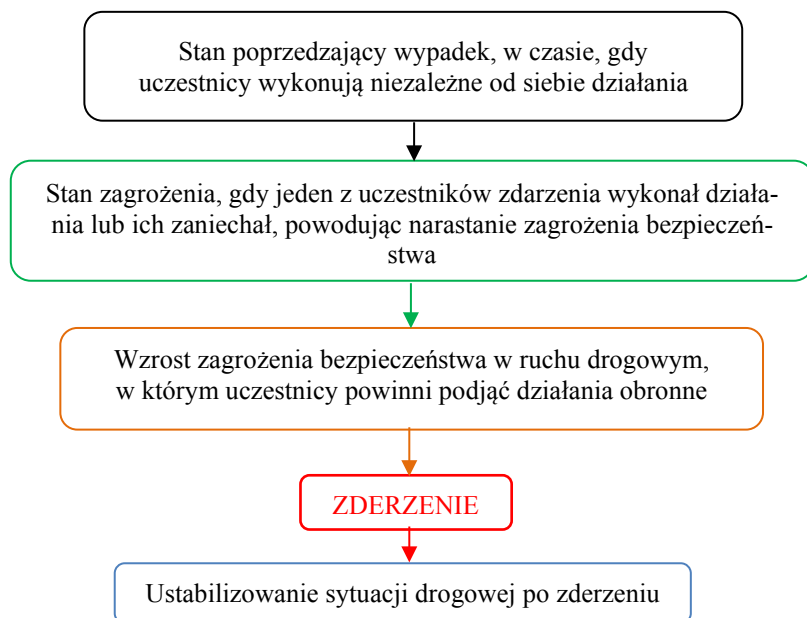
- CZŁOWIEK z jego wiedzą, umiejętnościami, stopniem koncentracji oraz cechami fizycznymi i in.,
 - POJAZD z jego masą, ładunkiem, wymiarami, stanem technicznym, układami wspomagającymi kierowcę oraz właściwościami pochłaniania energii zderzenia itp.,
 - OTOCZENIE z infrastrukturą drogi i oznakowaniem, natężeniem ruchu.
- Powiązania funkcjonalne przebiegu procesu C-P-O przedstawiono na rysunku 1.

* adres korespondencyjny: p.aleksandrowicz@pbs.edu.pl



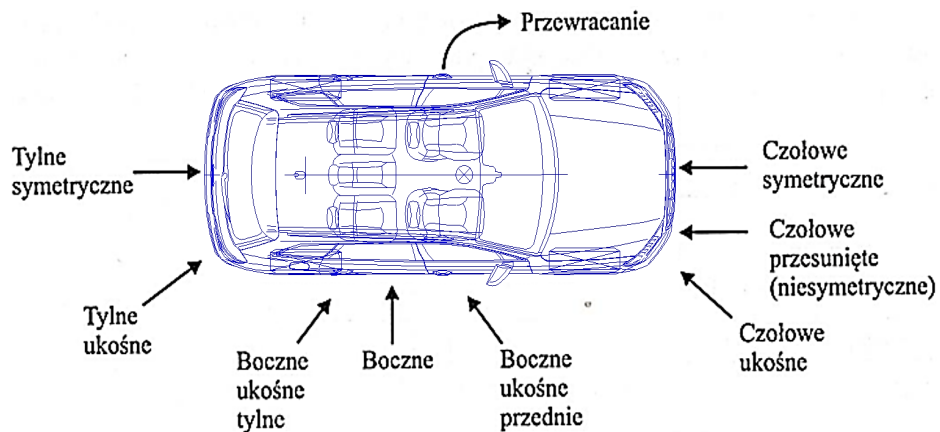
Rys. 1. System Człowiek – Pojazd – Otoczenie (opracowanie własne)

Rekonstrukcja przebiegu zdarzenia polega na odtworzeniu relacji czasoprzestrzennych między uczestnikami wypadku, który charakteryzuje się etapami, przedstawionymi w postaci schematu blokowego na rysunku 2 [12, 13].

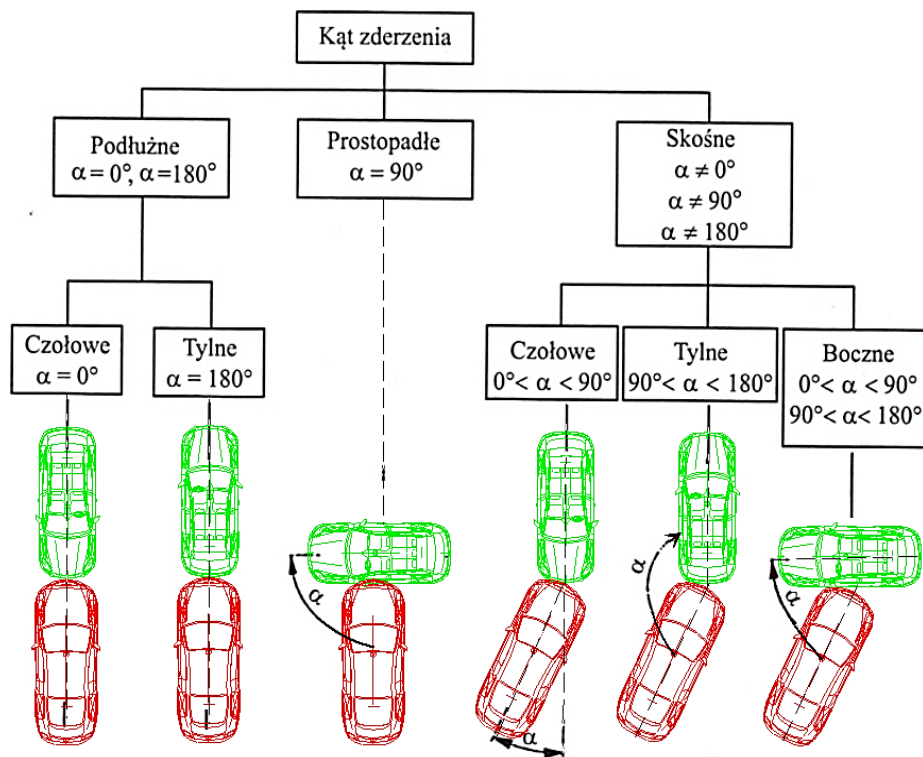


Rys. 2. Fazy przebiegu zdarzenia drogowego [12, 13]

Zderzenia pojazdów w podziale związanym z miejscem uszkodzenia pojazdu i kierunku uderzenia przedstawiono na rysunku 3, a w zależności od kąta zderzenia na rysunku 4 [21]. W pracy analizowano zderzenie pojazdów definiowane jako boczne, przy kącie osi wzdłużnych symetrii samochodu uderzanego i uderzającego α zawartym w przedziale $90^\circ < \alpha < 180^\circ$.



Rys. 3. Podział zderzeń ze względu na miejsce uszkodzenia nadwozia (opracowanie własne)



Rys. 4. Podział zderzeń ze względu na kierunek uderzenia w nadwozie (opracowanie własne)

2. DOKUMENTACJA TECHNICZNA W WERYFIKACJI ZDERZEŃ POJAZDÓW

Zakład ubezpieczeń odpowiada wyłącznie za uszkodzenia elementów pojazdów, które są następstwem zgłoszonej szkody komunikacyjnej. Koszty odszkodowań rosną i w ślad za tym ochrona ubezpieczeniowa klientów również. Związane jest to m.in. z kosztami napraw powypadkowych, a ubezpieczyciele zmagają się z problemem wyłudzeń odszkodowania na te naprawy i poszukują metod zwalczania tak zwanych fraudów ubezpieczeniowych, czyli oszustw mających na celu wyłudzenie odszkodowania. Wspierają się przy tym osiągnięciami technologii informatycznych [7] w celu ich eliminowania przy jednoczesnej sprawnej likwidacji szkód, które nie są fraudami, i wypłatami odszkodowań mających na celu przywrócenie pojazdu do stanu sprzed szkody. Metody wyłudzeń są różnorodne i ciągle zmieniają się, „wymykając się” ze stałej klasyfikacji. Dlatego też niezależnie od problematyki bezpieczeństwa napraw nierozzerwalnie związanych z likwidacją szkód należy poszukiwać sposobów na sprawne wykrywanie fraudów ubezpieczeniowych i ograniczanie wypłat nienależnych odszkodowań. Podejście to jest realizowane z wykorzystaniem metody SDC (*Static, Dynamic, Characteristic/Contact*) [3]. Polega ona na przeprowadzeniu analizy na trzech poziomach – na porównaniu zgodności geometrycznej uszkodzeń, czyli analizie statycznej, na analizie dynamicznej zderzenia i relacji czasoprzestrzennych za pomocą programów symulacyjnych stosowanych w rekonstrukcji wypadków drogowych i na analizie uszkodzeń charakterystycznych w miejscu kontaktu pojazdów lub pojazdu z przeszkodą terenową. Wymaga ona więc opracowania dokumentacji technicznej podczas likwidacji szkody, która posłuży do weryfikacji zderzenia za pomocą tej metody.

2.1. Oględziny miejsca zdarzenia drogowego

Zasadniczym celem oględzin miejsca powstania zdarzenia szkodowego są pomiary parametrów geometrycznych drogi, usytuowania elementów infrastruktury oraz śladów kolizji zarówno na podłożu, jak i przeszkodach terenowych – drzewach, słupach, barierach drogowych itp. Rekomendowane przez autorów procedury i sposoby wytwarzania dokumentacji podano poniżej.

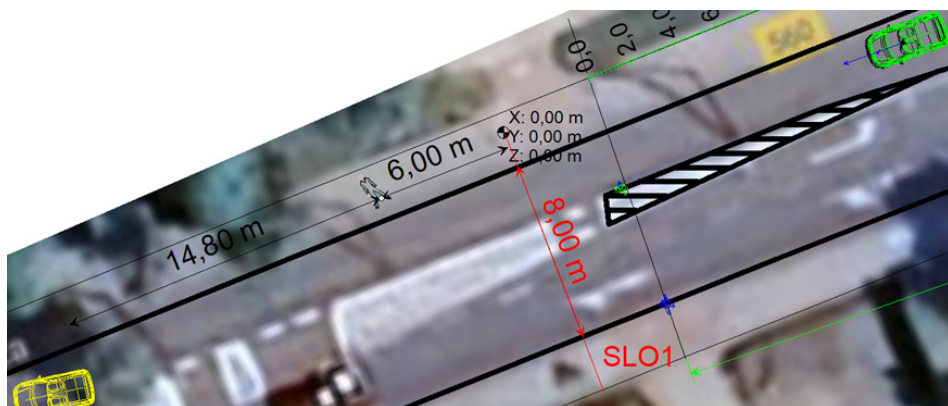
Aktualnie do wytworzenia dokumentacji o pełnej wartości technicznej na podstawie przeprowadzonych pomiarów terenowych powszechnie stosowane są narzędzia informatyczne umożliwiające wykonanie szkicu sytuacyjnego w skali, zawierającego również oznakowanie pionowe, poziome oraz elementy infrastruktury drogi.

Coraz częściej spotyka się też zastosowanie techniki dronowej w celu wykonania zdjęcia z dużej wysokości po wyskalowaniu, z którego uzyskuje się gotową mapę terenu do dalszych analiz. Aby przeskalować wykonane zdjęcie, na podłożu trzeba położyć bazę referencyjną. Technika ta jest z powodzeniem

stosowana w przypadku zdarzeń, których skutkiem jest na przykład skażenie środowiska, przez co występują obiektywne ograniczenia do wykonywania zdjęć przez człowieka.

Można też stosować fotogrametrię 2D na przykład za pomocą programu Photorect [16] oferującym przekształcenie zdjęcia wykonanego w perspektywie na zdjęcie wykonane jakby z dużej wysokości. Alternatywnym – względem wspomnianego – podejściem jest skorzystanie z osiągnięć współczesnej geodezji i programów umożliwiających tworzenie map z chmury punktów pomierzonych w terenie, na przykład za pomocą systemu eSURV [17], który rejestruje geometrię otoczenia w przestrzeni 3D. Chmura punktów może być importowana do programu symulacyjnego w celu zautomatyzowania wykonania na przykład szkicu sytuacyjnego.

W praktyce spotyka się też wykorzystanie mapy internetowej po jej wyskalowaniu, na której nanoszone są ślady oraz pojazdy i służy ona również do wizualizacji przebiegu kolizji. Na rysunku 5 zaprezentowano wykorzystanie takiej mapy [8] po wyskalowaniu i naniesieniu wymiarów w celu wizualizacji przebiegu analizy zderzenia samochodu, w tym przypadku – z pieszym.



Rys. 5. Przykład wyskalowanej mapy satelitarnej do analizy zderzenia (opracowanie własne)

2.2. Oględziny pojazdów

Główne cele oględzin pojazdu to ustalenie zakresu uszkodzeń i zdefiniowanie w planie naprawy sposobu ich usunięcia w sposób przywracający pojazdowi bezpieczeństwo oraz walory estetyczne. Skoro jednak zakład ubezpieczeń odpowiada wyłącznie za uszkodzenia mające związek przyczynowo-skutkowy ze zgłoszoną szkodą, to podczas oględzin należy przeprowadzić rekomendowane przez autorów czynności i procedury dodatkowe.

Pierwsza z nich to udokumentowanie i szczegółowy opis śladów kontaktu na elementach pojazdu poszkodowanego i wskazanego sprawcy szkody oraz na przeszkodach terenowych, jeśli te miały kontakt z pojazdami. Przykładowe,

charakterystyczne ślady kontaktu w postaci otarcia i nawarstwienia lakieru barwy srebrnej na okładzinie zderzaka pojazdu sprawcy szkody przedstawiono na rysunku 6.



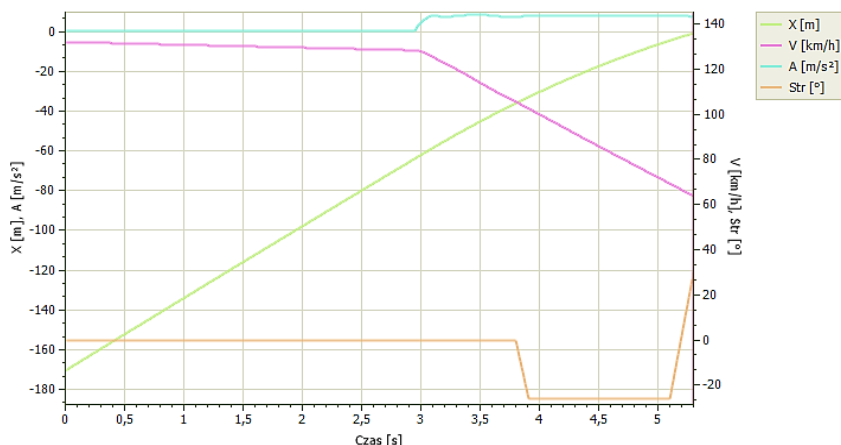
Rys. 6. Otarcie i nawarstwienie lakieru drugiego pojazdu w miejscu kontaktu nadwozi (opracowanie własne)

Drugą z procedur jest pomiar parametrów geometrycznych deformacji nadwozia pojazdu, czyli ich położenia na nadwoziu pojazdu oraz szerokości, wysokości oraz głębokości. Parametry te mogą być wykorzystywane do dalszych obliczeń związanych z ustaleniem prędkości początkowej kolizji za pomocą metod rastrów energetycznych, CRASH3 lub Campbella [10]. Aktualnie do pomiarów deformacji oraz wykonania superpozycji transparentnej do porównania uszkodzeń nadwozi samochodów [1] można wykorzystać skanowanie bliskiego zasięgu 3D, na przykład za pomocą programu PhotoModeler [15]. Na rysunku 7 zamieszczono przykład tego rodzaju skanowania samochodów do dalszych analiz [6].



Rys. 7. Skanowanie 3D nadwozia samochodu osobowego podczas próby zderzeniowej (opracowanie własne)

Trzecia z rekomendowanych procedur podczas oględzin pojazdu w sytuacji aktywowania w nim komponentów systemu SRS-AirBag (ang. *Supplementary Restraint System*). Za pomocą uniwersalnego urządzenia, na przykład Bosch Crash Data Retrieval [5], można odtworzyć parametry ruchu pojazdu na podstawie danych z pamięci nieulotnej jego sterowników EDR (ang. *Event Data Recorder*) na kilka sekund przed zderzeniem, np.: zmian prędkości jazdy hamowania, skrętu kołem kierownicy oraz przebytej w tym czasie drogi. Na rysunku 8 wskazano odtworzone w ten sposób przebiegi czasowe dynamiki pojazdu.



Rys. 8. Przebiegi czasowe dynamiki ruchu pojazdu odtworzone z danych EDR (opracowanie własne)

3. NARZĘDZIA INFORMATYCZNE W WERYFIKACJI ZDERZEŃ POJAZDÓW

Aktualnie weryfikacja zderzeń pojazdów za pomocą obliczeń analitycznych została prawie całkowicie wyparta przez programy komputerowe Multi-body System (MBS) i Multibody Dynamics (MBD), takie jak: V-SIM [20], Virtual Crash [19], PC-Crash [11]. Wymagają jednak one świadomości operatora dotyczącej modelowania zderzeń, gdyż nie są tak precyzyjne jak w modelowaniu z wykorzystaniem elementów skończonych MES (ang. FEM – *Finite Element Method*) [2, 9]. W pracy do analizy symulacyjnej zderzenia bocznego pojazdów wykorzystano program V-SIM wersja 6.016.1. W programie tym modelowanie ruchu obiektu symulacji realizowane jest w przestrzeni trójwymiarowej, a model typowego samochodu osobowego ma dziesięć stopni swobody. W modelu tym uwzględniono również sztywność zawieszenia oraz niezależne zawieszenie kół, a układ kierowniczy modelowany jest według reguły Ackermana. Operator programu może ponadto wprowadzać zadania: przyspieszenia, zmiany biegu, skrętu, hamowania, deformacji elementów zawieszenia, uszkodzenia opony oraz ma do dyspozycji model zderzenia siłowy, a także impulsowy, jak również detekcję kolizji 2D lub wolumetryczną 3D.

4. WYKORZYSTANIE DEFORMACJI NADWOZIA W OCENIE OKOLICZNOŚCI I ZAKRESU SZKODY

W pracy wykorzystano zależności prędkości równoważnej energii EES (ang. *Energy Equivalent Speed*) i ETD (ang. *Equivalent Test Deformation*) według Zeidlera-Schreiera [18]:

$$\frac{EES_1}{EES_2} = \sqrt{\frac{m_2 \cdot ETD_1}{m_1 \cdot ETD_2}} \quad (1)$$

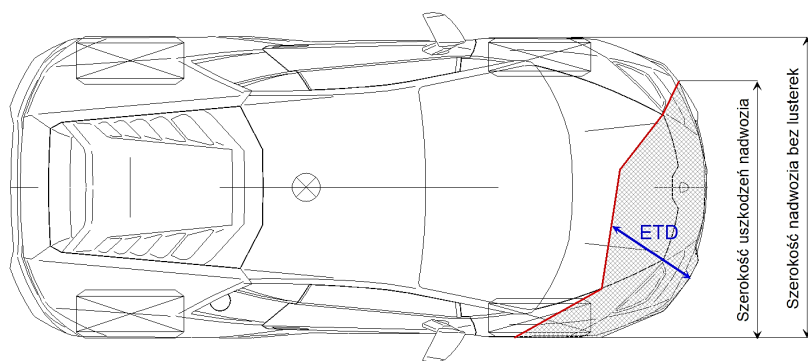
$$EES_2 = \sqrt{\frac{2 \cdot W_D}{m_2 \cdot \left(\frac{ETD_1}{ETD_2} + 1\right)}} \quad (2)$$

$$W_D = \frac{m_1 \cdot EES_1^2}{2} + \frac{m_2 \cdot EES_2^2}{2} \quad (3)$$

gdzie:

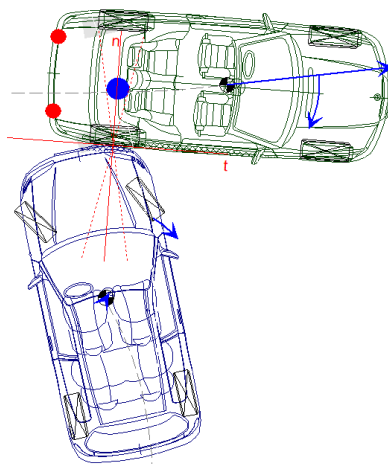
- EES_1 – prędkość równoważnej energii pojazdu 1,
- EES_2 – prędkość równoważnej energii pojazdu 2,
- m_1 – masa pojazdu 1,
- m_2 – masa pojazdu 2,
- W_D – sumaryczna praca deformacji nadwozi obu pojazdów,
- ETD_1 – głębokość deformacji pojazdu 1 mierzona od miejsca przyłożenia impulsu siły do obrysu nadwozia w kierunku działania impulsu siły,
- ETD_2 – głębokość deformacji pojazdu 2 mierzona od miejsca przyłożenia impulsu siły do obrysu nadwozia w kierunku działania impulsu siły.

Poglądowy schemat opisanej wyżej metody przedstawiono na rysunku 9.

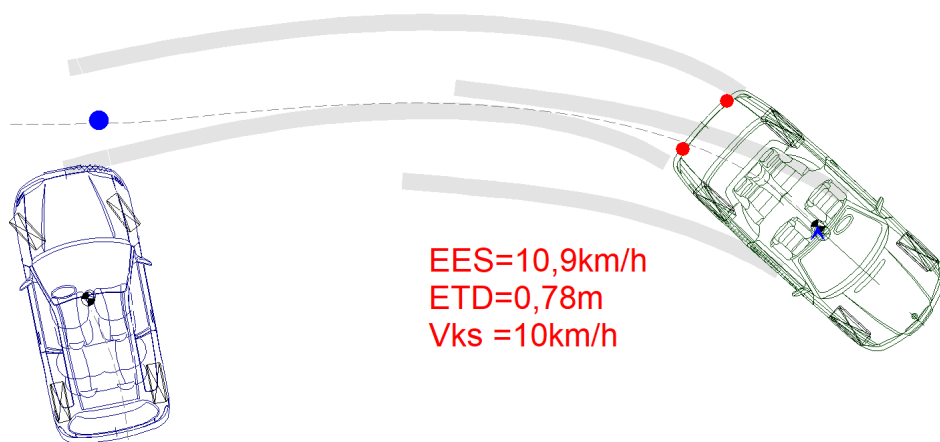


Rys. 9. ETD i mierzona głębokość deformacji pojazdu (opracowanie własne)

Na podstawie symulacji uderzenia w bok samochodu BMW ustalono parametry EES oraz ETD, a także odniesiono jego pozycję po kolizji do podanej w zgłoszeniu szkody komunikacyjnej. Środowisko ruchu podczas zderzenia pojazdów za danymi ze szkody zdefiniowano jako asfalt suchy, płasko. Na rysunku 10 wskazano początek zderzenia i jego koniec, czyli tuż przed rozdzieleniem nadwozi. Z kolei na rysunku 11 przedstawiono pozycje pojazdów po zderzeniu. Obliczenia wykazały, że samochód BMW zatrzymał się dopiero około 9 m od miejsca kolizji z pojazdem Honda.



Rys. 10. Kontakt nadwozi pojazdów, początek zderzenia oraz koniec kontaktu i zderzenia tuż przed rozdzieleniem nadwozi obu samochodów (opracowanie własne)



Rys. 11. Koniec symulacji – pojazdy po zatrzymaniu w pozycjach pokolizyjnych (opracowanie własne)

Poniżej przedstawiono opracowany wyciąg z obliczeń symulacyjnych:

ŚRODOWISKO RUCHU

Rodzaj i parametry nawierzchni: Suchy asfalt, μ : 0,80/0,75, opory: 0,015,
Poziom i nachylenie terenu: poziom: 0,00 m, płasko,
Prędkość i kierunek wiatru: bezwietrznie,

OBIEKTY BIORĄCE UDZIAŁ W SYMULACJI

POJAZD "3-SERIE"

Bazowy model katalogowy: BMW 3-Serie IV Coupe 320Ci,
Identyfikator w bazie danych: 7B755F56-F371367B,

Wymiary nadwozia: dł. 4488 mm, szer. 1757 mm, wys. 1369 mm,
 Rozstaw osi: 2725 mm,
 Rozstaw kół: przód: 1471 mm, tył: 1483 mm,
 Kierowana oś: Przednia oś,
 Układ Ackermana: tak,
 Skuteczność hamulca zasadniczego: 17,8 kN,
 Układ stabilizacji: ABS,
 Sprawność hamulców: 100%,
 Model koła ogumionego oparty na: TM-easy,
 Ogumienie: 205/55 R16 91,

NADWOZIE

Model detekcji kolizji: Obrys 2D,
 Sztywność nadwozia: kompresja $681 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, restytucja $681 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,
 Masa całkowita: 1465 kg,

ZADANE WARUNKI POCZĄTKOWE

Położenie środka masy: $x^* - 1337 \text{ mm}$, $y^* + 20 \text{ mm}$, $z^* + 554 \text{ mm}$,
 Momenty bezwładności: $I_x' 503 \text{ kgm}^2$, $I_y' 2264 \text{ kgm}^2$, $I_z' 2364 \text{ kgm}^2$,
 Położenie środka masy: $x + 19,248 \text{ m}$, $y + 12,640 \text{ m}$, $z -$,
 Położenie katowe: $\varphi -$, $\theta -$, $\psi + 0,0^\circ$,
 Prędkość liniowa: $V_x' + 13,89 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $V_y' + 0,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $V_z' + 0,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,
 Prędkość katowa: $\omega_x' + 0,00 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_y' + 0,00 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega_z' -$,

ZADANIA W TRAKCIE RUCHU

Start: ZadanieSzczegółowy opis,
 1.400 sHamowaniebezwzględnie 100%,

POJAZD "CIVIC"

Bazowy model katalogowy: Honda Civic V 1.5 Vei,
 Identyfikator w bazie danych: 000046A6-88042F8B,
 Wymiary nadwozia: dł. 4080 mm, szer. 1695 mm, wys. 1345 mm,
 Rozstaw osi: 2570 mm,
 Rozstaw kół: przód: 1450 mm, tył: 1450 mm,
 Kierowana oś: Przednia oś,
 Układ Ackermana: tak,
 Skuteczność h. zasadniczego: 11,9 kN,
 Sprawność hamulców: 100%,
 Model koła ogumionego oparty na: TM-easy,

NADWOZIE

Model detekcji kolizji: Obrys 2D,
 Sztywność nadwozia: kompresja $478 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$, restytucja $478 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-3}$,
 Masa całkowita: 1051 kg,
 Położenie środka masy: $x^* - 1152 \text{ mm}$, $y^* + 29 \text{ mm}$, $z^* + 551 \text{ mm}$,
 Momenty bezwładności: $I_x' 347 \text{ kgm}^2$, $I_y' 1421 \text{ kgm}^2$, $I_z' 1489 \text{ kgm}^2$,

ZADANE WARUNKI POCZĄTKOWE

Położenie środka masy: $x + 42,670 \text{ m}$, $y + 5,610 \text{ m}$, $z -$,

Położenie katowe: $\varphi -$, $\theta -$, $\psi + 78,2^\circ$,

Prędkość liniowa: $Vx' + 2,78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $Vy' + 0,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $Vz' + 0,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,

Prędkość katowa: $\omega x' + 0,00 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega y' + 0,00 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega z' -$,

ZADANIA W TRAKCIE RUCHU

Start ZadanieSzczegółowy opis,

0,00 mTrasa1 punktów 18,7 m,

0,400 sSkret kierownicądo pozycji 579,0° w lewo z prędkością 340° na s,

PRZEBIEG SYMULACJI

KONTAKT NR 1 POMIĘDZY OBIEKTAMI: POJAZDU "3-SERIE"

Z POJAZDEM "CIVIC"

Pojazd "3-Serie" Pojazd "Civic",

Położenie pojazdów: $x + 41,61 \text{ m}$, $y + 12,65 \text{ m}$, $z + 0,54 \text{ m}$, $x + 42,32$, $y + 9,76 \text{ m}$, $z + 0,54 \text{ m}$,

Orientacja pojazdów: $\varphi - 0,4^\circ$, $\theta + 0,9^\circ$, $\psi + 0,0^\circ$, $\varphi + 0,8^\circ$, $\theta + 0,3^\circ$, $\psi + 102,4$,

Wejściowe prędkości liniowe: $Vx' + 13,04 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $Vy' + 0,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $Vz' + 0,17 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $Vx' + 2,32 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $Vy' + 0,63 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $Vz' + 0,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,

Wejściowe prędkości katowe: $\omega x' + 0,00 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega y' + 0,15 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega z' - 0,00 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega x' + 0,01 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega y' + 0,01 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega z' + 0,46 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$,

ZDERZENIE SIŁOWE POJAZDU "3-SERIE" Z POJAZDEM "CIVIC"

Maksymalna objętość pokrycia sylwetek: $0,08 \text{ m}^3$,

Współczynnik restytucji: 1,00,

Głębokość deformacji (ETD): 78 mm 107 mm,

Prędkość równ. energii (EES): $3,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($10,9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$) $4,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ($14,9 \text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$),

ZAKOŃCZENIE, AKTUALNY STAN SYMULACJI ($T = 3,876 \text{ s}$)

Pojazd "3-Serie",

Przebyta droga: 34,25 m,

Pozycja: $X 52,99 \text{ m}$, $Y 11,13 \text{ m}$, $Z 0,55 \text{ m}$,

Orientacja: $\varphi - 0,8^\circ$, $\theta - 0,6^\circ$, $\psi - 42,4^\circ$,

Prędkość liniowa: $Vx' - 0,01 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $Vy' 0,02 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $Vz' 0,03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,

Pojazd "Civic"

Przebyta droga: 4,58 m,

Pozycja: $X 42,21 \text{ m}$, $Y 10,06 \text{ m}$, $Z 0,54 \text{ m}$,

Orientacja: $\varphi - 0,5^\circ$, $\theta 0,1^\circ$, $\psi 101,1^\circ$,

Prędkość liniowa: $Vx' 0,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $Vy' - 0,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, $Vz' 0,00 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,

Prędkość katowa: $\omega x' 0,00 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega y' - 0,00 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$, $\omega z' 0,00 \text{ rad}\cdot\text{s}^{-1}$.

5. ANALIZA SKŁADNIKÓW KOSZTÓW NAPRAWY

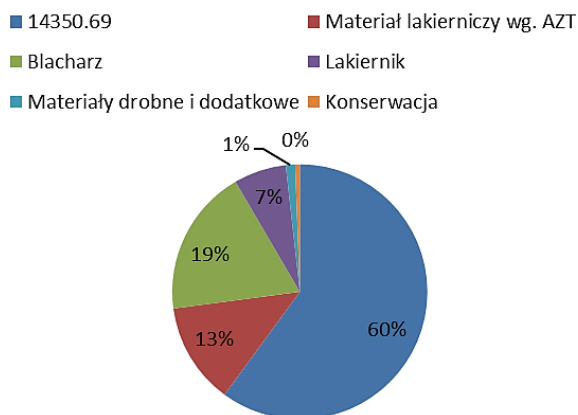
Obliczenia kalkulacyjne przeprowadzono na podstawie studium przypadku samochodu BMW, którego zakres szkody oszacowano na podstawie przebiegu zderzenia, od pierwszego kontaktu do chwili rozdzielenia obu nadwozi, obserwując przebieg symulowanych pojazdów i nakładania sylwetek ich nadwozi w sekwencjach co 1 μ s. Uwzględniono także wynik ETD samochodu BMW wynoszący 0,78 m uzyskany z analizy numerycznej zderzania.

Na rysunku 11 przedstawiono wyciąg z „Protokołu szkody w pojeździe”. Dokument ten oraz obliczenia kalkulacyjne kosztu naprawy przeprowadzono za pomocą programu AudaNet [4], który umożliwia operatorowi systemu obliczenie kosztów naprawy pojazdu zgodnie z technologią producenta pojazdu, w tym przypadku Bayerische Motoren Werke.

Poz nr	Nazwa części	Typ operacji	[JC]	Rodzaj lak	NZS
1482	DRZWI PRZ P	E		LE	
1714	IZOLACJA DRZWI PRZ P	E			
1716	ZEST MOC WYKŁ DRZ PP	E			
2172	LISTWA PROGOWA P	E		LE1	
3482	ŚCIANA TYL P	E		LE	
3508	ZEST NAPR ŚCIA BOC P	E			
0243	DOZER/STAN DO PROS		10.0		
1478	FORMOWANIE STRONY P		20.0		
9973	JAZDA PRÓBNA		2.0		
0742	BLOTNIK PRZ P		10.0	LI	
2292	SŁUPEK-B P		20.0		
9552	FELGA T P		5.0		
1482	DRZWI PRZ P				
3482	ŚCIANA TYL P				

Rys. 11. Oszacowany zakres szkody w pojeździe BMW (opracowanie własne)

Z kolei na rysunku 12 przedstawiono udział składników kosztu naprawy netto ogółem. W koszcie tym dominują koszty części zamiennych stanowiące ponad 50% kosztów naprawy samochodu ogółem, a na rysunku 13 – strefy naprawy.



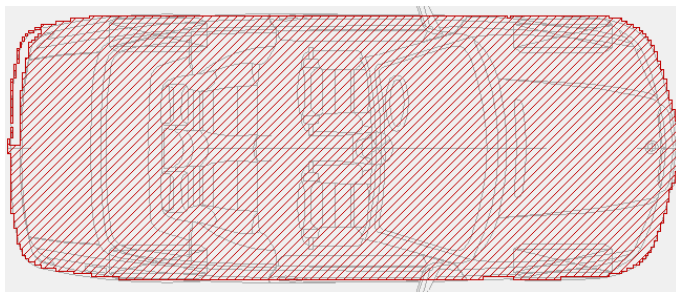
Rys. 12. Składniki kosztów naprawy ogółem (opracowanie własne)



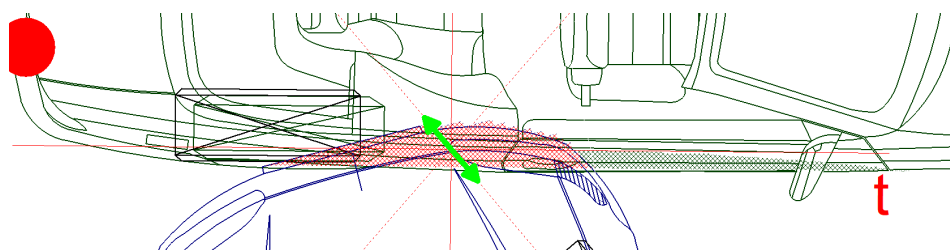
Rys. 13. Strefy naprawy samochodu BMW (opracowanie własne)

6. WNIOSKI

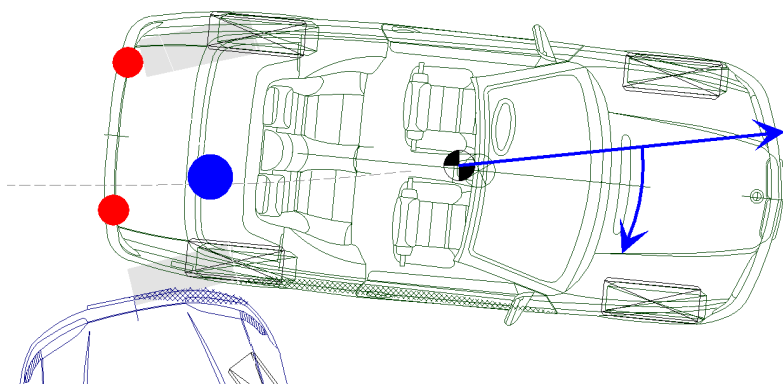
Przeprowadzona analiza potwierdziła przydatność weryfikacji szkody w układzie dynamicznym zderzenia pozwalającym również na ustalenie pozycji zatrzymania samochodów po kolizji w odniesieniu do podawanych pozycji samochodów przez kierujących w toku likwidacji szkody. W odniesieniu do parametrów podanych w szkodzie oraz uszkodzeń prawego boku BMW od błotnika przedniego, przez drzwi prawe po błotnik tylny nie jest możliwe, aby miejsce zatrzymania samochodu BMW, jak i samochodu Honda po zdarzeniu mogło rzeczywiście być takie, jak podano. Podawanie takiej okoliczności przez kierujących wskazywałoby zatem na symptom fraudu ubezpieczeniowego i silną przesłankę do wnioskowania, że szkoda nie zaistniała w podanych okolicznościach. Z kolei szacowanie zakresu szkody na podstawie rezultatów symulacji za pomocą programu V-SIM jest utrudnione. W obliczeniach przyjęto uszkodzenia BMW, które według autorów są bezsporne, i uzyskano koszt naprawy netto 24130,14 zł. Jednak problem precyzyjnego ustalenia zakresu uszkodzeń związany jest z tym, że w programie samochód modelowany jest jako pojedyncza bryła sztywna o uśrednionej w całej swej przestrzeni sztywności w fazie kompresji i restytucji. Na rysunku 14 wskazano podgląd strefy sztywności nadwozia BMW z użytego do obliczeń programu. W rzeczywistości sztywność boku nadwozia pojazdu jest mniejsza niż na przykład przedniej części i nie musi każdorazowo odpowiadać sztywności średniej, która domyślenie podawana jest przez program – operator może ją zmienić. Strefy nakładania nadwozi nie pokazują ponadto dokładnie deformacji pojazdu. Granica między tymi strefami jest właśnie wewnątrz strefy nakładania zakreślonej na rysunku 15 kolorem czerwonym i zależy od sztywności pojazdów. Tylko w przypadku zderzenia pojazdów o zbliżonych do siebie sztywnościach będzie ona w okolicy połowy tej strefy. Ten sam problem dotyczy wizualizacji deformacji pojazdów, które należałoby przyjmować jako szacunkowe (2D) i pogładowe (3D), co przedstawiono na rysunkach 16 i 17.



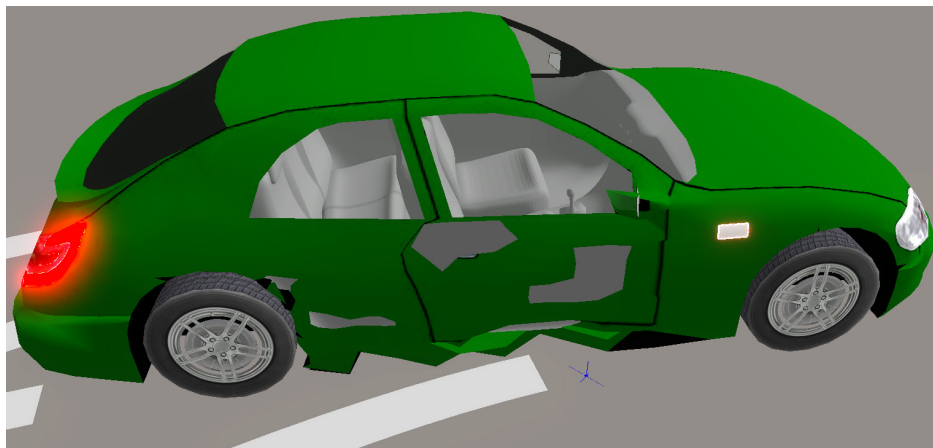
Rys. 14. Strefa sztywności samochodu BMW w programie V-SIM (opracowanie własne)



Rys. 15. Strefy nakładania sylwetek wektorowych samochodów BMW i Honda podczas zderzenia w programie V-SIM (opracowanie własne)



Rys. 16. Wizualizacja 2D uszkodzeń po zderzeniu – zakratkowana część nadwozi (opracowanie własne)



Rys. 17. Wizualizacja 3D uszkodzeń BMW po zderzeniu (opracowanie własne)

O ile zastosowanie analizy dynamicznej wykonywanej za pomocą programów komputerowych MBS/MBD jest efektywne w wykrywaniu fraudów ubezpieczeniowych, o tyle już bezpośrednie zastosowanie danych dotyczących deformowania nadwozia z tych programów do precyzyjnego ustalenia zakresu szkody jest utrudnione.

Operator programu powinien zachować ostrożność i przede wszystkim zmieniać sztywności nadwozia na podstawie zidentyfikowanych parametrów, wykorzystując np. nagrania z krasztestów [22, 23], lub też powinien jednak korzystać z sygnalizowanych wcześniej metod analitycznych. Wykorzystywanie danych z symulacji do ustalenia zakresu szkody jest więc zagadnieniem złożonym, wymagającym dalszego doskonalenia i rozwoju. Rozwój ten powinien być skierowany na tworzenie modeli zaimplementowanych w tych programach charakteryzujących się różnymi sztywnościami stref w obrębie nadwozia, a najlepiej uwzględniających też strefy wzmocnień bezpieczeństwa biernego konstrukcyjnego i elementów akcesoryjnych, w tym na przykład oszklenia.

LITERATURA

- [1] Aleksandrowicz P., 2016. Inżynieria powypadkowa w weryfikacji roszczeń odszkodowawczych. Wydawnictwa Uczelniane UTP, Bydgoszcz.
- [2] Aleksandrowicz P., 2020. Modeling head-on collisions: The problem of identifying collision parameters. *Applied Sciences* 10(18), 6212.
- [3] Aleksandrowicz P., 2020. Verification of motor vehicle post accident insurance claims. *Transport Problems* 15(1), 25–38. DOI: 10.21307/tp-2020-003
- [4] AudaNet. Program do kalkulacji kosztów napraw powypadkowych. (dostęp: 12.05.2024).

- [5] Bosch Crash Data Retrieval. <https://cdr.boschdiagnostics.com/cdr/> (dostęp: 12.05.2024).
- [6] CYBID, 2018. Pomiar i dokumentacja próby zderzeniowej PIMOT. IV Sympozjum Polskiego Stowarzyszenia Biegłych Sądowych do Spraw Wypadków Drogowych, Zegrze.
- [7] Ghorbani A., Farzai S., 2018. Fraud detection in automobile insurance using a data mining based approach. *International Journal of Mechatronics, Electrical and Computer Technology* 8(27), 3764–3771.
- [8] Googlemaps. <https://www.google.com/maps/> (dostęp: 10.05.2024).
- [9] Kisilowski J., Zalewski J., 2016. Modelowanie zdarzeń w ruchu drogowym. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB, Radom – Warszawa.
- [10] Owczarz M., Witkiewicz M., Taryma S., Jerszow Ł., 2014. Badanie zależności pomiędzy deformacją powypadkową, a prędkością kolizyjną samochodów osobowych w chwili początkowej zderzenia. *Autobusy. Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe* 6, 214–217.
- [11] PC-Crash. <https://www.pc-crash.com/> (dostęp: 12.05.2024).
- [12] Praca zbiorowa, 2006. Problematyka prawna i techniczna wypadków drogowych. Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych, Kraków.
- [13] Praca zbiorowa, 2014. Wypadki Drogowe, Vademecum biegłego Sądowego. Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych, Kraków.
- [14] Prochowski L., Unarski J., Wach W., Wicher J., 2008. Pojazdy Samochodowe. Podstawy rekonstrukcji wypadków drogowych. WKŁ, Warszawa.
- [15] Program PhotoModeler. <https://www.photomodeler.com/> (dostęp: 10.05.2024).
- [16] Program Photorect 2.0. <https://cybid.com.pl/photorect-2-0/> (dostęp: 10.05.2024).
- [17] System eSURV. <https://cybid.com.pl/esurv/> (dostęp: 10.05.2024).
- [18] Unarski J., Zębala J., 2012. Zbiór podstawowych wzorów i równań stosowanych w analizie wypadków drogowych. Wydawnictwo Instytutu Ekspertyz Sądowych, Kraków.
- [19] Virtual Crash. <https://www.vcrashusa.com/> (dostęp: 12.05.2024).
- [20] V-SIM. <https://cybid.com.pl/v-sim/> (dostęp: 12.05.2024).
- [21] Wicher J., 2006. Opiniowanie wypadków drogowych, Klasyfikacja zderzeń samochodów. SRTSiRD Warszawa.
- [22] York A.R., Day T.D., 1999. The DyMesh method for three-dimensional multi-vehicle collision simulation, SAE Technical Paper Series. DOI: 10.4271/1999-01-0104
- [23] Zalewski J., Aleksandrowicz I., Aleksandrowicz P., 2024. Selected problems in a vehicle-to-truck collision modeling. *Transport Problems* 19(1), 199–208. DOI: 10.20858/tp.2024.19.1.16

ANALIZA WYBRANYCH TECHNOLOGII NAPRAW BLACHARSKICH POJAZDÓW

Michał Liss^{1*}, Kacper Krause¹, Jose Miguel Martinez Valle²

¹ Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska

² University of Cordoba, Department of Mechanics, Avenida Medina Azahara, 5.14071,
Córdoba, Spain

Streszczenie. Obostrzenia nałożone na przemysł motoryzacyjny oraz przyjęty kierunek ekorozwoju spowodowały, że jakakolwiek dyskusja naukowa koncentruje się na innowacyjnych rozwiązaniach jednostek napędowych, pojazdach elektrycznych i autonomicznych bądź paliwach alternatywnych. Zapomina się jednocześnie o technologiach i narzędziach, które pozwalają wszystkim te produkty utrzymywać w ruchu. Wyszukane technologie i materiały, z których wykonywane są coraz to nowocześniejsze pojazdy, powodują, że należy powrócić do wiedzy, która – mogłoby się wydawać – została już porzucona, a dotyczy technologii napraw. W pracy zawarto analizę wybranych technologii napraw blacharskich w kontekście wybranych uszkodzeń karoserii pojazdu. Ma to obrazować, od jak wielu czynników zależy ten proces.

Słowa kluczowe: narzędzia blacharskie, uszkodzenia karoserii, metody naprawy blacharskiej, ocena efektywności naprawy

1. WPROWADZENIE

Wzrost liczby pojazdów na drogach skutkuje zwiększonym prawdopodobieństwem występowania kolizji i wypadków drogowych, co bezpośrednio przekłada się na rosnące zapotrzebowanie na usługi napraw blacharskich samochodów. Faktem jest to, że naprawy blacharskie odgrywają kluczową rolę w utrzymaniu i przywracaniu pojazdów do ich pierwotnego stanu.

W wyniku rozwoju przemysłu motoryzacyjnego pojazdy charakteryzują się nie tylko coraz bardziej skomplikowaną konstrukcją karoserii pojazdu, lecz także zastosowaniem w niej innowacyjnych materiałów i technologii jej wykonania. Rezultatem tego zjawiska jest zapotrzebowanie na coraz bardziej zaawansowane narzędzia oraz metody napraw blacharskich, które w jak największym stopniu niwelować będą ryzyko popełniania błędów oraz sprawią, że proces naprawy będzie przebiegał bez zakłóceń. Z tego względu znajomość procesów, wykorzystywanych narzędzi i metod w branży napraw blacharskich samochodów, jak również ocena efektywności procesów naprawczych to istotne kwestie dla zagwarantowania jakości i bezpieczeństwa pojazdów poddawanych naprawie. Znajomość narzędzi oraz metod jest ponadto istotna w aspekcie implementowania modyfikacji w stosowanych rozwiązaniach oraz opracowywania nowych rozwiązań.

* adres korespondencyjny: michal.liss@pbs.edu.pl

2. STUDIUM USZKODZEŃ KAROSERII

Spektrum uszkodzeń karoserii pojazdu jest bardzo szerokie i jakakolwiek próba ich klasyfikacji może stanowić bardzo duże wyzwanie. Na potrzeby publikacji przedstawiono najbardziej powszechnie występujące uszkodzenia, które nie wyczerpują całkowicie badanego obszaru. Wyróżnia się uszkodzenia powierzchniowe, wynikające z ekspozycji na warunki atmosferyczne, zmęczeniowe lub ingerujące w strukturę elementów nośnych karoserii, będące skutkiem rozległej kolizji bądź też korozji.

2.1. Uszkodzenia powierzchni karoserii

Spośród typowych uszkodzeń powierzchni karoserii samochodowych wyróżnić można: wgniecenia, zarysowania oraz przebicia będące efektem normalnej eksploatacji pojazdu lub zdarzeń drogowych. Zarysowania mogą być powierzchniowe lub głębokie, w zależności od siły działania czynnika zewnętrznego.

Wgniecenia z kolei mogą wahać się od niewielkich deformacji, które nie naruszają warstwy lakieru, po głębokie wgłębienia wpływające na kształt poszycia karoserii. Przebicia poszycia, zwykle będące rezultatem silnych uderzeń punktowych, mogą wymagać wymiany uszkodzonych paneli. Małe wgniecenie, często spotykane w wyniku codziennej eksploatacji, zostało zilustrowane na rysunku 1 [8, 10, 12].



Rys. 1. Drobne wgniecenie [1]

2.2. Uszkodzenia karoserii wynikające z oddziaływania na warunki atmosferyczne

W odniesieniu do kategorii średniego „wieku” pojazdów w Polsce stwierdzono, że najpowszechniejszym rodzajem uszkodzenia jest korozja, pojawiająca się w wyniku długotrwałej ekspozycji na wilgoć, sól drogową bądź zanieczyszczenia. Nie wyklucza to jednak przypadków uszkodzeń wynikających z gradobicia, jednak charakter tego uszkodzenia jest widoczny zazwyczaj w postaci wgniecenia, ewentualnie lokalnego pęknięcia karoserii. Te rodzaje uszkodzeń wpływają na trwałość i estetykę pojazdu [8–10]. Przykład znacznej korozji przedstawiono na rysunku 2, ilustrującym jej charakterystyczny wpływ na strukturę karoserii samochodowej.



Rys. 2. Znaczna korozja progu (opracowanie własne)

2.3. Uszkodzenia zmęczeniowe karoserii

Uszkodzenia zmęczeniowe w karoserii pojazdów mogą wystąpić, gdy pojazd jest eksploatowany w sposób prowadzący do powtarzających się obciążeń cyklicznych, co skutkuje koncentracją naprężeń i powstawaniem mikropęknięć. Z czasem te mikropęknięcia mogą się powiększać, prowadząc ostatecznie do uszkodzenia, nawet przy obciążeniach znacznie niższych niż nominalna wytrzymałość materiału, z którego wykonana jest karoseria. Przykład uszkodzenia zmęczeniowego zilustrowano na rysunku 3 [10, 11].



Rys. 3. Uszkodzenie zmęczeniowe karoserii [5]

2.4. Uszkodzenia elementów nośnych karoserii

Uszkodzenia elementów nośnych karoserii, do których dochodzi z reguły w wyniku kolizji drogowych, mogą być kategorizowane na podstawie kierunku i sposobu przyłożenia siły podczas zderzenia. Są to głównie uszkodzenia czołowe lub boczne [8, 10, 12].

Uszkodzenia czołowe mogą być wynikiem zderzenia czołowego dwóch pojazdów (rys. 4), czołowego uderzenia w przeszkodę, uderzenia w bok lub tył innego pojazdu. W przypadku zderzeń czołowych energia kinetyczna absorbowana jest przez zderzaki, pas przedni, podłużnice, maskę oraz klapę bagażnika pojazdu, co powoduje ich odkształcenie.

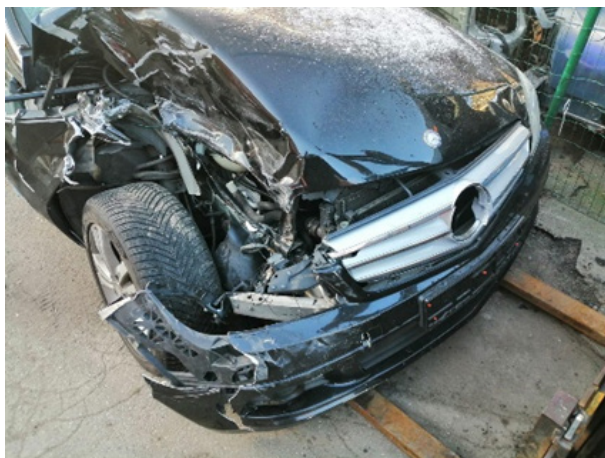


Rys. 4. Uszkodzenie czołowe w wyniku zderzenia dwóch pojazdów [6]

Zasada konstrukcyjna, polegająca na zastosowaniu w karoserii samochodowej elementów o stopniowanej wytrzymałości do absorbowania energii kinetycznej zderzenia, prowadzi do zwiększonego zakresu odkształceń wynikających z kolizji [8, 10, 12].

Uszkodzenia boczne powstają podczas kolizji z innym pojazdem lub uderzenia bokiem w przeszkody stałe. Uszkodzenia boczne dzielą się na dwie grupy [8, 10, 12]:

- 1) **uszkodzenia boczne narożne** (rys. 5), charakteryzujące się mniejszym stopniem wpływu na integralność przedziału pasażerskiego, nie stanowią bezpośredniego zagrożenia dla bezpieczeństwa [10];



Rys. 5. Uszkodzenie boczne narożne (opracowanie własne)

- 2) **uszkodzenia boczne centralne** (rys. 6), które skupiają się na środkowej części bocznej karoserii, mogą powodować znaczne odkształcenie przedziału pasażerskiego, co zwiększa ryzyko obrażeń osób znajdujących się wewnątrz pojazdu [10].



Rys. 6. Uszkodzenie boczne centralne [3]

3. METODY NAPRAWY BLACHARSKIEJ SAMOCHODÓW

Przedstawione rodzaje uszkodzeń wymagają koniecznej indywidualizacji pod względem zastosowanej technologii naprawy. Wynika to przynajmniej z trzech podstawowych kryteriów:

- 1) **rodzaju naprawianego elementu nadwozia** (element poszycia karoserii, element będący częścią strefy zgniotu, drzwi wykonane z połączenia dwóch różnych materiałów itp.),
- 2) **rodzaju uszkodzenia** (np.: wgniecenie materiału, przerwanie materiału, korozja),
- 3) **rozmiaru uszkodzenia** (głębokość, szerokość, długość).

W ramach tego podrozdziału przedstawione i opisane zostały wybrane metody naprawy blacharskiej samochodów, obejmujące:

- a) naprawę panelową,
- b) naprawę PDR (usuwanie wgnieceń bez lakierowania),
- c) lutowanie MIG,
- d) zgrzewanie oporowe,
- e) naprawę karoserii z wykorzystaniem ramy naprawczej.

3.1. Naprawa panelowa

Naprawa panelowa to proces mający na celu przywrócenie oryginalnego stanu elementów karoserii samochodowej, które uległy uszkodzeniu, przy minimalnym zakresie demontażu elementów [10].

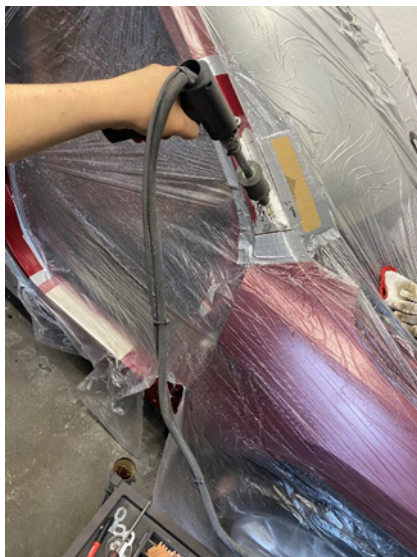
Stosowanie napraw panelowych ma miejsce w przypadku napraw głównych, średnich oraz małych. W kontekście napraw głównych metoda ta nie zawsze może być wykorzystana w pełnym zakresie ze względu na znaczny stopień uszkodzeń niektórych elementów, które wymagają wymiany. Jednak mniej uszkodzone elementy poszycia mogą być efektywnie naprawione z wykorzystaniem tej metody. W przypadku napraw średnich metoda naprawy panelowej jest często stosowana jako główna forma naprawy, natomiast w przypadku napraw o niewielkim zakresie okazuje się najbardziej efektywnym rozwiązaniem, co przekłada się na skrócenie czasu oraz zmniejszenie kosztów naprawy [10].

Rosnące zastosowanie napraw panelowych w procesie likwidacji szkód karoserii pojazdów wynika z ich zdolności do zwiększenia udziału technologii naprawczych w procesie likwidacji uszkodzeń w porównaniu z wymianą uszkodzonych elementów [10].

W zakres technologii napraw panelowych wchodzi: zszywanie oraz spawanie beztlenowe, stosowane przy naprawach elementów z tworzyw sztucznych, takich jak lusterka czy zderzaki. Wyciągania wgnieceń z wykorzystaniem tej metody realizowane są za pomocą narzędzi, takich jak: młotki blacharskie, młotki udarowe oraz spotery wraz z różnymi rodzajami wyciągarek akcesoryjnych. Istnieją także technologie napraw panelowych zaprojektowane do róż-

nych materiałów konstrukcyjnych, np. aluminium, gdy stosuje się inny rodzaj spotera ze względu na inne parametry przygrzewania końcówki [10].

Przykład wykonywania naprawy panelowej z użyciem spotera przedstawiono na rysunku 7, na którym ukazano zastosowanie tej metody naprawy w praktyce.



Rys. 7. Naprawa z użyciem spotera (opracowanie własne)

3.2. Naprawa PDR (usuwanie wgnieceń bez lakierowania)

Metoda naprawy PDR (ang. *Paintless Dent Repair*) to proces usuwania wgnieceń z karoserii samochodowej bez konieczności malowania czy demontażu paneli. Zastosowanie metody PDR ogranicza się głównie do napraw o małym zakresie, takich jak usuwanie wgnieceń spowodowanych przez gradobicia lub inne punktowe uszkodzenia, które nie naruszyły powłok lakierniczych [10].

Technologie usuwania wgnieceń bez lakierowania dzielą się na dwie główne metody: wyciąganie metodą klejową oraz wypychanie [10].

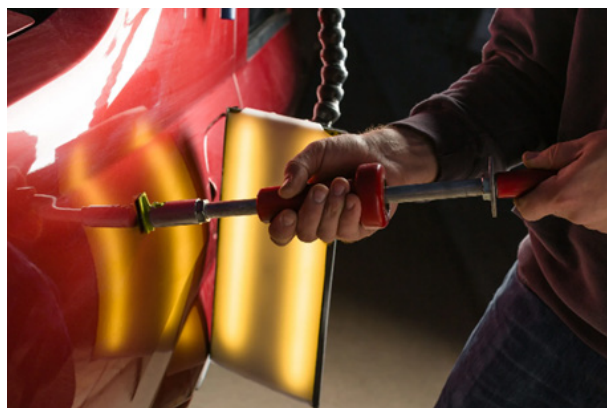
Metoda klejowa polega na przyklejeniu specjalnych adapterów do wgniecionego obszaru, a następnie delikatnym wyciągnięciu ich w celu wyrównania powierzchni [10].

Z kolei wypychanie, często realizowane za pomocą narzędzi, takich jak: łyżki czy wypychacze, wymaga precyzyjnego manipulowania wgnieceniami od wewnętrznej strony panelu, z wykorzystaniem technik termicznych, polegających na podgrzewaniu i chłodzeniu metalu [10].

Naprawy za pomocą metody usuwania wgnieceń bez lakierowania zdobywają popularność ze względu na ich efektywność i oszczędność czasu w stosunku do tradycyjnych metod naprawy. Technika ta pozwala na zachowanie

oryginalnego lakieru i eliminuje potrzebę jego ponownego nakładania, co przekłada się na obniżenie kosztów naprawy oraz utrzymanie wartości pojazdu ze względu na minimalną ingerencję w powłokę lakierniczą [10].

Przykład wykonywania usuwania wgnieceń bez lakierowania z użyciem specjalistycznych narzędzi zaprezentowano na rysunku 8, demonstrując praktyczne zastosowanie tej techniki.



Rys. 8. Naprawa karoserii za pomocą metody usuwania wgnieceń bez lakierowania [7]

3.3. Naprawy przy użyciu lutospawania MIG

Lutospawanie MIG, znane również jako lutowanie twarde, jest procesem spajania metali, który łączy w sobie elementy lutowania i spawania. Głównym spoiwem używanym w tym procesie jest stop miedzi. Posługując się tą techniką, wykorzystuje się łuk elektryczny spawarki do topienia lutowia, co odróżnia ją od tradycyjnego lutowania wykonywanego z użyciem palnika gazowego. Lutospawanie zostało wprowadzone do produkcji i naprawy stalowych karoserii samochodowych głównie ze względu na potrzebę obniżenia temperatury podczas łączenia elementów [8, 10].

Wysokogatunkowe stopy stalowe, wykorzystywane do wykonywania blach karoserii, nie są odporne na wysokie temperatury przekraczające granicę 600°C . W procesie lutospawania temperatura pracy nie powinna przekraczać 1000°C .

Obniżona temperatura zapobiega deformacjom blach karoseryjnych oraz pozwala na zachowanie większości powłok ochronnych, takich jak cynkowe. Jest to szczególnie istotne, ponieważ powłoka cynkowa na blachach karoseryjnych zaczyna parować już w temperaturze około 300°C [8, 10].

Przykład wykonywania lutospawania MIG w naprawie karoserii przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Naprawa za pomocą metody lutospawania karoserii [4]

3.4. Naprawy z użyciem zgrzewania oporowego

Zgrzewanie oporowe jest popularną metodą używaną do łączenia stalowych elementów karoserii samochodowych. Proces ten wykorzystuje opór elektryczny materiału do generowania ciepła potrzebnego do spajania. Kluczowym aspektem jest dostosowanie parametrów zgrzewania do charakterystyki materiału, szczególnie przy wysokogatunkowych stopach stalowych, które wymagają wyższych prądów zgrzewania i silniejszego docisku elektrod. Standardowo prądy zgrzewania powinny osiągać co najmniej 13 kA, natomiast w bardziej wymagających przypadkach mogą być zalecane prądy przekraczające 14 kA, a minimalna siła docisku elektrod to 500 daN [8, 10].

Na rysunku 10 zaprezentowano zastosowanie metody zgrzewania oporowego w procesie naprawy karoserii.



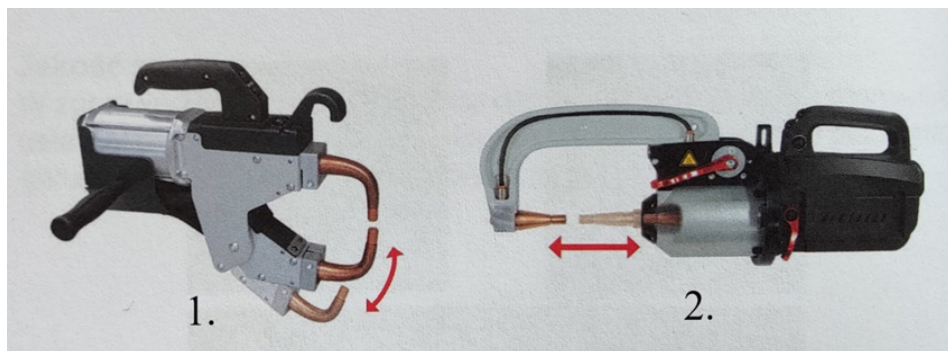
Rys. 10. Naprawa z wykorzystaniem zgrzewarki oporowej [2]

Współczesne zgrzewarki są wyposażone w systemy automatycznego dostosowywania parametrów przed rozpoczęciem procesu zgrzewania. Aby weryfikować jakość wykonanych zgrzein, stosuje się test rozrywania. Test ten pozwala sprawdzić, czy połączenia są na tyle mocne, że nie rozłączą się bez wyrwania otworu w materiale [10].

W kwestii wyboru uchwytów zgrzewarek wyróżnia się dwa główne typy: „C” i „X”. Uchwyt typu „C” charakteryzuje się tym, że ruchoma elektroda jest dociskana wzdłuż osi elektrody stałej, co zapewnia stałą siłę docisku niezależnie od użytych elektrod czy ich przedłużeń.

Tymczasem w uchwycie typu „X” zastosowanie dłuższych elektrod lub przedłużeń ramion prowadzi do zmniejszenia siły docisku w procesie zgrzewania [10].

Uchwyt „C” przedstawiono na pozycji 1, a uchwyt „X” – na pozycji 2 na rysunku 11.



Rys. 11. Dwa typy uchwytów zgrzewarek oporowych [10]

3.5. Naprawa karoserii z użyciem ramy

Naprawa karoserii pojazdów z użyciem ramy naprawczej stanowi kluczowy i złożony proces w blacharstwie samochodowym, mający zasadnicze znaczenie dla zapewnienia bezpieczeństwa oraz właściwości jezdnych pojazdu, szczególnie w przypadku poważnych uszkodzeń konstrukcji nośnej. Rama naprawcza jako specjalistyczne urządzenie umożliwia stabilne mocowanie uszkodzonego pojazdu, co jest niezbędne do precyzyjnego przywrócenia jego oryginalnych wymiarów i geometrii. W serwisach wielomarkowych istotna jest aktualna dokumentacja dotycząca różnych modeli pojazdów [10].

Proces naprawy pojazdu z wykorzystaniem ramy naprawczej wymaga dostosowania do specyfikacji konkretnego modelu pojazdu oraz typu urządzenia naprawczego.

Pierwszym kluczowym etapem jest odpowiednie zamocowanie pojazdu. Następnym krokiem jest wykonanie dokładnych pomiarów i kontroli geometrii, co jest konieczne do zagwarantowania prawidłowej naprawy [10].

Kolejnym etapem jest prostowanie, które polega na wykorzystaniu sił działających w kierunku tych sił, które spowodowały deformację karoserii podczas kolizji. Istotne jest także przeprowadzanie dokładnych pomiarów i kontroli geometrii karoserii w trakcie całego procesu, aby zapewnić właściwe wykonanie naprawy [10].

Po zakończeniu wszystkich prac naprawczych niezbędne jest wykonanie ponownych, szczegółowych pomiarów, mających na celu upewnienie się, że konstrukcja nośna pojazdu została właściwie przywrócona do jej pierwotnego stanu [10].

Przykład wykonywania naprawy na ramie naprawczej przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Metoda naprawy karoserii z użyciem ramy (opracowanie własne)

4. ANALIZA WYBRANYCH METOD NAPRAWCZYCH W ZALEŻNOŚCI OD RODZAJU USZKODZENIA

Analizę wybranych metod naprawczych przeprowadzono w sposób tabelaryczno-opisowy, mianowicie w tabeli 1 przedstawiono ocenę stosowalności wybranych technologii napraw blacharskich w zależności od rodzajów uszkodzeń karoserii samochodowej oraz wybranych przykładów ich uszkodzeń. Znaczenie poszczególnych kolumn w tabeli jest następujące:

- 1) **rodzaje uszkodzeń** – klasyfikacja uszkodzeń karoserii z uwzględnieniem ich rodzaju. Zawiera ona uszkodzenia: powierzchniowe, wynikające z ekspozycji na warunki atmosferyczne, zmęczeniowe i uszkodzenia elementów nośnych karoserii [8, 10],
- 2) **przykładowe uszkodzenia** – dla każdego rodzaju uszkodzenia podano wybrany przykład uszkodzenia: uderzenie kamienia na przednim błotniku, długotrwałe pozostawione wgniecenie na tylnej klapie bagażnika, pęknięcie mocowania tylnego zawieszenia oraz zderzenie czołowe samochodu [8, 10],
- 3) **wybrane metody naprawy** – w tabeli dla każdego przykładowego uszkodzenia wskazane są zalecane, nieodpowiednie oraz zależne od specyfikacji uszkodzenia metody naprawy. Są to: naprawa panelowa, usuwanie wgnieceń bez lakierowania, lutowanie MIG, zgrzewanie oraz naprawa z użyciem ramy [8, 10].

Tab. 1. Analiza wybranych metod naprawczych w kontekście rodzajów uszkodzeń [8–12]

Rodzaj uszkodzenia	Przykładowe uszkodzenie	Wybrane metody naprawy				
		Naprawy panelowe	PDR	Lutowanie MIG	Zgrzewanie	Naprawa z użyciem ramy
Powierzchnia karoserii	Uderzenie kamienia na przednim błotniku	+	+/-	-	-	-
Ekspozycja na warunki atmosferyczne	Długotrwałe pozostawione wgniecenie na tylnej klapie bagażnika	+	-	+/-	+/-	-
Zmęczeniowe uszkodzenie karoserii	Mocowanie zawieszenia tylnego uległo pęknięciu	-	-	+/-	+/-	-
Uszkodzenia elementów nośnych karoserii	Zderzenie czołowe samochodu	+	-	+/-	+/-	+

Legenda:

- symbol „+” oznacza, że metoda jest zalecana i najbardziej odpowiednia dla danego przykładu uszkodzenia,
- symbol „-” oznacza, że metoda jest nieodpowiednia lub niewskazana,
- symbol „+/-” wskazuje na to, że metoda może być odpowiednia w zależności od specyficznych okoliczności, takich jak rozmiar uszkodzenia czy lokalizacja uszkodzenia.

4.1. Uszkodzenie powierzchni karoserii

W przypadku uszkodzenia powierzchni karoserii, spowodowanego uderzeniem kamienia na przednim błotniku, możliwe są dwie główne metody naprawy: naprawa panelowa i usuwanie wgnieceń bez lakierowania, ich stosowność zależy od stopnia uszkodzenia [10].

- 1) **Naprawa Panelowa (+)**: w przypadku gdy uderzenie kamienia spowodowało głębokie wgniecenie i uszkodzenie lakiernicze na przednim błotniku, najbardziej odpowiednią metodą naprawy jest naprawa panelowa. Metoda ta polega na wyprostowaniu wgniecenia, a jeśli to konieczne, na wymianie całego panelu. W sytuacji gdy doszło do uszkodzenia lakieru, konieczne jest także jego zeszlifowanie i ponowne nałożenie, co pozwala na przywrócenie oryginalnego wyglądu błotnika [10, 12].
- 2) **PDR (+/-)**: metoda PDR jest skuteczna, gdy uszkodzenie jest niewielkie i nie naruszyło powłoki lakierniczej. Technika ta polega na delikatnym wypychaniu wgniecenia od wewnętrznej strony panelu, bez konieczności interwencji lakierniczej. PDR jest mało inwazyjną metodą i może być stosowana, gdy uszkodzenie jest powierzchniowe i nie wymaga gruntownej naprawy panelowej [10].

4.2. Uszkodzenie wynikające z ekspozycji na warunki atmosferyczne

Przypadek uszkodzenia wynikającego z ekspozycji na warunki atmosferyczne dotyczy pozostawienia na dłuższy okres wgniecenia na tylnej klapie bagażnika, gdzie została naruszona powłoka lakiernicza. W tym przypadku głównie stosowana metoda naprawy to naprawa panelowa, a metody, takie jak: lutowanie MIG i zgrzewanie, mogą być rozważane w zależności od specyfikacji uszkodzenia [9, 10].

- 1) **Naprawa Panelowa (+)**: w przypadku długotrwałego wgniecenia na tylnej klapie bagażnika naprawa panelowa jest najbardziej odpowiednia. Proces ten może obejmować usunięcie uszkodzonego obszaru i zastąpienie go nowym panelem lub wyprostowanie istniejącego panelu, jeśli wgniecenie nie jest zbyt głębokie. Następnie przeprowadza się szlifowanie, gruntowanie i malowanie, aby przywrócić oryginalny wygląd tylnej klapy [10].
- 2) **Lutowanie MIG (+/-)**: lutowanie MIG może być rozważane, jeśli wgniecenie na tylnej klapie jest znaczące lub korozja wywołana ekspozycją na wodę i sól jest rozległa. Lutowanie użyte jest do przyspawania „zdrówego” elementu karoserii. Jest to szczególnie przydatne, gdy zachodzi potrzeba wzmocnienia obszaru naprawy bez narażania go na zbyt wysokie temperatury. Dodatkowo urządzenie do lutowania MIG ma przewagę w mniej dostępnych miejscach, gdzie użycie zgrzewarki oporowej może być utrudnione [10].
- 3) **Zgrzewanie (+/-)**: zgrzewanie oporowe może być rozważane jako alternatywna metoda do lutowania, szczególnie w sytuacjach gdy pożądane jest

połączenie nowego panelu z oryginalną strukturą karoserii. Technika ta zapewnia mocne i trwałe połączenia, jednak wymaga ona dopasowania parametrów zgrzewania do właściwości materiału elementu oraz w przypadku gdy miejsce, w którym znajduje się element poddawany naprawie, jest dostępne dla uchwytu urządzenia zgrzewającego [8, 10].

4.3. Uszkodzenie zmęczeniowe karoserii

Pęknięcie mocowania zawieszenia tylnego wynika z długotrwałego obciążenia i stresu mechanicznego związanego ze złą eksploatacją pojazdu. Tego typu uszkodzenia często nie są widoczne na pierwszy rzut oka, lecz mogą znacząco wpływać na integralność konstrukcyjną pojazdu. W przypadku pęknięcia mocowania zawieszenia tylnego do naprawy użyte zostały metody: lutowanie MIG oraz zgrzewanie. Każda z nich ma swoje specyficzne zastosowania w zależności od charakteru uszkodzenia [10, 11].

- 1) **Lutowanie MIG (+/-)**: lutowanie MIG, łączące w sobie cechy lutowania i spawania, jest skuteczną metodą do precyzyjnego wzmacniania uszkodzonego mocowania zawieszenia. Pozwala ono na przywrócenie wytrzymałości metalu przy minimalnym ryzyku nadmiernego nagrzewania i osłabienia otaczających struktur konstrukcyjnych oraz warstw antykorozyjnych [10].
- 2) **Zgrzewanie (+/-)**: zgrzewanie oporowe stanowi mocną i trwałą alternatywę, szczególnie efektywną, gdy uszkodzone mocowanie zawieszenia jest wykonane z grubszego metalu, który może wytrzymać proces zgrzewania. Metoda ta jest idealna do naprawy uszkodzeń zlokalizowanych w dostępnych obszarach dla uchwytu, gdzie precyzyjne zgrzewanie może szybko i skutecznie przywrócić strukturalną integralność karoserii. Zgrzewanie jednak może nie być najlepszym rozwiązaniem, gdy uszkodzenie znajduje się w miejscu trudno dostępnym dla urządzenia zgrzewającego lub gdy wymagane jest podejście naprawcze o mniejszej temperaturze pracy [8, 10].

4.4. Uszkodzenia elementów nośnych karoserii

Ten rodzaj uszkodzeń jest konsekwencją poważnych zdarzeń drogowych, jakim jest właśnie uderzenie czołowe. W wyniku takiego zderzenia struktura nośna pojazdu może doznać znacznego uszkodzenia, co wymaga szczegółowej diagnozy, pomiarów i złożonej procedury naprawczej [10]. Poniżej przedstawiono metody naprawy dostosowane do sytuacji zderzenia czołowego:

- 1) **Naprawa Panelowa (+)**: jest najbardziej odpowiednia w przypadku, gdy uszkodzenia elementów przednich pojazdu są ograniczone do zewnętrznych paneli karoserii, bez poważnego naruszenia elementów nośnych. Metoda ta pozwala na wymianę lub naprawę zdeformowanych paneli, ale nie jest wystarczająca, gdy struktura nośna pojazdu została naruszona [10].
- 2) **Lutowanie MIG (+/-)**: może być stosowane do łączenia pękniętych lub uszkodzonych elementów nośnych, które nie są odpowiedzialne bezpośred-

nio za bezpieczeństwo. Jest to jednak metoda wymagająca precyzji i odpowiednich warunków, dlatego może być mniej odpowiednia przy bardziej skomplikowanych lub rozległych uszkodzeniach [10].

- 3) **Zgrzewanie (+/-)**: skuteczne w przypadkach, gdy konieczne jest mocne połączenie metalowych elementów karoserii, zwłaszcza w rejonach naruszonych strukturalnie. Zgrzewanie wymaga dostępu do uszkodzonych obszarów i może być ograniczone przez lokalizację uszkodzeń [10].
- 4) **Naprawa z użyciem ramy naprawczej (+)**: to metoda kluczowa w przypadku poważnych uszkodzeń struktury przedniej nośnej pojazdu. Pozwala na przywrócenie właściwej geometrii karoserii [10]. Zalecana szczególnie w sytuacjach, gdy zderzenie czołowe spowodowało istotne deformacje ramy lub podwozia, które nie mogą być naprawione poprzez użycie naprawy panelowej i wymianę elementów [10].

5. PODSUMOWANIE

W ostatnich latach przemysł motoryzacyjny przeżywa istną rewolucję. Całe otoczenie, w tym również zdecydowana większość środowiska naukowego, skoncentrowało swe wysiłki na badaniu innowacyjnych pojazdów, na napędzających je jednostkach napędowych oraz źródłach ich zasilania, zapominając o innym, równie istotnym obszarze, mianowicie – o technologii napraw. To właśnie dzięki tej wiedzy możliwa jest efektywna i długa eksploatacja poruszających się po polskich drogach pojazdów. Niestety o ile technologie napraw blacharskich nie stanęły w miejscu, o tyle tempo rozwoju współczesnych pojazdów sprawia, że szybko stają się one nieaktualne albo wręcz w niektórych przypadkach bezużyteczne. Przedstawiona w prezentowanej publikacji analiza pozwala w pewnym sensie zobrazować skalę problemu przez pryzmat ilości czynników, które mają istotny wpływ na jakość wykonanej naprawy, a nawet determinują możliwość zastosowania konkretnej metody. Pośród wielości danych opisowych szczególnie wyróżnia się jeden parametr, który możliwe, że w dostatecznym stopniu pozwoliłby właściwie sklasyfikować wszystkie dostępne metody w zależności od rodzaju uszkodzenia, do którego miałby zostać wykorzystany. Tym parametrem jest geometria uszkodzenia, a dokładniej mówiąc, cechy ją opisujące, takie jak: długość, szerokość oraz głębokość. Zaraz po rodzaju uszkodzonego elementu nadwozia to właśnie rozmiary tego uszkodzenia mają decydujący wpływ na wybór najodpowiedniejszej technologii napraw. Możliwości wymiarowania rozmiarów uszkodzeń jest kilka, natomiast ich subiektywność i czasochłonność niezbyt dobrze wpisuje się w ten obszar.

LITERATURA

- [1] <https://ck1ultimateprotection.com/wp-content/uploads/sites/63/2019/07/doording1.jpg> (dostęp: 23.01.2024).
- [2] <https://sklep.herkules-sc.pl/pl/products/zgrzewarka-gyspot-inverter-bp-genius-40.html> (dostęp: 23.01.2024).
- [3] <https://travismclaw.com/blog/side-impact-or-t-bone-collisions-2/> (dostęp: 23.01.2024).
- [4] <http://www.67-72chevytrucks.com/vboard/showthread.php?t=788280> (dostęp: 23.01.2024).
- [5] <https://www.facebook.com/C10truckspeedsociety/photos/a.518807274880676/5923325907762092/?type=3> (dostęp: 23.01.2024).
- [6] <https://www.maxmeyerslaw.com/faqs/who-is-at-fault-in-a-head-on-collision-.cfm> (dostęp: 23.01.2024).
- [7] <https://www.primetimepdr.com/how-does-paintless-dent-repair-work/> (dostęp: 23.01.2024).
- [8] Livesey A., Robinson A., 2019. *The Repair of Vehicle Bodies*. Routledge, New York.
- [9] Matt J., 2009. *Automotive Bodywork and Rust Repair*. CarTech, Minnesota.
- [10] Raatz B., 2020. *Blacharstwo samochodowe*. RG MEDIA, Białe Błota.
- [11] Shangguan Y., Wang W., Yang C., He A., 2023. Fatigue Strength Assessment of an Aluminium Alloy Car Body Using Multiaxial Criteria and Cumulative Fatigue Damage Theory. *Applied Sciences* 13, 215.
- [12] Szenejko W., 1981. *Blacharstwo*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.

BEZPIECZEŃSTWO POJAZDÓW DROGOWYCH W ASPEKCIE PRZEWOZU TOWARÓW NIEBEZPIECZNYCH W POLSCE

Agnieszka Sołtysiak*, Dawid Lasek, Robert Sołtysiak

Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska

Streszczenie. W pracy omówiono wybrane aspekty bezpieczeństwa środków transportu drogowego przewożących towary niebezpieczne. Analizie poddano zdarzenia drogowe z udziałem pojazdów przewożących ładunki niebezpieczne, które wystąpiły w Polsce w latach 2018–2022. Wytypowane zdarzenia poddano szczegółowej weryfikacji w kontekście istniejących zagrożeń i ich źródeł w systemie transportowym oraz danych dotyczących ich powstawania. Analizowane dane zostały pozyskane z instytucji państwowych, w tym Ministerstwa Infrastruktury, Policji oraz Państwowej Straży Pożarnej, i opracowane w aspekcie możliwości zastosowania ich do oceny bezpieczeństwa systemu transportowego. Dla rozpatrywanego systemu transportowego przedstawiono propozycję budowy 5-stanowego grafu modelu oceny bezpieczeństwa badanego systemu transportowego i wyznaczono prawdopodobieństwa dla zbudowanego łańcucha Markowa.

Słowa kluczowe: system transportowy, zagrożenie, zdarzenie niepożądane, towar niebezpieczny, łańcuch Markowa

1. WSTĘP

Transport osób i ładunków stanowi kluczowy element gospodarki. Według raportu poświęconego zagadnieniom transportu drogowego w Polsce [2], transport drogowy na terenie naszego kraju stanowi jedną z trzech największych gałęzi gospodarki obok handlu hurtowego i handlu detalicznego. Szacuje się, że około połowa polskiego PKB wytworzona jest przy udziale sektora transportu [2].

W aspekcie powyższych danych bardzo ważną rolę odgrywa zapewnienie bezpieczeństwa przewozów w systemach transportowych. Wśród nich kluczowe znaczenie ma bezpieczeństwo transportu drogowego ze względu na najwyższe wskaźniki dotyczące liczby kolizji, wypadków i osób poszkodowanych w odniesieniu do pozostałych gałęzi transportu. Zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa w odniesieniu do osób (operatora i uczestników ruchu drogowego), obiektów technicznych (pojazdu) i otoczenia (elementów infrastruktury i środowiska) wymaga prowadzenia analiz i oceny bezpieczeństwa. Analiza bezpieczeństwa obejmuje m.in.: identyfikację istniejących zagrożeń oraz ich źródeł występujących w badanym systemie transportowym, weryfikację możliwości powstawania zdarzeń niepożądanych, a także badania nad ryzykiem. Stan bezpieczeństwa systemu tłumaczony jest jako stan braku zagrożeń w tym systemie. Powstawanie zdarzeń niepożądanych powoduje zwiększenie ryzyka zagrożeń i jednocześnie obniżenie poziomu bezpieczeństwa.

* adres korespondencyjny: agnieszka.soltysiak@pbs.edu.pl

W aspekcie przewozu ładunków szczególną kategorię stanowią towary niebezpieczne. Zdarzenie drogowe z udziałem pojazdu przewożącego towar niebezpieczny może powodować szereg niekorzystnych skutków, w tym zagrażać życiu lub zdrowiu osób, negatywnie oddziaływać na środowisko naturalne i doprowadzać do znacznych strat materialnych. W jednym z tego typu zdarzeń na terenie Polski w 2017 roku cysterna przewożąca płynny materiał niebezpieczny uległa przewróceniu, co spowodowało jej rozszczelnienie i wyciek niebezpiecznej substancji. W konsekwencji kilka osób zostało rannych, a obszar terenu w pobliżu zdarzenia został objęty restrykcjami z powodu skażenia środowiska.

W odpowiedzi na takie zdarzenia powstają normy i ustawy regulujące sposoby prawidłowego przewozu towarów niebezpiecznych oraz metody ich właściwego zabezpieczania. Równie ważne jest prowadzenie systematycznych analiz przebiegu zdarzeń i wypadków drogowych, w trakcie których zarejestrowano materiały niebezpieczne, a także ich przyczyn i konsekwencji. Porównania z analizami z poprzednich lat umożliwiają wyciągnięcie wniosków w odniesieniu do poprawy bezpieczeństwa na drogach i weryfikację, na ile podjęte działania przyczyniają się do spadku liczby zdarzeń. Dodatkowo dzięki prowadzonym analizom możliwe jest sprawdzenie, czy upoważnione do tego służby dostatecznie dobrze radzą sobie z postawionymi przed nimi wyzwaniami zwalczania negatywnych skutków zdarzeń drogowych.

2. CHARAKTERYSTYKA PRZEWÓZU TOWARÓW NIEBEZPIECZNYCH

2.1. Bezpieczeństwo w przewozach drogowych

Postrzegając przewozy towarów niebezpiecznych jako złożony system transportowy, należy przyrzeć się bezpieczeństwu tego typu systemów oraz metodom jego oceny. Bezpieczeństwo systemu definiowane jest jako stan systemu, w którym nie występują zagrożenia oraz możliwa jest realizacja zadań przez system w granicach akceptowalnego ryzyka. Obok pojęcia bezpieczeństwa występuje pojęcie bezpieczeństwa, która stanowi cechę systemu umożliwiającą spełnianie kryteriów bezpieczeństwa [7, 9].

W celu zapewnienia akceptowalnego poziomu bezpieczeństwa istotne jest projektowanie i wdrażanie skutecznych strategii poprawiających bezpieczeństwo na drogach i zmniejszających liczbę incydentów drogowych. Jako incydenty rozumiane są sytuacje z udziałem uczestników ruchu, prowadzące do szkód materialnych, obrażeń lub śmierci człowieka oraz zniszczenia środowiska naturalnego. Złożoność tego wyzwania wymaga wieloaspektowej analizy. Z perspektywy uczestników ruchu, obiektów technicznych i środowiska dochodzi się do wielu analiz, rozwiązań i wniosków. Dzięki temu ruch drogowy można postrzegać jako skomplikowany system socjotechniczny (C + T + O), w którym kluczowe są interakcje między ludźmi, technologią a otoczeniem [6, 8].

W kontekście przewozu materiałów niebezpiecznych kluczowe jest zdefiniowanie, czym jest ryzyko związane z takim transportem. Ryzyko zazwyczaj obejmuje ocenę częstotliwości występowania oraz stopnia szkód, jakie mogą wynikać z potencjalnych zagrożeń. W przypadku transportu towarów ADR głównym zagrożeniem są towary o szkodliwych i niebezpiecznych właściwościach, które mogą negatywnie wpływać na środowisko i zdrowie ludzi. Cele identyfikacji zagrożeń i ryzyka to: określenie, które niepożądane zdarzenia występują najczęściej, oraz opracowanie rozwiązań, które pozwolą zminimalizować te zagrożenia lub ograniczyć ich wpływ na otoczenie [1, 3].

2.2. Regulacje prawne dotyczące przewozu towarów niebezpiecznych

Najważniejszym dokumentem regulującym przewóz towarów niebezpiecznych jest umowa ADR, czyli międzynarodowa konwencja dotycząca bezpiecznego przewozu towarów niebezpiecznych drogą. Według najnowszych danych do umowy ADR przystąpiły już 52 kraje. Jest to obszerny dokument prawny, zawierający przepisy dotyczące różnych aspektów transportu towarów niebezpiecznych. Składa się z głównej umowy definiującej relacje prawne między stronami oraz załączników A i B, które podzielone są na części, działy, rozdziały i podrozdziały. Załączniki te określają warunki, które muszą być spełnione podczas przewozu różnych kategorii ładunków niebezpiecznych. W przypadku niespełnienia tych warunków państwa muszą umożliwić transport za pomocą specjalnych umów dwustronnych lub wielostronnych, które są następnie przekazywane do sekretarza generalnego ONZ [4, 5].

Towary i ładunki niebezpieczne to wyroby i materiały, których przewóz międzynarodowy jest zabroniony lub dozwolony tylko po spełnieniu określonych warunków. Stanowią one zagrożenie dla [4]:

- życia/zdrowia ludzi i zwierząt,
- majątku publicznego i prywatnego,
- środowiska naturalnego.

Substancje ADR klasyfikowane są poprzez przypisanie im odpowiedniego numeru w wykazie opartym na numeracji UN. Klasyfikacja ta odbywa się zgodnie z postanowieniami wcześniej opisanej umowy, z uwzględnieniem cech charakterystycznych danego materiału niebezpiecznego, takich jak właściwości fizyczne i chemiczne. Każda z klas ma swoje unikalne kody klasyfikacyjne określające ich właściwości. Niektóre klasy wyróżniają się szczególnym podziałem, na przykład klasa pierwsza (materiały wybuchowe i przedmioty zawierające materiały wybuchowe) obejmuje podklasy od 1.1 do 1.6 oraz dodatkowo 13 kodów klasyfikacji. Z kolei druga klasa (gazy) dzieli się w zależności od sposobu przygotowania materiału na czas przewozu (np. gaz sprężony lub rozpuszczalny). W klasie trzeciej (materiały ciekłe zapalne) pojawiają się regulacje dotyczące grup pakowania. Szczegóły dotyczące po-

działów, kodów oraz przynależności do poszczególnych grup pakowania wraz z ich charakterystyką znaleźć można w literaturze lub na stronie gov.pl [4].

Oprócz prawnie określonych metod pakowania, zabezpieczania i przewożenia towarów niebezpiecznych regulacje obejmują również kierowcę. Kierowca musi mieć prawo jazdy odpowiedniej kategorii oraz ważne zaświadczenie do przewożenia towarów ADR wydawane na 5 lat [4].

Na czas przewozu kierowcy otrzymują ponadto instrukcję zawierającą informacje o postępowaniu w przypadku wystąpienia incydentów oraz praktyczne wskazówki dotyczące zasad przewozu, np. unikania dziur w drogach, które powodować mogą nadmierne drgania i narażać substancję na uszkodzenie lub niepożądane reakcje, takie jak zapłon [4].

Przed rozpoczęciem transportu towarów niebezpiecznych konieczne jest wyznaczenie numerów UN z tabeli A umowy o ADR. Numery te określają metody pakowania, znakowania oraz zasady postępowania z materiałami podczas transportu. Numer ten składa się z czterocyfrowego kodu identyfikującego przewożony towar. Również niezbędnym elementem jest karta charakterystyki substancji niebezpiecznych, która oprócz numeru UN zawiera opis zagrożeń związanych z przewożonymi materiałami oraz sposoby ich neutralizacji [4].

Podczas transportu jednostka transportowa musi być oznakowana dwiema prostokątnymi pomarańczowymi tablicami (30 cm na 40 cm), umieszczonymi z przodu pojazdu oraz z tyłu. Na bokach i z tyłu jednostki transportowej należy ponadto umieścić etykietę w kształcie kwadratu obróconego o 45 stopni, wskazującą na właściwości przewożonego materiału lub sposób jego przewozu. Etykieta ta powinna mieć wymiary minimum 25 cm na 25 cm. Dla małych pojazdów stosuje się mniejsze tablice o wymiarach 12 cm na 30 cm [4, 5].

3. CELE I METODYKA BADANIA

3.1. Cele badania

Celem przeprowadzonych badań są: zgromadzenie i przetworzenie informacji dotyczących zdarzeń niepożądanych, które wystąpiły w Polsce w latach 2018–2022 z udziałem pojazdów przewożących towary niebezpieczne, oraz zastosowanie wyników przeprowadzonej analizy do opracowania modelu oceny bezpieczeństwa rozpatrywanego systemu transportowego.

3.2. Metodyka badania

Badania dotyczące analizy zdarzeń niepożądanych, ich skutków oraz zagrożeń i źródeł zagrożeń powodujących ich powstawanie zostały przeprowadzone na podstawie danych rzeczywistych pozyskanych od Ministerstwa Infrastruktury (MI), Komendy Głównej Policji (KGP) oraz Państwowej Straży

Pożarnej (PSP). Informacje przekazane przez Ministerstwo Infrastruktury obejmują okres 7 lat, od roku 2017 do 2022 roku włącznie, i dotyczą:

- roku i miejsca powstania zdarzenia,
- okoliczności zdarzenia,
- przyczyny powstania zdarzenia,
- rodzaju (kodu) przewożonego towaru niebezpiecznego i jego ilości,
- liczby ofiar,
- ewentualnego uwolnienia się towaru niebezpiecznego,
- szacowanych wartości powstałych szkód materialnych,
- reakcji na zdarzenie w postaci ewentualnego zamknięcia obszaru zdarzenia i/lub ewakuacji osób.

Wśród informacji o zdarzeniach drogowych z udziałem pojazdów przewożących towary niebezpieczne pozyskanych z Komendy Głównej Policji znajdują się dane dotyczące liczby wypadków i kolizji oraz liczby osób rannych i zabitych w latach 2018–2022 w odniesieniu do:

- województwa,
- miesiąca,
- dni tygodnia,
- miejsca zdarzenia i jego charakterystyki,
- rodzaju drogi,
- warunków atmosferycznych,
- pory dnia,
- rodzaju zdarzenia,
- osoby winnej zdarzeniu,
- przyczyny zdarzenia.

Informacje przekazane przez Państwową Straż Pożarną dotyczą ogólnej liczby zdarzeń z udziałem pojazdów przewożących towary niebezpieczne, zaistniałych w latach 2018–2022, z podziałem na zdarzenia małe, lokalne, średnie, duże oraz gigantyczne lub klęskę żywiołową.

Spośród zgromadzonych danych wyodrębniono najistotniejsze z punktu widzenia celu badań i obejmujące lata 2018–2022, a następnie przetworzono je i opracowano w sposób umożliwiający ich porównanie między poszczególnymi źródłami informacji. Poza tym wytypowano i zweryfikowano:

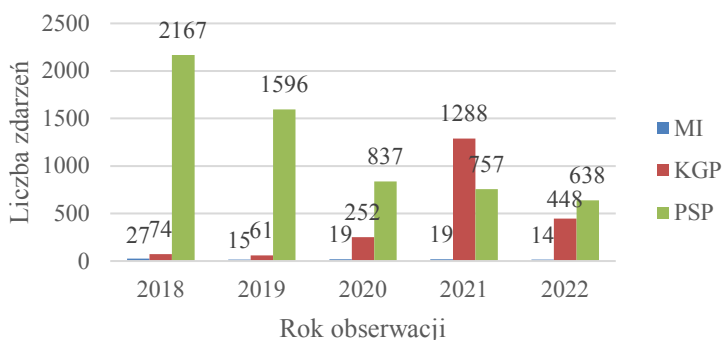
- najczęstsze rodzaje zdarzeń niepożądanych,
- klasy towarów niebezpiecznych biorących udział w zdarzeniach,
- miejsca, w których dochodzi do zdarzeń niepożądanych,
- najczęstsze przyczyny powstawania zdarzeń niepożądanych i osoby za nie odpowiedzialne,
- częstość uwolnienia się substancji niebezpiecznej podczas zdarzeń,
- źródła powstawania zagrożeń w systemie transportu towarów niebezpiecznych.

4. ANALIZA DANYCH I WYNIKI ANALIZY

Na potrzeby opracowania analizy przyjęto następującą terminologię dotyczącą występujących zdarzeń i ich przyczyn:

- **zdarzenie niepożądane** – zdarzenie losowe, w wyniku którego powstają straty materialne, degradacja środowiska i/lub utrata zdrowia lub życia ludzkiego;
- **zagrożenie** – potencjalna zdolność do wyrządzenia szkody będąca przyczyną powstania zdarzenia niepożądanego;
- **źródło zagrożenia** – obiekt, zdarzenie lub stan systemu, którego obecność w obszarze analizy może być powodem powstania zagrożenia i w znaczący sposób obniżyć bezpieczeństwo;
- **kolizja** – zdarzenie niepożądane, którego skutkiem są wyłącznie straty materialne;
- **wypadek** – zdarzenie niepożądane, w wyniku którego co najmniej jedna osoba została ranna lub poniosła śmierć.

Przeprowadzone analizy wykazały rozbieżności dotyczące liczby powstałych zdarzeń niepożądanych oraz osób rannych i zabitych w tych zdarzeniach. Różnice w liczbie odnotowanych zdarzeń przez poszczególne źródła informacji zostały przedstawione na rysunku 1.



Rys. 1. Liczby zdarzeń z udziałem pojazdów przewożących towary niebezpieczne odnotowane przez różne źródła informacji w latach 2018–2022 (opracowanie własne)

Przewaga zgłoszeń zarejestrowanych przez Państwową Straż Pożarną wynika z tego, że do PSP zgłaszane są zdarzenia o charakterze lokalnym, które stanowią od 78% do 88% spośród wszystkich odnotowanych przez PSP zdarzeń w badanym przedziale czasu. Zdarzenia lokalne często powstają w miejscach załadunku i rozładunku i nie powodują konsekwencji dla zdrowia i życia ludzkiego oraz istotnych strat materialnych. Pozostałe instytucje z założenia gromadzą informacje o poważnych incydentach i wypadkach, których występuje mniej niż zdarzeń lokalnych.

Biorąc pod uwagę aspekty dotyczące bezpieczeństwa pojazdów w analizowanym systemie transportowym, zauważono, że:

- klasą towaru najczęściej biorącą udział w zdarzeniach drogowych jest klasa 3 (olej napędowy, benzyna) – 42% wszystkich zdarzeń w latach 2018–2022 (MI);
- procentowy udział zdarzeń, w których doszło do uwolnienia substancji niebezpiecznej, w odniesieniu do wszystkich odnotowanych zdarzeń wyniósł 58–79% w badanym przedziale czasu – średnio około 65% rocznie (MI);
- w 46% przypadków w badanym przedziale czasu doszło do usunięcia przyczyny zdarzenia bez konieczności zamknięcia drogi i/lub ewakuacji osób. W 36% zdarzeń zamykany jest obszar (droga) w miejscu zdarzenia. W 10% zdarzeń dochodzi do ewakuacji ludzi z zagrożonego obszaru (MI);
- według danych MI najwięcej zdarzeń występuje poza obszarem zabudowanym (54% zdarzeń). Około 32% zdarzeń powstaje w miejscu załadunku lub rozładunku towaru niebezpiecznego;
- według danych KGP 73% kolizji powstaje na obszarze zabudowanym (27% poza obszarem zabudowanym). W odniesieniu do wypadków statystyka ta wynosi odpowiednio: 51% i 49%.

Analiza zarejestrowanych zdarzeń powstałych z udziałem pojazdów przewożących towary niebezpieczne w latach 2018–2022 w Polsce umożliwiła wyodrębnienie grup zdarzeń niepożądanych, ich rodzajów w ramach tych grup oraz najczęstszych źródeł zagrożenia. Wyniki analizy zamieszczono w tabeli 1.

Tab. 1. Zdarzenia niepożądane oraz źródła zagrożeń powstałe w analizowanym systemie transportowym (opracowanie własne)

Grupy zdarzeń niepożądanych	Rodzaje zdarzeń niepożądanych	Źródło zagrożenia
Kolizja lub wypadek	Zderzenie z innym pojazdem	Błąd człowieka (kierującego pojazdem z t.n./kierującego innym pojazdem/pieszego); niekorzystne warunki otoczenia; niewłaściwa infrastruktura liniowa (np. uszkodzenia drogi, wyboje)
	Uderzenie w przeszkodę (drzewo, barierkę, znak, słup)	
	Przewrócenie pojazdu	
	Uderzenie w pieszego	
	Najechanie na dziurę/wybój	
	Uderzenie w zwierzę	
Uszkodzenia pojazdów lub ładunków i/lub uwolnienie substancji niebezpiecznej	Uszkodzenie/nieszczelność zbiornika, pojemników, osprzętu; awaria urządzeń NO (stacja NO), awaria DPPL	Błąd człowieka (kierującego/operatora); niewłaściwy stan techniczny pojazdu bądź ładunku (pierwotne uszkodzenia/wadliwe zabezpieczenie ładunku)
	Uszkodzenie ładunku i/lub uwolnienie substancji niebezpiecznej	
	Uszkodzenie pojazdu i/lub uwolnienie substancji niebezpiecznej	

5. MODEL OCENY BEZPIECZEŃSTWA SYSTEMU TRANSPORTOWEGO

5.1. Model graficzny oceny bezpieczeństwa

Identyfikacja systemu transportowego oraz występujących w nim zdarzeń niepożądanych, mających wpływ na bezpieczeństwo systemu, pozwoliła na opracowanie 5-stanowego graficznego modelu bezpieczeństwa systemu. Na podstawie przeprowadzonej analizy obok stanów fizycznych systemu: wzorcowego, akceptowalnego, granicznego i krytycznego wyodrębniono stan pośredni między stanem akceptowalnym a granicznym, który nazwano stanem nieakceptowalnym. Graf stanów modelu bezpieczeństwa systemu transportowego zaprezentowano na rysunku 2.

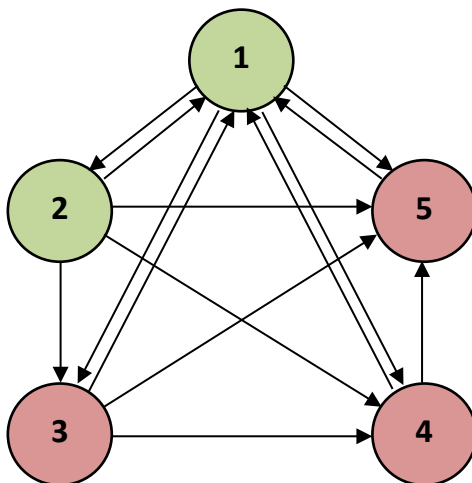
W przedstawionym grafie stanów modelu bezpieczeństwa systemu transportowego wyróżniono następujące stany bezpieczeństwa:

1 – stan wzorcowy

Stan wzorcowy odzwierciedla sytuację, w której środki transportu prawidłowo realizują przydzielone zadanie przewozowe, nie dochodzi do uszkodzeń pojazdów, kolizji, wypadków.

2 – stan akceptowalny

Stan akceptowalny dotyczy sytuacji, w której doszło do uszkodzenia pojazdu lub kolizji i strat materialnych związanych z tym zdarzeniem, nie ma natomiast osób poszkodowanych oraz nie doszło do uwolnienia substancji niebezpiecznej z pojazdu.



Rys. 2. Graf stanów modelu bezpieczeństwa systemu transportowego (opracowanie własne)

3 – stan nieakceptowalny

Stan nieakceptowalny odzwierciedla sytuację, w której doszło do uszkodzenia pojazdu lub kolizji, na skutek czego substancja niebezpieczna wydostała

się z pojazdu i jednocześnie powstały straty materialne oraz zagrożenie dla środowiska związane z tym zdarzeniem. W powstałym zdarzeniu nie ma osób poszkodowanych i nie ma możliwości kontynuowania realizacji zadania przewozowego, dopóki nie zostaną podjęte działania uzdatniające, pozostały ładunek nie zostanie odpowiednio zabezpieczony i nie zostaną usunięte skutki uwolnienia się niebezpiecznej substancji.

4 – stan graniczny

Stan graniczny odzwierciedla sytuację, w której doszło do wypadku i co najmniej jedna z osób została ranna oraz poniesiono straty materialne. Na skutek zdarzenia mogło ponadto dojść do uwolnienia niebezpiecznej substancji z pojazdu i zagrożenia dla środowiska. Przebywanie systemu w tym stanie jest równoznaczne z koniecznością podjęcia działań uzdatniających w celu zmiany stanu systemu na akceptowalny bądź wzorcowy.

5 – stan krytyczny

Stan krytyczny odzwierciedla sytuację, w której doszło do wypadku i co najmniej jedna z osób poniosła śmierć oraz poniesiono straty materialne. Na skutek zdarzenia mogło ponadto dojść do uwolnienia niebezpiecznej substancji z pojazdu i powstania zagrożenia dla środowiska. Przebywanie systemu w stanie krytycznym oznacza, że system nie ma możliwości realizacji swojego celu.

Poszczególne stany na powyższym grafie oznaczono kolorami zielonym lub czerwonym. W stanach 1 i 2, oznaczonych kolorem zielonym, system charakteryzuje się bezpieczeńścią. Tymczasem stany 3, 4 i 5 oznaczono kolorem czerwonym ze względu na to, że przejście do tych stanów powoduje utratę bezpieczeństwa.

5.2. Łańcuch markowa dla zaproponowanego modelu

Na podstawie grafu stanów modelu bezpieczeństwa analizowanego systemu transportowego zbudowano macierz P prawdopodobieństw zmian stanów (1) dla łańcucha Markowa.

$$P = \begin{bmatrix} 0 & p_{12} & p_{13} & p_{14} & p_{15} \\ p_{21} & 0 & p_{23} & p_{24} & p_{25} \\ p_{31} & 0 & 0 & p_{34} & p_{35} \\ p_{41} & 0 & 0 & 0 & p_{45} \\ p_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:

$p_{i,j}$ – prawdopodobieństwo zmiany stanu ze stanu S_i do stanu S_j .

W pierwszym etapie wyznaczenia prawdopodobieństw granicznych dla łańcucha Markowa zbudowano macierzowy układ równań (3) zgodny z poniższym zapisem (2):

$$P^T \cdot \Pi = \Pi \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} 0 & p_{21} & p_{31} & p_{41} & p_{51} \\ p_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{13} & p_{23} & 0 & 0 & 0 \\ p_{14} & p_{24} & p_{34} & 0 & 0 \\ p_{15} & p_{25} & p_{35} & p_{45} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \pi_4 \\ \pi_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \pi_4 \\ \pi_5 \end{bmatrix} \quad (3)$$

Utworzony układ równań zastąpiono układem równań liniowych (5), zgodnie z poniższym:

$$\sum_{i=1}^5 p_{ij} \cdot \pi_i = \pi_j \quad (4)$$

$$\begin{cases} p_{21} \cdot \pi_2 + p_{31} \cdot \pi_3 + p_{41} \cdot \pi_4 + p_{51} \cdot \pi_5 = \pi_1 \\ p_{12} \cdot \pi_1 = \pi_2 \\ p_{13} \cdot \pi_1 + p_{23} \cdot \pi_2 = \pi_3 \\ p_{14} \cdot \pi_1 + p_{24} \cdot \pi_2 + p_{34} \cdot \pi_3 = \pi_4 \\ p_{15} \cdot \pi_1 + p_{25} \cdot \pi_2 + p_{35} \cdot \pi_3 + p_{45} \cdot \pi_4 = \pi_5 \end{cases} \quad (5)$$

W celu rozwiązania powyższego układu jedno z równań zastąpiono warunkiem normalizacyjnym (6):

$$\sum_{i=1}^5 \pi_i = 1 \quad (6)$$

Wyznaczone wzory opisujące prawdopodobieństwa graniczne (7) przedstawiają się następująco:

$$\begin{cases} \pi_1 = \frac{1}{1 + p_{12}[1 + p_{23}(1 + p_{34}) + p_{24}] + p_{13}(1 + p_{34}) + p_{14} + \frac{A}{p_{51}}} \\ \pi_2 = \pi_1 \cdot p_{12} \\ \pi_3 = \pi_1(p_{13} + p_{23} \cdot p_{12}) \\ \pi_4 = \pi_1[p_{12}(p_{24} + p_{34} \cdot p_{23}) + p_{34} \cdot p_{13} + p_{14}] \\ \pi_5 = \frac{\pi_1 \cdot A}{p_{51}} \end{cases} \quad (7)$$

gdzie:

$$A = 1 - [p_{21} \cdot p_{12} + p_{31}(p_{13} + p_{23} \cdot p_{12}) + p_{41}(p_{12}(p_{24} + p_{34} \cdot p_{23}) + p_{34} \cdot p_{13} + p_{14})] \quad (8)$$

6. WNIOSKI

W pracy przedstawiono analizę zdarzeń niepożądanych występujących w systemie transportu towarów niebezpiecznych, które wystąpiły w Polsce w latach 2018–2022. Zgromadzenie, przetworzenie i opracowanie pozyskanych danych wykazało, że istnieje duża rozbieżność między danymi dotyczącymi zdarzeń niepożądanych powstałych w Polsce w latach 2018–2022 pochodzącymi z różnych instytucji państwowych. Korzystne byłoby wprowadzenie jednolitego i przejrzystego systemu gromadzenia danych dotyczących zdarzeń drogowych z udziałem pojazdów przewożących towary niebezpieczne. Ingerencja w system zmierzająca do poprawy bezpieczeństwa ludzi i obiektów technicznych jest możliwa wyłącznie z wykorzystaniem badań i przez budowę modeli odzwierciedlających stan faktyczny działania systemu transportowego.

Na podstawie opracowanych danych przedstawiono propozycję budowy 5-stanowego modelu oceny bezpieczeństwa analizowanego systemu transportowego, dla którego wyznaczono prawdopodobieństwa graniczne dla zbudowanego łańcucha Markowa. W kolejnym etapie pracy planowane jest wyznaczenie prawdopodobieństw granicznych przebywania w stanach procesu Markowa, a następnie wyznaczenie ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w analizowanym systemie jako jednej z miar bezpieczeństwa.

Dla przeprowadzonych analiz sformułowano poniższe wnioski:

1. Każdego roku w analizowanym przedziale czasu doszło do uwolnienia substancji niebezpiecznej w ponad połowie odnotowanych zdarzeń niepożądanych z udziałem pojazdów przewożących towary niebezpieczne. Źródłem zagrożenia w tym przypadku mogą być niedostateczne zabezpieczenia ładunku w czasie przewozu lub pojazdy i/lub opakowania pierwotnie uszkodzone.
2. Co trzecie odnotowane zdarzenie z udziałem pojazdów przewożących towary niebezpieczne powstaje w miejscu załadunku lub rozładunku towaru. Skutkiem zdarzenia są najczęściej straty materialne związane z koniecznością naprawy pojazdu lub osprzętu i usunięcia ewentualnego uwolnienia niebezpiecznej substancji. Warto przeanalizować przebieg procesów załadunku i rozładunku towaru z uwzględnieniem wprowadzenia zmian/poprawy (np. przypisać dodatkowego pracownika czy zwiększyć czas realizacji procesów w celu uniknięcia pośpiechu) i odpowiednio zabezpieczyć obszar, w którym realizuje się te procesy.

LITERATURA

- [1] Aven T., 2015. Risk Analysis Second Edition. John Wiley & Sons, Chichester.
- [2] Centrum analiz SpotData, 2022. Transport drogowy w Polsce 2021+. Związek Pracodawców i Logistyka Polska Raport, Warszawa.

- [3] Fornalchyk Y., Afonin M., Postransky T., Boikiv M., 2021. Risk. assessment duuuring the transportation of dangerous goods considering the functional state of the driver. *Transport Problems* 16, 139–152.
- [4] Kutyló T., Pojedyński D., Wagner P., 2021. ADR podręcznik 2021/23. Grupa IMAGE, Warszawa.
- [5] Nowacki G., Chmieliński M., 2017. Analiza transportu towarów niebezpiecznych w państwach członkowskich Unii Europejskiej. *Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe* 9, 104–111.
- [6] Sowa A., 2019. Teoria eksploatacji i diagnostyka pojazdów szynowych: zagadnienia wybrane. Wydawnictwo PK, Kraków.
- [7] Szubartowski M., 2013. Metoda oceny bezpieczeństwa systemu transportowego. Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom.
- [8] Woropay M., Bojar P., 2010. Identyfikacja zdarzeń niepożądanych w systemie transportu miejskiego. *Problemy Eksploatacji* 1, 51–61.
- [9] Woropay M., Wdzięczny A., Bojar P., Szubartowski M., 2008. Metoda oceny skuteczności realizowanych napraw na niezawodność i bezpieczeństwo działania systemów transportu miejskiego. Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Bydgoszcz.

THE INFLUENCE OF AN ADDITIONAL RING IN THE STRUCTURE OF AN ALLOY RIM ON ITS STRENGTH ANALYSIS

Kostyantyn Holenko¹, Serhii Matiukh¹, Tomasz Kałaczynski²,
Aleksandr Dykha^{1*}

¹ Khmelnytskyi National University, 29016, Instytutka 11, Khmelnytskyi, Ukraine

² Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Poland

Summary. Rally rims (alloy wheels) are a symbiosis of multi-spoke classic designs, which nowadays are found exclusively on retro cars or custom models, and typical light alloys with an ordinary 5-6-spoke star. Often, an additional ring is implemented in the design of rally rims and connects the spokes together and is located between the hub and the edge of the rim. Despite the slight increase in rim mass (+1.7% in the case of the studied 15-inch Lancia Delta HF Integrale rim), it was possible to increase the strength by 6.42% (from 128.11 MPa to 136.34 MPa) under radial load conditions. The relevance of the additional ring is confirmed not only by the results of the WRC rally and others but also by civilian alloy wheel models, for example, Avant Garde SRX06, which is installed on modern Mercedes-Benz S580, EQE43 and other EVs.

Key words: von Mises Stress, average stress, radial load, dynamism coefficient, spoked rims, material nonlinearity, strength optimization

1. INTRODUCTION

Analysis and calculation of the strength of car wheel rims is considered in modern research [1–4]. Modern technologies of casting alloy wheels under high pressure from Aluminium alloys (like 6061, 6082, 7075) and Magnesium (like AZ31 and AZ91) make it possible to implement the most daring design solutions – the shapes of rims become more and more complex and new structural elements often appear. This study will analyze the impact of an additional ring implementation in the structure of a multi-spoke alloy rim. This idea is not new and originates from the 80s of the last century – the era of Lancia's dominance in WRC (FIA World Rally Championship) car races with their Delta HF Integrale model. It was on this model and its rally rivals that the strength of rims with an additional ring was practically tested, which after almost 40 years came back into modern trend, keeping at the same time its main task – increasing the strength and rigidity of the rim. In the era of EVs rapid popularization, the mass of which has increased tremendously (more than 2.5–3 tons in the premium class), the issue of the alloy wheels' strength has become more acute than ever, since the growth of unsprung masses is extremely undesirable.

* correspondence address: tribosenator@gmail.com

2. RIM ANALYSES BOUNDARY CONDITIONS

2.1. Mathematical modelling research

The object of research is the 15" Speedline Evolution magnesium rally racing rim originally produced for Lancia Delta HF Integrale (Fig. 1a), which consists of 18 spokes and a concentric ring connecting them together. The ring is located between the hub (4 holes for fastening with bolts) on the outer edge of the rim (closer to it).



a)



b)



c)



d)

Fig. 1. Alloy wheels with the integrated ring: a) solid-model 15" Speedline Evolution for Lancia Delta HF Integrale; b) AMG 20" for EQB X243; c) AMG 21" for EQE43; d) AVANT GARDE – SRX06 21" for Mercedes-Benz S580 and EVs (own study)

In the version of fig. 1d, the "Avant Garde Wheels" manufacturer went even further and gave 2 rings in the structure of the rim, although their thickness is several times smaller than the concepts b and c in Fig. 1.

Let's investigate the mathematical modelling approach which can be particularly effective before complicated and resource-intensive FEA to predict rim strength and mass. The cross-sectional area (A) of the rim without the additional ring can be represented as:

$$A = \pi(R_o^2 - R_i^2) - N_s \cdot t_s \cdot h_s \quad (1)$$

where:

- R_o – outer radius of the rim,
- R_i – inner radius of the rim,
- N_s – number of spokes,
- t_s – thickness of the spokes,
- h_s – height of the spokes (extends from the inner radius to the outer radius).

The cross-sectional area (A_c) of the rim with the additional ring:

$$A_c = \pi(R_o^2 - R_i^2) - \pi(R_c^2 - (R_c - t_c)^2) - N_s \cdot t_s \cdot h_s \quad (2)$$

where:

$\pi(R_c^2 - (R_c - t_c)^2)$ accounts for the material thickness of the internal circle consider its radius (R_c) and thickness (t_c).

The moment of inertia (I_c) for the rim section needs to account for the presence of the additional ring, therefore, by analogy with the equation for determining the area (2), the following should be considered:

$$I_c = \frac{\pi}{4}(R_o^4 - R_i^4) - \frac{\pi}{4}(R_c^4 - (R_c - t_c)^4) - N_s \cdot \frac{t_s \cdot h_s^3}{12} \quad (3)$$

So, considering the applied load F applied at the outer edge of the rim and the bending moment M_c , the normal and bending stress will be the next:

$$\sigma_r = \frac{F}{A}, \sigma_{r,c} = \frac{F}{A_c} \text{ and } \sigma_b = \frac{M \cdot y}{I}, \sigma_{b,c} = \frac{M_c \cdot y}{I_c} = \frac{F(R_o - R_c)y}{I_c} \quad (4)$$

Thus, the change in strain energy due to the additional ring is:

$$\Delta U = U_c - U = \frac{1}{2E} \left(\int_{V_c} (\sigma_{r,c}^2 + \sigma_{b,c}^2) dV - \int_V (\sigma_r^2 + \sigma_b^2) dV \right) \quad (5)$$

where:

- V, V_c – volume of the material in the rim (without the additional ring and considering it),
- E – Young's modulus.

The proposed algorithm of mathematical modeling is an effective method of multi-factor analysis of the selection of optimal geometric parameters of the rim before verification and resource-intensive FEA calculations.

2.2. Fea modelling research

The following two modifications of the Lancia rally rim were analyzed in the Ansys Static Structural environment: with the additional ring according to the original design (Fig. 2a) – model A and the simplified one (without a ring – Fig. 2b) – model B. FEA mesh used the next settings: Element Size = 2 mm; Span Angle Center = Fine; Smoothing = High.

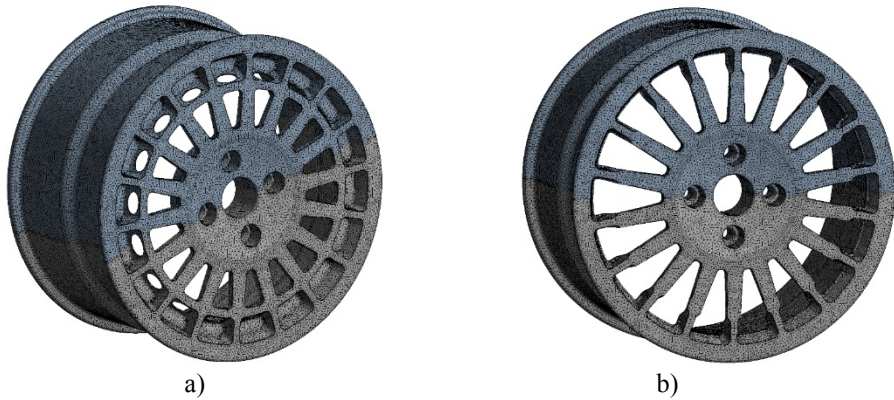


Fig. 2. FEA mesh of the 15-inch Lancia Delta HF Integrale rim: a) original design; b) without a ring (own study)

FEA mesh consists of: 538404 elements (model A) and 468094 (model B). Vertical force F_{wr} (the reaction of the road to the wheels under the influence of the weight of the car m_c) applied to the lower part of the disk (16 surfaces) with the dynamism coefficient k_d (Fig. 3):

$$F_{wr} = \frac{m_c g}{4} k_d = \frac{1215 \cdot 9.81}{4} 2.5 = 7449.5 \text{ N} \quad (6)$$

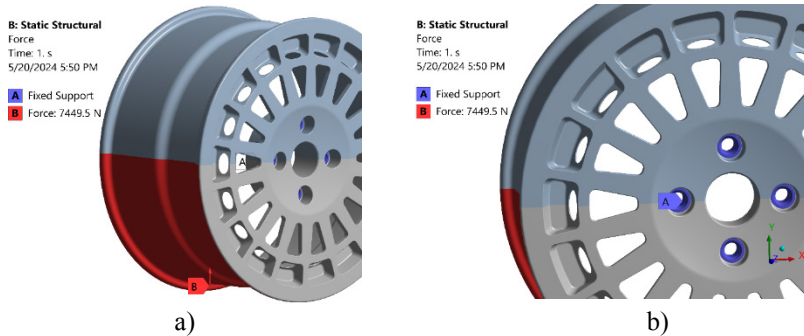


Fig. 3. Ansys-model boundary conditions: a) applied force F_{wr} ; b) Fixed Support (own study)

Fixed support is applied to 30 surfaces that correspondent to the bolt mounting holes (Fig. 3a). Rim material properties: Magnesium Alloy NL with the nonlinear Stress-Strain curve of Bilinear Isotropic Hardening type. The Yield strength = 193 MPa.

3. RIM ANALYSES RESULTS

The main criterion for comparing models A and B will be the maximum and average values of von Mises stresses (scale-deformed map in fig. 4). When moving from the original model A to the modified model B, the value of the max Mises stress increased by 6.42% (from 128.11 MPa to 136.34 MPa – Fig. 4 a, b) but still remain within the Yield strength (193 MPa). Stress extremes fall on the roots of the spokes in the area of the hub – in the corresponding radii of rounding, which is clearly visible from the reverse side of the rims (Fig. 4 c, d and Fig. 5).

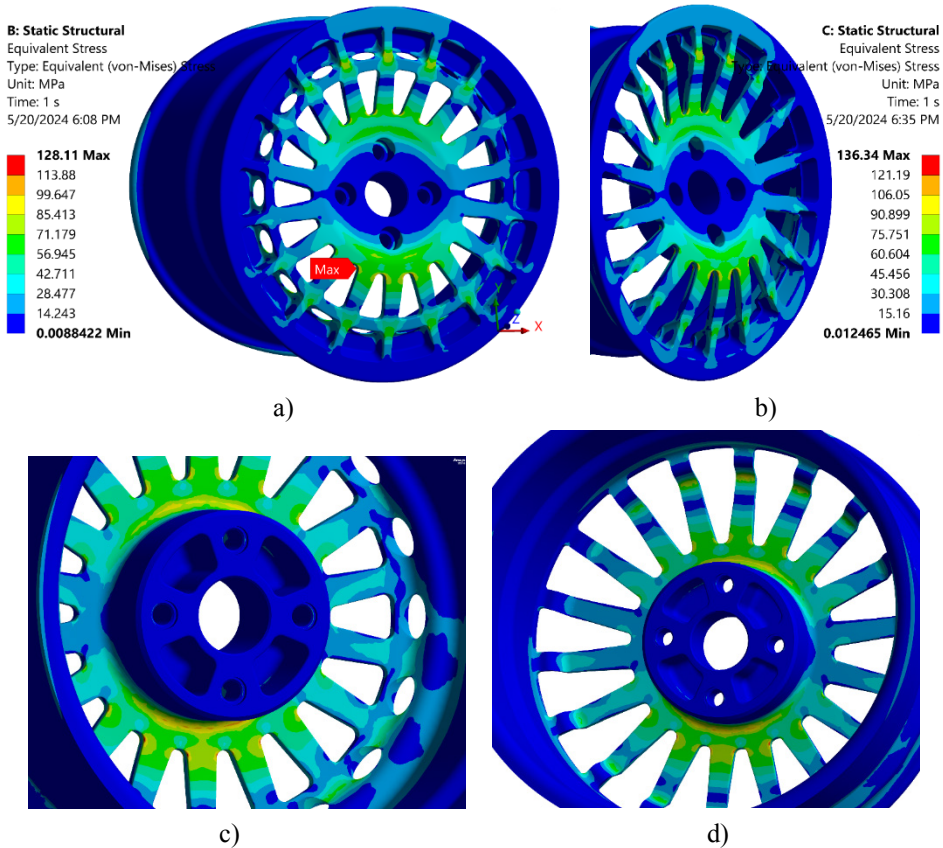


Fig. 4. von Mises Stress maps: a, b) model A and B front view; c, d) model A and B back view near the hub (own study)

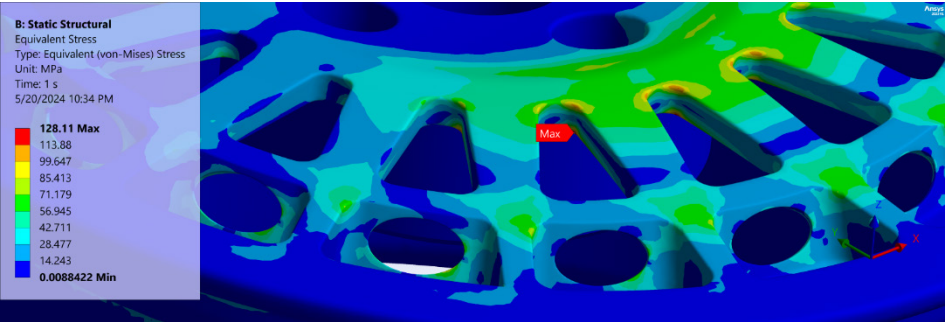


Fig. 5. von Mises Stress map of spokes (model A – max value is 128.11 MPa) (own study)

The average stresses are almost the same in both models: 11.56 MPa (A) and 11.61 MPa (B). This leads to the conclusion that the implementation of an additional ring into the design of the rim increases its uniform strength: with almost unchanged average stresses, the maximum ones are reduced.

Attention should be paid to the lower edge of rim B (closer to the road surface – Fig. 4a, b) – the stress values from below are twice as high as model A (19–21 vs. 10–12 MPa). This may indicate that in conditions of high loads, beyond the yield point, the probability of cracking or irreversible dents increases dramatically (theoretically by a factor of 2). This area is also very important for rim balancing – often as a result of potholes, the edge loses its geometry (the most delicate area), which is transmitted to the steering wheel and affects the course stability of the car. As expected, the inner edge of the rim received the largest deformations (Fig. 6).

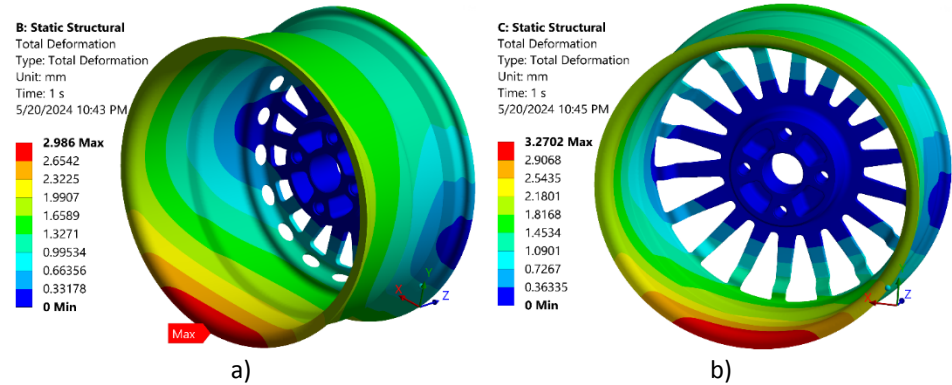


Fig. 6. Deformation map: a) model A; b) model B (own study)

Although the inside edge does not have support in the form of spokes, the original design of the rim (with an additional ring) turned out to be more rigid: the maximum deformations are 2.98 mm (model A) vs. 3.27 mm (model B).

4. CONCLUSIONS

1. The modern design trend of an additional ring turned out to be a surprisingly successful solution, the roots of which go back to the distant 80s in the world of rally. Maximum stresses of the researched model decreased by 6.42% (from 128.11 MPa to 136.34 MPa).
2. The inner side of the rim is traditionally the least rigid, but a ring at the opposite side made it possible to reduce the maximum deformations from 3.27 to 2.98 mm (a model without a ring).
3. Obviously, one could talk about a greater 1.7% mass as a disadvantage, but the concept of a "web" rim design has great prospects: it is not for nothing that smart engineers from Mercedes-Benz use it primarily on super-heavy EVs with a mass of around 3 tons.

LITERATURE

- [1] Kandukuri S.Y., Pai A., Manikandan M., 2022. Scope of Carbon Fibre-Reinforced Polymer Wheel Rims for Formula Student Racecars: A Finite Element Analytical approach. *Journal of the Institution of Engineers (India) Series C* 103, 939–948. <https://doi.org/10.1007/s40032-022-00808-w>
- [2] Korkut T.B., Armakan E., Ozaydin O., Ozdemir K., Goren A., 2020. Design and comparative strength analysis of wheel rims of a lightweight electric vehicle using Al6063 T6 and Al5083 aluminium alloys. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering* 99(2), 57–63.
- [3] Loganathan K., Vijaya Siva Subramani S.K., 2023. Design and optimization of aluminium alloy wheel rim in automobile industry. *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.01.207>
- [4] Poodipeddi S.K.K., Singampalli A., Rayala L.S.M., Ravula S.S.N., 2024. Structural and fatigue analysis of car wheel rims with carbon fibre composites. *World Journal of Engineering* 21(3), 503–509. <https://doi.org/10.1108/WJE-04-2022-0178>

CHARAKTERYSTYKA OCENY STANU POWŁOK PROSZKOWYCH

Tomasz Kałaczyński^{1*}, Mateusz Borkowski¹, Aleksandr Dykha²

¹ Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska

² Khmeltsky National University, Institutskaia str. 11, Khmeltsky, 29016, Ukraine

Streszczenie. W pracy przedstawiono charakterystykę oceny stanu powłok proszkowych ze szczególnym uwzględnieniem opisu metod badań powłok proszkowych wraz z prezentacją wybranych ich wad i uszkodzeń. Dokonano również opisu metod aplikacji powłok lakierniczych oraz opisu mechanizmu osadzania elektrostatycznego. Opisano w pracy proces lakierowania proszkowego w praktyce przemysłowej, co pozwoliło osiągnąć wymierne efekty w procesie projektowania linii lakierniczych.

Słowa kluczowe: lakierowanie proszkowe, farby proszkowe, powłoka lakiernicza

1. WPROWADZENIE

Farby proszkowe są używane do tworzenia powłok ochronnych, które stają się coraz bardziej popularne ze względu na szereg zalet, co sprawia, że powszechnie stosuje się je w różnych branżach. Ich wysoka trwałość i odporność na uszkodzenia mechaniczne, a także wytrzymałość na działanie wielu substancji chemicznych pozwalają na zastosowanie powłok proszkowych w różnorodnych, wymagających środowiskach. Dodatkowo ekologiczność procesu lakierowania oraz efektywność kosztowa sprawiają, że popularność tej techniki rośnie błyskawicznie zarówno w Polsce, jak i na świecie [1].

Możliwość indywidualizacji podejścia do klientów lakierni proszkowych ma znaczący wpływ na rozwój tej technologii w wielu branżach przemysłu. Kluczowym aspektem dla każdej tego rodzaju instalacji pozostaje jednak efekt – jakość powłoki na produkcie. Uzyskanie wszystkich najlepszych jej cech możliwe jest tylko dzięki odpowiedniemu sposobowi przygotowania powierzchni lakierowanego elementu oraz parametrów procesu nanoszenia i utwardzania farb.

W dzisiejszych czasach ogromny nacisk kładziony jest na wprowadzanie na rynek rozwiązań przyjaznych dla środowiska. Światowe organizacje, w tym Unia Europejska, wprowadzają kolejne ustawy i restrykcje mające na celu ograniczenie zanieczyszczania wód i powietrza. Działania te przyspieszyły rozwój alternatywnych metod nanoszenia powłok lakierniczych, zastępując tradycyjne metody lakierowania ciekłego. W rezultacie nastąpił gwałtowny wzrost popularności lakierowania proszkowego, co jednocześnie znacząco podniosło finansową opłacalność tego rozwiązania [4, 7].

* adres korespondencyjny: kalaczynskit@pbs.edu.pl

Lakierowanie proszkowe polega na nakładaniu warstwy farby w postaci proszku na elementy, aby uzyskać pożądane walory estetyczne i użytkowe. Jednak farba proszkowa istotnie różni się od tej nakładanej mokro. Dostępne obecnie na rynku farby można podzielić na dwie kategorie, które różnią się w zależności od planowanego zastosowania farbowanej powierzchni. Wyróżnia się zatem farby, które w postaci gotowych powłok nie będą narażane na promieniowanie ultrafioletowe i warunki atmosferyczne oraz farby w pełni odporne.

Farby w postaci proszku można przypisać do dwóch kategorii:

- 1) farby oparte na żywicach epoksydowych oraz mieszkankach żywic poliestrowych i epoksydowych przeznaczone do użytku wewnątrz pomieszczeń. Nie są odpowiednie do stosowania na zewnątrz z uwagi na to, że żywica epoksydowa i pigmenty zawarte w farbie ulegają degradacji pod wpływem promieniowania ultrafioletowego. Dodatkowo wypełniacz obecny w farbie jest niewystarczająco odporny na warunki atmosferyczne. Wyjątkiem od tej reguły jest zastosowanie farb na bazie żywic epoksydowych do tworzenia grubowarstwowych powłok, np. na elementach zakopanych w ziemi;
- 2) farby na bazie żywic, takich jak: poliestrowe, akrylowe, poliuretanowe, oraz różne mieszanki wymienionych żywic, są przeznaczone do użycia w warunkach atmosferycznych. W praktyce ustalono dwa stopnie odporności na warunki atmosferyczne, zależnie od zastosowania: farby przemysłowe są przeznaczone do elementów mniej wymagających, takich jak meble ogrodowe, podczas gdy farby architektoniczne są stosowane na elementy bardziej ekspozowane i przeznaczone do długotrwałego użytkowania, np. metalowe okna.

Rodzaj farby oraz jej składniki znacząco wpływają na uzyskiwaną strukturę powierzchni podczas procesu lakierowania. Wśród najczęściej spotykanych można wyróżnić powłoki o różnych właściwościach – gładkie, o drobnej strukturze przypominającej gruboziarnisty papier ścierny, oraz o grubiej strukturze przypominającej skórę pomarańczy. Odpowiednia receptura farby powinna nie tylko dostarczać oczekiwanych efektów wizualnych, lecz także zapewniać równomierne pokrycie detali o skomplikowanych kształtach oraz jednolite rozrowadzenie się podczas procesu polimeryzacji [7].

2. METODY APLIKACJI POWŁOK LAKIERNICZYCH

Aplikowanie powłok powierzchniowych ma zapewnić, że zarówno ich cechy estetyczne i morfologiczne, jak i funkcjonalne będą zachowane. Zazwyczaj ma to na celu ochronę przed korozją chemiczną i mechanicznym zużyciem – tworzy się bariera ochronna dla metalicznego podłoża. Obecne metody nakładania polimerowych powłok opierają się na wykorzystaniu dwóch rodzajów powłok: ciekłych i proszkowych. Pierwsze z nich są zwykle наносzone za pomocą systemów natryskowych, które dają gładką i estetyczną powierzchnię, ale ich aplikowanie wymaga wysokich umiejętności i precyzji. Niestety trudno jest odzyskać nadmiar materiału, co także niesie ze sobą problem utylizacji niebez-

piecznych odpadów oraz konieczność korzystania z kosztownych i inwazyjnych środków ochrony osobistej dla operatorów. Tymczasem drugi rodzaj jest łatwiejszy do zastosowania, zapewnia wytrzymałą powłokę i może być używany w różnych technikach, takich jak: zanurzanie w gorącym proszku, natryskiwanie płomieniowe, formowanie lub elektrostatyczne natryskiwanie (zarówno pistoletem koronowym, jak i tryboelektrycznym). Aplikacja odbywa się wewnątrz kabin natryskowych, z możliwością odzyskania nadmiaru materiału, co poprawia wydajność procesu, jest prostsze i elastyczniejsze. Co więcej stosowanie suchych powłok lub powłok bez użycia rozpuszczalników przyczynia się do bardziej zrównoważonego i ekologicznie przyjaznego procesu, a także zapewnia większe bezpieczeństwo dla operatorów. Głównym problemem związanym z użyciem proszków jest występowanie efektu pomarańczowej skórki lub falistości powierzchni, co wpływa negatywnie na jakość i jednolitość polakierowanych produktów. To zjawisko wynika głównie z dużo większej lepkości proszku w porównaniu z płynną farbą, co utrudnia równomierne rozprowadzenie powłoki na powierzchni podłoża.

Pierwotna metoda nakładania powłok proszkowych polegała na wykorzystaniu złoża fluidalnego (FB), co oznaczało użycie dużego pojemnika na proszek otoczonego strumieniem powietrza (rys. 1). W tym pojemniku wstępnie podgrzewane próbki były zanurzane, co umożliwiało proszkowi przyleganie do nich, gdy były wyjmowane z pojemnika. Ten proces polegał na pokrywaniu elementów powłoką z proszku, który utwardzał się po kontakcie z powierzchnią. Metoda ta, nazywana zanurzaniem na gorąco (HD), pozwalała na pełne pokrycie elementów, nawet tych o skomplikowanych kształtach, i nadal jest wykorzystywana do nakładania grubszych warstw powłok, o grubości około 250–800 mikrometrów, przy zachowaniu wydajności transferu na poziomie około 100%. Kolejnym problemem było to, że powłoka miała nierówną grubość, z większą ilością proszku na powierzchniach wklęsłych i z mniejszą ilością na powierzchniach wypukłych, co wynikało z braku zdolności farby do równomiernego pokrywania różnych kształtów.

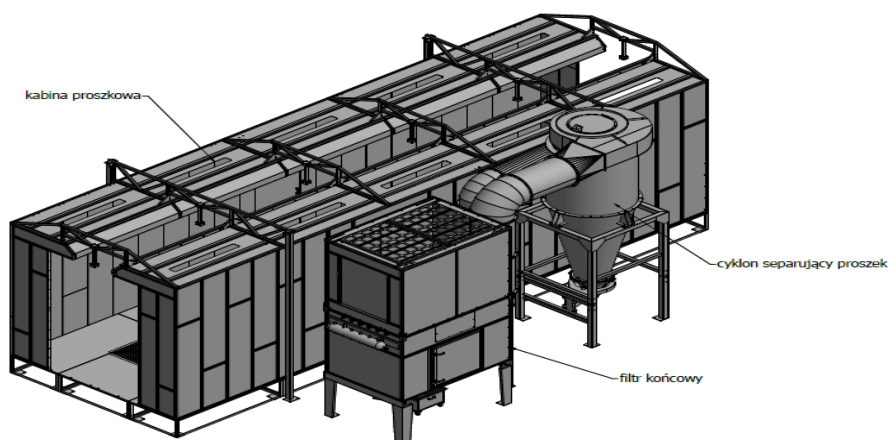
Obecnie nadal ta technologia jest preferowana w przypadku proszków termoplastycznych, takich jak polietylen i nylon, jednak w przypadku proszków termoutwardzalnych preferowane są systemy elektrostatyczne, które bazują na zjawisku korony elektrycznej [5, 6].

Elektrostatyczne nakładanie powłok zwykle polega na użyciu metody elektrostatycznego natryskiwania (ESD). Proces ten obejmuje przyłożenie wysokiego napięcia do elektrody pistoletu koronowego, a następnie uziemienie obiektu, który ma być pokryty powłoką. Tworzy to niejednorodne pole elektryczne pomiędzy pistoletem a powierzchnią, co powoduje, że proszki są przyciągane ku lakierowanemu elementowi dzięki dokładnej sile elektrostatycznej.

Alternatywą dla systemów natryskowych są elektrostatyczne złoża fluidalne, znane jako systemy FB, które opierają się na polu elektrostatycznym, a nie na działaniu ciepła, jak ma to miejsce w przypadku zanurzania na gorąco.

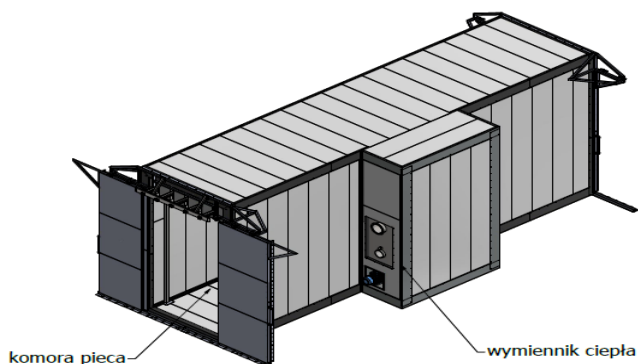
Mechanizm osadzania elektrostatycznego, czyli efekt koronowy, jest ograniczany przez dwa główne zjawiska, które wpływają negatywnie na estetykę i funkcjonalność powłoki. Po pierwsze, występuje jonizacja wsteczna, która powoduje powstawanie mikrokraterów na powierzchni, nadając jej efekt pomarańczowej skórki. Po drugie, efekt klatki Faradaya powoduje, że materiał osadza się nierównomiernie, tworząc grube warstwy we wgłębieniach i nierówne pokrycie. Jest to szczególnie problematyczne w przypadku skomplikowanych geometrii, które uniemożliwiają uzyskanie jednolitej, cienkiej powłoki o równomiernej grubości.

W praktyce przemysłowej próbuje się rozwiązać problem związany z jednolitością pigmentacji poprzez zwiększenie ilości proszku, jednak nadal prowadzi to do nierównego pokrycia powierzchni. Zwiększa to zużycie materiału powłokowego i sprawia, że proces jest nieskuteczny i wymaga ulepszeń. Niemniej jednak istnieją ograniczenia w osiągnięciu cienkich i jednolitych powłok. Powłoka płynna również nie jest w stanie zapewnić jednorodnej, cienkiej warstwy na elementach mechanicznych.



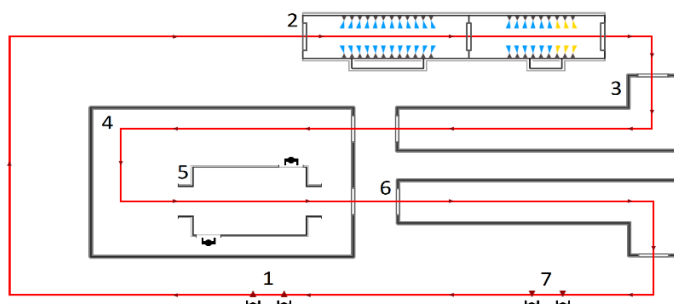
Rys. 1. Kabina proszkowa z cyklonem separującym i filtrem firmy Budrem Sp. z o.o. (opracowanie własne)

Bez względu na sposób aplikacji farba proszkowa musi być utwardzana poprzez działanie wysokiej temperatury, zwykle na poziomie około 200°C. Ten proces odbywa się w specjalnych piecach polimeryzacyjnych (rys. 2), w których zazwyczaj zastosowany jest system wentylacji rozmieszczony na całej długości pieca, zapewniający równomierne rozprzowanie ciepła od początku do końca fazy polimeryzacji oraz jednolitą temperaturę od góry do dołu detalu przeznaczonego do lakierowania. Temperatura w piecu polimeryzacyjnym jest stale kontrolowana i monitorowana przez czujniki, ponieważ wszelkie nieprawidłowości z nią związane mogą prowadzić do uszkodzeń na powłoce.



Rys. 2. Piec polimeryzacyjny firmy Budrem Sp. z o.o. (opracowanie własne)

Każdy z wymienionych elementów stanowi nieodłączną część zaawansowanej linii do lakierowania proszkowego. Najczęściej stosowany schemat linii, umożliwiający skuteczne wykonanie procesu nanoszenia powłoki proszkowej na elementy, zobrazowano na poniższym schemacie.



Rys. 3. Schemat ideowy linii do lakierowania proszkowego (opracowanie własne na podstawie [1])

Detal przeznaczony do lakierowania, już po wstępnej obróbce mechanicznej, jest zawieszany przez pracowników na specjalnie dostosowanych zawieszkach na początku linii (1). Produkty przemieszczają się po linii w sposób ciągły, dostosowany do ich wymiarów, z określoną prędkością posuwu. Na początku procesu detale trafiają do tunelu przygotowawczego, zwanego myjką (2), a następnie poddawane są kompletnemu osuszaniu w suszarce (3) za pomocą krążącego ciepłego powietrza w jej wnętrzu. Kolejnym krokiem procesu jest lakierowanie proszkowe w specjalnie przygotowanej kabine (5). Zazwyczaj znajduje się ona w wydzielonym pomieszczeniu, znanym jako *cleanroom* (4), w którym dzięki właściwej wentylacji, filtracji wprowadzanego powietrza oraz utrzymaniu stabilnych warunków temperaturowych, wilgotności i minimalnego stężenia pyłów w powietrzu osiągane są optymalne warunki pracy. Po naniesieniu warstwy proszku na detal konieczne jest jego stopienie i utwardzenie

w piecu polimeryzacyjnym (6), gdzie temperatura osiąga około 200°C, umożliwiając polimeryzację farby. Po wypaleniu farby gotowy produkt jest schładzany w drodze na pole odkładcze, gdzie pracownicy zdejmują go z zawieszek i przygotowują do opuszczenia malarni, np. umieszczając na palecie.

3. METODY OCENY PARAMETRÓW POWŁOK PROSZKOWYCH

Powłoka wykonana farbą proszkową, aby spełnić oczekiwane standardy, powinna charakteryzować się kilkoma kluczowymi cechami. Przede wszystkim powinna być odporna na lekkie uderzenia i zarysowania, co zabezpieczy element przed uszkodzeniami mechanicznymi w trakcie użytkowania. Kolor powinien prezentować jednolitą tonację, co jest istotne dla estetyki i profesjonalnego wyglądu wyprodukowanego elementu. Należy również zwrócić uwagę na grubość powłoki, która powinna być zgodna z zaleceniem producenta farby, standardowo mieszcząc się w przedziale od 50 do 160 mikronów. Ta odpowiednia grubość jest kluczowa dla utrzymania trwałości i właściwości ochronnych powłoki. Powierzchnia pokryta farbą proszkową nie powinna wykazywać żadnych zanieczyszczeń ani uszkodzeń. Dobrze przygotowana powłoka powinna być także solidnie połączona z wierzchnią warstwą elementu, co zapewnia trwałość i skuteczność ochronną. Dodatkowo ważne jest, aby farba nie ulegała rozpuszczeniu po przetarciu szmatką z rozpuszczalnikiem, co świadczy o jej stabilności i trwałości w różnych warunkach użytkowania. Kompletna i efektywna powłoka wykonana farbą proszkową powinna spełniać najwyższe standardy estetyczne, ochronne i wytrzymałościowe.

Metody oceny wyżej wymienionych parametrów są ustalane zgodnie z odpowiednimi standardami. Aby badanie mogło być uznane za wiarygodne, sposób jego przeprowadzenia oraz używane przyrządy powinny być zgodne z właściwą normą:

a) pomiar grubości powłoki – Norma PN-EN ISO 2808:2020-01:

- Mierniki mechaniczne oparte na zasadzie odrywania magnesu są wykorzystywane do pomiarów grubości powłok na powierzchniach stalowych. Zasada ta polega na tym, że grubość badanej powłoki wpływa na zmianę siły przyciągania stałego magnesu do powierzchni stalowej poprzez powłokę. Wartość grubości mierzonej powłoki jest odczytywana na skali w miejscu, gdzie wskazówka zatrzymuje się po oderwaniu stałego magnesu od powłoki badanej. Zakresy pomiarowe, w zależności od wersji, wynoszą od 20 µm do 20 mm. Ważną wadą tego rodzaju pomiarów jest stosunkowo duży błąd pomiaru, rzędu +/- (5 ... 15%) mierzonej wartości, oraz brak możliwości kalibracji.
- Mierniki elektroniczne, oparte na zasadzie indukcji magnetycznej, są używane do pomiarów grubości wszelkiego rodzaju nieferromagnetycznych powłok, takich jak lakiery, farby, tworzywa sztuczne, emalie, powłoki z gumy, ceramiczne i galwaniczne (z wyjątkiem niklu) na żelazie i stali. Ba-

dane próbki mogą przybierać różne kształty, a specjalnie dostosowane sondy pomiarowe umożliwiają pomiar grubości powłok na obiektach o różnych rozmiarach, takich jak rury, szczeliny czy pręty. Zakresy pomiarowe sond są również dostosowywane do indywidualnych potrzeb użytkownika.

- Zasada prądów wirowych jest wykorzystywana do pomiarów grubości izolacyjnych powłok na metalowych podłożach, które nie mają właściwości ferromagnetycznych. Analizowane powłoki mogą być wykonane z różnych materiałów, takich jak farba, plastik, emalia czy anodyzowane warstwy. W porównaniu z miernikami mechanicznymi mierniki elektroniczne mają dodatkowe funkcje. Oprócz pomiaru grubości powłoki umożliwiają przechowywanie odczytanych danych, ich statystyczną analizę oraz prowadzenie dokumentacji pomiarowej w formie wydruków wyników lub opracowań graficznych, takich jak historiogramy. Raporty mogą być wydrukowane na przenośnej drukarce lub bardziej kompleksowo po przeniesieniu danych do komputera.
- Mierniki ultradźwiękowe umożliwiają bezinwazyjny pomiar grubości powłok, takich jak farby, lakiery, plastiki i inne izolacyjne pokrycia, na różnorodnych podłożach, takich jak drewno, plastik, szkło, ceramika i inne, a także powłok polimerowych na metalu. Charakterystyczną cechą tych mierników jest zdolność pomiaru zarówno ogólnej grubości wielowarstwowej powłoki, jak i grubości poszczególnych warstw. Dodatkowo mierniki mogą współpracować zarówno z drukarkami, jak i komputerami.
- Mierniki ingerencyjne, oparte na zasadzie nacięć klinowych, są stosowane do pomiaru grubości powłoki farby na różnych podłożach, takich jak metal, drewno, plastik itp. Metoda ta jest również używana do odczytywania grubości poszczególnych warstw w wielowarstwowych powłokach. Proces nacięcia wykonuje się poprzez powłokę aż do podłoża za pomocą metalowego ostrza o określonym kącie pochylenia. Wbudowany mikroskop w mierniku umożliwia pośredni odczyt grubości powłoki.

b) pomiar twardości powłok, m.in.:

- Wahadło Persoza i Wahadło Koniga – Norma ISO 1522:2023-02:
Metody wahadłowe stanowią formę nieinwazyjnego pomiaru twardości powłok, takich jak farby, lakiery, plastiki itp., na płaskich powierzchniach próbek. Obejmują obie te metody, które bazują na wspólnej zasadzie, czyli używaniu wahadła podpartego kulistą powierzchnią do oceny twardości badanej powłoki. W zależności od stopnia twardości powłoki liczba wychyleń wahadła ulega zmianie w określonym zakresie. W przypadku powłok o większej twardości liczba wychyleń będzie większa. Różnice między tymi metodami wynikają z zastosowania różnych rozmiarów, wag i kształtów wahadeł, co przekłada się na odmienne okresy i zakresy wychyleń.
- Metody ołówkowe – Norma ASTM D3363-22:
Metody ołówkowe korzystają z cechy, którą jest pozostawianie śladu przez ołówek o twardości niższej niż twardość badanej powłoki. Procedura ta może być realizowana za pomocą zestawu ołówków o różnych twardościach (od 6B do 9H). W celu utrzymania stałych parametrów po-

miarowych ołówki mogą być umieszczone w wózkach z napędem ręcznym lub elektrycznym.

- Metoda nacięć – norma ISO 2815:

Pomiar opiera się na ocenie stopnia, w jakim narzędzie pionowo zagłębia się w badany materiał. Wyniki mogą być interpretowane na podstawie śladu pozostawionego przez narzędzie lub odczytywane bezpośrednio z wbudowanej skali przyrządu.

- Metoda zadrapań – norma ISO 1518:

Procedura polega na próbie wykonania rysy na badanej powłoce za pomocą specjalnych narzędzi, przy zachowaniu warunków określonych dla danego rodzaju testu. Stopień odporności na powstawanie rys określa twardość danej powłoki. Do realizacji tego rodzaju badań wykorzystywane są urządzenia CLEMEN, obejmujące wersje ręczne, z przekładnią oraz automatyczne.

c) pomiar połysku – norma ISO 2813:

- Połysk definiuje się jako ilość odbitego promienia świetlnego, a intensywność tego odbicia zależy od kąta, pod jakim promienie padają ze źródła światła, oraz od fizycznych cech analizowanej powierzchni. Powierzchnie o znacznym połysku odbijają większą część promieni pod kątem zbliżonym do kąta padania, podczas gdy powierzchnie matowe rozpraszają promienie, odbijając je pod różnymi kątami. Połyskomierze mogą być wyposażone w źródła światła emitujące promienie pod różnymi kątami, dostosowane do specyfiki badanej powierzchni.

Kąty pomiarowe:

- 20°: powierzchnie o wysokim połysku, lustrzane;
- 60°: powierzchnie normalne;
- 85°: powierzchnie matowe.

d) pomiar koloru – norma ISO 7724:

- Miernik umożliwia cyfrową identyfikację i porównywanie kolorów zgodnie z międzynarodowymi standardami, pozwalając na jednoznaczne ich rozróżnienie. Dzięki uzyskiwaniu powtarzalnych wyników miernik zapewnia stałość, co różni go od subiektywnej oceny wizualnej, podatnej na zniekształcenia w zależności od zmiennych warunków obserwacji. Po wczytaniu do pamięci miernika wybranych wzorców kolorów, zapisanych w formie danych liczbowych, podczas pomiarów kolejnych próbek uzyskuje się numeryczne wartości odchylenia od układów kolorymetrycznych. Urządzenie jest wyposażone w pamięć pomiarów oraz port umożliwiający przesyłanie danych do drukarki lub komputera. Programy komputerowe pozwalają na przetwarzanie zebranych danych od statystycznych analiz po analizy, które umożliwiają dobór składników kolorów.

e) badanie przyczepności powłok do podłoża:

- Metoda odrywowa – norma PN-ISO 4624:

Metoda ta jest używana do oceny przyczepności pojedynczej lub wielowarstwowej powłoki lakierowej, w tym farb i pokrewnych produktów, poprzez pomiar minimalnego naprężenia rozciągającego wymaganego do

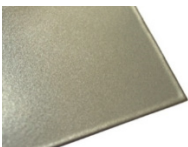
oderwania powłoki od podłoża. Proces pomiaru polega na określeniu siły odrywania, mierzonej poprzez oderwanie przyklejonych do powłoki stempli. Oderwanie może być przeprowadzane za pomocą urządzeń różnych rodzajów, m.in. ręcznych, hydraulicznych lub pneumatycznych. Wartość siły odrywania jest odczytywana na skali danego urządzenia. Naprężenie rozciągające generowane przez urządzenie powinno działać prostopadłe do podłoża i wzrastać z równomierną prędkością.

- Metoda siatki nacięć – norma PN-EN-ISO 2409:
Metoda ta jest wykorzystywana do porównywania wyników oraz przybliżonej oceny przydatności powłoki, którą można także szacować według zasady oceny jakości jako dobrą lub złą. Procedura obejmuje wykonanie równoległych nacięć specjalnym nożem. W wyniku tych nacięć uzyskuje się siatkę złożoną z 25 kwadratów. Wybór rodzaju noża (o rozstawie ostrzy) jest dostosowywany do grubości badanej powłoki. Ocenę wyglądu należy przeprowadzić po przeczesaniu powłoki pędzlem w obszarze nacięć, a także po próbie oderwania naciętej powłoki za pomocą taśmy klejącej.

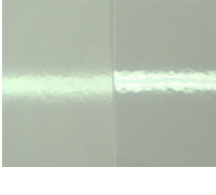
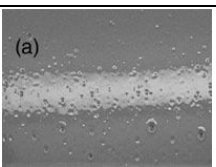
4. STUDIUM USZKODZEŃ POWŁOK LAKIERNICZYCH

Poniżej przedstawiono zestawienie typowych defektów powierzchni wraz z ich opisem oraz możliwymi przyczynami powstania.

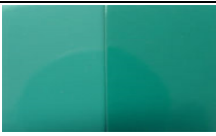
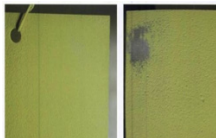
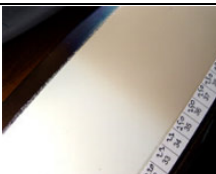
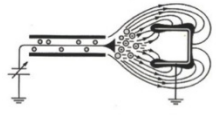
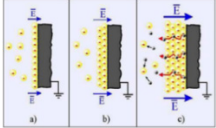
Tab. 1. Zestawienie typowych defektów powierzchni wraz z ich opisem oraz możliwymi przyczynami powstania (opracowane na podstawie [2, 3])

Rodzaj powstałego defektu	Opis defektu	Możliwe przyczyny powstania defektu	Przykład wady
Efekt ramki	Akumulacja farby w obszarach krawędzi i narożników	Nadmiernie gęsta mgła proszku Podczas lakierowania pistolet aplikacji przyłożony był zbyt blisko elementu	
Wtrącenia	Elementy obce i zanieczyszczenia w powłoce proszkowej w formie nierozpuszczonych grudek, które są widoczne po procesie utwardzania farby	Pył lub inne zanieczyszczenie na powierzchni przed lakierowaniem Zanieczyszczenia naniesione w piecu i wygrzane Zanieczyszczona farba proszkowa	

cd. Tab. 1

Zacieki	W trakcie procesu utwardzania mogą wystąpić smugi, jeśli farba na pionowych powierzchniach metalu charakteryzuje się niską lepkością	Za duża lepkość proszku podczas sieciowania powłoki Za gruba powłoka Za szybkie nagrzewanie elementu Zbyt wysoka temperatura w piecu	
Zmatowienie	Po procesie wygrzewania części stają się pozbawione połysku i mają mleczny kolor	Pomieszane farby o różnym składzie Akumulacja gazów w piecu Pozostałości środków chemicznych po przygotowaniu powierzchni	
Słabe krycie	Siła krycia określa, w jakim stopniu farba pokrywa powierzchnię lakierowaną	Za mała grubość powłoki proszkowej Wahania grubości powłoki na elemencie	
Rybie oczy	Występujące w lakierze okrągłe lub owalne wgłębienia, często osiagające głębokość do powierzchni elementu nazywane popularnie „rybimi oczami”	Nakładanie zawilgoconej farby proszkowej Błędy w przygotowaniu powierzchni Wilgotna powierzchnia elementu Pozostałości wosku, silikonu lub oleju na powierzchni	
Igiełkowanie	Po zastosowaniu lakieru na powierzchni elementów można zauważyć liczne, małe wgłębienia, zwłaszcza przy większej grubości powłoki	Za gruba powłoka Zawilgocona farba proszkowa Wilgoć na powierzchni elementu Niewłaściwie oczyszczony detal podczas przygotowania powierzchni	
Korozja	Stopniowy proces degradacji materiału wynikający z oddziaływań między materiałem a otoczeniem, przede wszystkim poprzez działanie wody, tlenu lub substancji chemicznych	Uszkodzenia powłoki, takie jak igiełkowanie, kratery Za duża agresywność środowiska Zbyt słaba ochrona przed korozją Błędy w przygotowaniu powierzchni Za cienka powłoka Za słabo wypalona powłoka	

cd. Tab. 1

Niepowtarzalność koloru	Różnice kolorystyczne między polakierowanymi elementami	Różnica w grubości powłoki Różnica w czasie lub/i w temperaturze utwardzania powłoki	
Przyleganie farby	Rozsypywanie się proszku w kabinie lakierniczej i brak przyczepności do lakierowanego elementu podczas aplikacji. Defekt widoczny jest poprzez nierównomierną grubość powłoki oraz nieregularną strukturę powierzchni	Za małe uziemienie, np. zabrudzone farbą wieszaki elementów Źle ustawiony pistolet Za duży udział odzyskanej przez cyklon farby z poprzedniego lakierowania w mieszance Zły typ farby do używanego rodzaju nanoszenia powłoki Za duży udział drobnych frakcji farby w nakładanej powłoce	
Żółknięcie	Dotyczy farb o kolorze białym W przypadku polakierowanych elementów, w porównaniu ze wzorcem, obserwuje się większe nasilenie koloru żółtego	Za duża temperatura lub zbyt długi proces utwardzania Różnica w grubości powłoki Niewystarczająco odtłuszczona powierzchnia elementu	
Efekt klatki Faradaya	Brak przenikania farby w zagłębienia lub wewnętrzne zagłębienia lakierowanego podłoża	Zbyt wysokie napięcie na pistolecie Zły kąt nanoszenia powłoki	
Różnice w połysku	Elementy pokryte lakierem charakteryzują się różnym stopniem połysku w porównaniu z panelem referencyjnym	Błędy w procesie sieciowania powłoki – przegrzane lub niedogrzone elementy	
Wsteczna jonizacja	Zjawisko wstecznej jonizacji pojawia się jako rodzaj zakłóceń w przepływie farby na wygrzanej powłoce. Ten problem jest szczególnie zauważalny w narożnikach i na krawędziach lakierowanych elementów, przybierając formę igiełkowania	Zbyt wysokie napięcie na pistolecie Za gruba powłoka Lakierowanie pistoletem zbyt blisko elementu	

cd. Tab. 1

Skórka pomarańczowa	Powierzchnia o chropowatym wyglądzie, przypominająca strukturą skórę pomarańczy	Nieodpowiednia grubość powłoki Zbyt powolne ogrzewanie w piecu Wady w składzie farby proszkowej Złe ustawienia pistoletu	
Słaba odporność chemiczna	Niedostateczna odporność chemiczna może przejawiać się poprzez matowienie, zwiększoną podatność na zarysowania lub miękkość powłoki, która reaguje na kontakt z różnymi substancjami chemicznymi	Niedostateczne wygrzanie w piecu Zastosowanie farby nieodpornej na wymagane środowisko	
Uszkodzenia mechaniczne	Pęknięcia w powłoce lakierniczej powstałe w wyniku uderzenia lub cięcia	Błędy w przygotowaniu powierzchni Niedostateczne utwardzenie powłoki Za gruba warstwa farby proszkowej	

5. PODSUMOWANIE

Każdy etap procesu lakierowania proszkowego niesie ze sobą specyficzne zagrożenia, które mają potencjalność wpływania na jakość ostatecznej powłoki proszkowej na detalu. Począwszy od fazy projektowania elementu, poprzez odpowiednią selekcję technologii przygotowania powierzchni, na precyzyjnie przeprowadzonej aplikacji farby proszkowej kończąc – każdy krok odgrywa kluczową rolę w osiągnięciu pożądanego rezultatu. Nawet niewielki błąd popełniony w dowolnym z tych procesów może wpłynąć na efekt końcowy.

W trakcie projektowania konstruktor powinien uwzględnić metodę nanoszenia powłoki, dążąc do jak największego uproszczenia detalu w celu ułatwienia poprawnego nałożenia powłoki. Na przykład przy zakładanym zastosowaniu technologii elektrostatycznego nanoszenia farby proszkowej ważne jest, aby projektować elementy w sposób możliwie uproszczony. Skomplikowane detale o trójwymiarowych kształtach z wewnętrznymi zagłębieniami stanowią ryzyko wystąpienia tzw. klatki Faradaya, która może rozpraszać pole elektromagnetyczne, utrudniając prawidłowe nałożenie powłoki proszkowej. Czasem niewielkie modyfikacje w kon-

strukcji, które nie wpływają na funkcjonalność ostatecznego produktu, mogą skutecznie zminimalizować lub całkowicie wyeliminować te problemy.

Nanoszenie powłoki na ostudzony element i utwardzanie farby w piecu polimeryzacyjnym to dwa kluczowe etapy procesu. Najwyższą wagę przywiązuje się do utrzymania czystości w miejscu przeprowadzania operacji – na oczyszczonej powierzchni elementu łatwo mogą osiadać różne cząsteczki pyłów i kurzu unoszące się w powietrzu, co może prowadzić do powstania skazy na powierzchni. Przepięcia i niekontrolowane powiewy mogą również zdmuchnąć nałożoną farbę. Wysoka wilgotność powietrza stanowi kolejny czynnik, który może negatywnie wpłynąć na ostateczną jakość powierzchni, ponieważ wilgoć utrudnia prawidłowe związanie farby z powierzchnią. W celu ułatwienia kontroli warunków w obszarze nanoszenia powłok coraz częściej tworzone są dedykowane pomieszczenia, znane jako *cleanroom*, w których dokładnie reguluje się strumień powietrza.

Kolejnym istotnym aspektem są właściwe ustawienia aplikatora, takie jak napięcie ładowania, ciśnienie powietrza i wydatek napylanej farby. Wszystkie te parametry muszą być zgodne z zaleceniami producenta lakierowanej farby. Dodatkowo konieczne jest odpowiednie uziemienie detalu – zawieszki muszą być czyste, aby umożliwić swobodny przepływ jonów.

Sieciowanie powłok farb proszkowych na elemencie wymaga, aby w piecu również nie znajdowały się żadne lotne związki zanieczyszczeń. Proces utwardzania powłoki powinien odbywać się zgodnie z określonymi parametrami czasu i temperatury, które są podane w kartach technicznych używanej farby proszkowej. Ważne jest monitorowanie grubości powłoki oraz dostosowanie temperatury i czasu sieciowania do pożądanej grubości. Znaczące jest również odpowiednie ustawienie nawiewu ciepłego powietrza, tak aby podmuchy nie zwiewały proszku z elementów, a temperatura w każdym miejscu w piecu była maksymalnie do siebie zbliżona, żeby zachować równomierność procesu polimeryzacji. Po zakończeniu sieciowania element konstrukcyjny powinien być schładzany na specjalnym wózku technologicznym, gdzie swobodny obieg powietrza pełni funkcję chłodzącą. Należy unikać chłodzenia elementu w cieczach oraz stosowania szoków termicznych, ponieważ może to prowadzić do uszkodzenia powierzchni powłoki i negatywnie wpływać na jej jakość [2, 3].

W związku z powyższym istnieje konieczność realizacji procedury oceny stopnia przygotowania powierzchni elementów do lakierowania proszkowego, który wpływa na jakość i trwałość powłok.

LITERATURA

- [1] Huang J., Yang M., Wan L., Tang K., Zhang H., Chen J., Noël J.J., Barker I., Zhang H., Zhu J., 2023. Ultrafine powder coating: Smooth surface, dense structure and enhanced corrosion resistance. *Chemical Engineering Journal* 455.

- [2] Powder Coating Institute, 1994. Powder Coating. The Complete Finisher's Handbook 3rd Edition.
- [3] Powder Coating Institute, 2021. Powder Coating. The Complete Finisher's Handbook 5th Edition.
- [4] Richtering W., 2001. Polymer coatings: powder-based. Encyclopedia of materials: science and technology. Elsevier, Oxford.
- [5] Rubino G., Venettacci S., 2023. Advances in powder coating of metal components: A case study for wire die springs. *Journal of Manufacturing Processes* 101, 1257–1274.
- [6] Teknos Oy, 2012. Podręcznik ochrony przeciwkorozyjnej powierzchni stalowych z zastosowaniem systemów malarskich.
- [7] Zalewska A., Kowalik J., 2016. Wpływ metody aplikacji i rodzaju podłoża na właściwości ochronne powłok z farb proszkowych. Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz.

METODA DOBORU ŚRODKÓW TECHNICZNYCH DO SYSTEMÓW LOGISTYCZNYCH

Bogdan Landowski*, Paweł Frączczak

Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska

Streszczenie. Prezentowana w opracowaniu problematyka obejmuje zagadnienia zarówno bezpieczeństwa środków transportu, jak i zarządzania wiedzą o eksploatacji środków transportu. Istotnym problemem dla decydentów przedsiębiorstw jest dobór właściwych dla specyfiki przedsiębiorstwa urządzeń technicznych wykorzystywanych w procesach roboczych. W pracy przedstawiono założenia metody doboru środków technicznych do systemów logistycznych na przykładzie doboru wózków jezdniowych podnośnikowych dostosowanych do określonego rodzaju magazynu. W celu zilustrowania rozważań przedstawiono przykład jej zastosowania. Przedstawiony sposób postępowania ma na celu ułatwić dobór właściwego, w świetle analizowanych kryteriów, rozwiązania odnośnie do wózków jezdniowych podnośnikowych do zastosowania w istniejących oraz powstających czy projektowanych systemach logistycznych.

Słowa kluczowe: dobór urządzeń, wózek jezdniowy podnośnikowy, transport bliski, system logistyczny, magazyn

1. WPROWADZENIE

Prezentowana problematyka obejmuje zagadnienia zarówno bezpieczeństwa środków transportu, jak i zarządzania wiedzą o eksploatacji środków transportu.

Jednym z problemów związanych z bezpieczną i efektywną realizacją procesów obsługiwanego oraz odnowy środków transportu jest właściwy dobór urządzeń technicznych do systemu, w którym realizowane są te procesy. Dotyczy to zarówno narzędzi, systemów diagnostycznych, urządzeń wspomagających realizację prac, jak i środków transportu wewnętrznego.

Istotnym problemem dla decydentów przedsiębiorstw jest dobór właściwych dla specyfiki przedsiębiorstwa urządzeń technicznych wykorzystywanych w procesach roboczych.

Na rynku istnieje wiele rozwiązań urządzeń i systemów stosowanych w procesach logistycznych w szerokim zakresie cen, funkcji i możliwości ich wykorzystania. W opracowaniu przedstawiono analizę metod oceny i wyboru tego typu systemów oraz zaproponowano implementację metody subiektywno-punktowej do analizy tego typu problematyki.

W pracy przedstawiono metodę analizy oraz doboru środków technicznych do szeroko rozumianego systemu logistycznego. Rozważania zilustrowano na przykładzie wózków jezdniowych podnośnikowych.

* adres korespondencyjny: bogdan.landowski@pbs.edu.pl

Norma PN-ISO 5053 wskazuje następujące kryteria klasyfikacji wózków jezdniowych podnośnikowych [9]:

- sposób działania,
- źródło napędu,
- typ kół,
- sposób kierowania,
- wysokość podnoszenia,
- sposób poruszania się.

Można wyróżnić następujące typy wózków jezdniowych podnośnikowych, skategoryzowanych według źródła napędu [9]:

- wózki z silnikiem spalinowym:
 - wózki z silnikiem benzynowym,
 - wózki z silnikiem na gaz płynny (LPG),
 - wózki z silnikiem na gaz płynny (LPG)/benzynę,
 - wózki z silnikiem o zapłonie samoczynnym;
- wózki z napędem elektrycznym:
 - wózki z napędem akumulatorowym,
 - wózki z zewnętrznym źródłem zasilania;
- wózki z silnikiem spalinowo-elektrycznym.

2. ANALIZA ISTNIEJĄCYCH METOD DOBORU URZĄDZEŃ DO SYSTEMU

Metody oceny urządzeń technicznych i optymalizacji ich doboru do konkretnego przedsięwzięcia z uwzględnieniem specyfiki działania rzeczywistego systemu eksploatacji obiektów technicznych można podzielić na dwie zasadnicze grupy:

- metody obiektywne oparte na zadaniach optymalizacji matematycznej,
- metody subiektywne oparte na analizie obranych kryteriów z przypisaniem im odpowiednich wag.

Decydent dokonuje *quasi*-optymalnego wyboru urządzeń i systemów technicznych spośród wielu możliwych rozwiązań z uwzględnieniem, często wzajemnie sprzecznych, kryteriów doboru. W praktyce decydent buduje tabelę zestawieniową wspólną dla różnych rozwiązań analizowanych systemów z wszystkimi danymi „za” i „przeciw” mającymi wpływ na wybór danego rozwiązania i dokonuje hierarchizacji systemów w świetle przyjętego układu kryteriów wyboru [7].

Powszechnie przyjmuje się ogólne zasady, które muszą być zawsze uwzględniane przy doborze urządzeń. Są to [7]:

- funkcjonalność,
- niezawodność i trwałość,
- sprawność,

- koszty zakupu i wdrożenia,
- koszty eksploatacji, w tym koszt i dostępność materiałów eksploatacyjnych,
- łatwość eksploatacji,
- ergonomiczność,
- zgodność z obowiązującymi normami i przepisami.

Powszechnie używanymi metodami przydatnymi przy wyborze są metody liniowe oraz metody relacyjne.

Pierwszą grupę tworzą hierarchiczne metody liniowe. Jedną z metod należących do tej grupy jest metoda rangowania, inaczej nazywana metodą punktową. W ocenie jakości zajmuje ona szczególne miejsce, bowiem ujmuje wszystkie oceniane oddzielnie cechy obiektu w jedną liczbę, która kompleksowo wyraża jakość ogólną badanego obiektu [10].

Bazuje ona na swoistej hierarchii elementów systemu oraz ich odległości od wielkości maksymalnie możliwej do uzyskania. Ocena następuje w wyniku przyjęcia określonej skali. Hierarchię charakteryzuje uporządkowany w sposób rosnący lub malejący szereg wskazujący na stopień realizacji kryterium globalnego, obejmującego wszystkie podkryteria. Dodatkowymi zaletami są prosta, zrozumiała dla wszystkich konstrukcja, krótki czas realizacji oraz niskie koszty badania [7].

Wyróżnia się rangowanie jednokryterialne i wielokryterialne. Polegają one na ustaleniu znaczenia analizowanego systemu w zbiorze analizowanych systemów, ze względu na ustalony zbiór kryteriów.

Skale punktowe łączą zalety skal werbalnych i skal liczbowych. Każdy punkt skali ma umowne liczby oraz odpowiadające im określenie (lub określenia) słowne. Precyzja uzyskanych wyników zależy od poprawnego zdefiniowania poszczególnych poziomów jakości i jest to pierwszy warunek, aby uzyskać poprawne wyniki. Drugim warunkiem jest wyszkolenie zespołu oceniającego, pozwalające na jednoznaczne rozumienie definicji poszczególnych cech obiektu. Definicje nie mogą zawierać pojęć o charakterze emocjonalnym i zbyt ogólnym [1].

Poprawnie skonstruowana skala punktowa powinna spełniać warunki [10]:

- każdy stopień skali powinien odpowiadać odmiennemu poziomowi jakości uchwytnemu dla oceniającego;
- każdemu punktowi skali (czyli każdemu poziomowi jakości) powinna odpowiadać jednoznaczna definicja jakości;
- liczba punktów skali powinna być ograniczona i nie powinna przekraczać 11 stopni, a dla seryjnych, rutynowych oznaczeń zalecana jest skala pięciopunktowa;
- wszystkie cechy powinny być oceniane na skali o jednakowej liczbie punktów.

Wynikiem metody punktowej jest uszeregowanie badanych systemów z punktu widzenia stopnia spełnienia wymagań. Do istotnych korzyści tej metody zalicza się: odporność na wysokie różnice w obserwacjach, możliwość porównań cech ilościowych, jakościowych i wartościowych jednocześnie oraz

względna łatwość interpretacji. Metoda punktowa stosowana jest w wielu dziedzinach [7].

Drugą grupą są metody relacyjne, do których należy metoda AHP (*Analytic Hierarchy Process*). Zgodnie z tą metodą wyróżnia się dwa etapy przygotowania: hierarchicznie nadrzędne wyznaczenie względnej dominacji kryteriów, uzyskanych z porównania parami oraz obliczenie względnej dominacji poszczególnych systemów ze względu na kolejne kryteria i jeden analityczny. Ten ostatni etap to obliczenie ocen syntetycznych porządkujących systemy oraz analiza i interpretacja wyników [7].

W myśl tej metody przyjmuje się na ogół uproszczoną (licząc co dwie przedziałki) skalę ocen Likerta od 1 do 9. Zgodność ocen w porównaniu parami jest kontrolowana przez współczynnik niespójności. Można mówić o użyteczności metody AHP, gdy w badaniu występuje hierarchia kryteriów oceny, reprezentująca różny poziom szczegółowości, związana z hierarchią celów lub oczekiwanych korzyści, gdy dane do analizy mają charakter jakościowy, a nie tylko ilościowy, oceny są subiektywnym punktem widzenia osoby przeprowadzającej analizę, a warianty muszą należeć do tej samej klasy, ze względu na pełną porównywalność. Metoda jest trudna do stosowania przez oceniających i bardzo pracochłonna, relatywizm pomiędzy czynnikami ilościowymi a jakościowymi czasem bardzo trudny do uchwycenia i zmuszający do dodatkowych działań [1].

O ile jednak w metodach punktowych wystawia się ocenę, biorąc pod uwagę własne odczucia co do stopnia realizacji danej cechy kryterium w obiekcie w oderwaniu niejako od innych obiektów, to w metodach relacyjnych bierze się głównie pod uwagę zróżnicowanie jej realizacji w poszczególnych obiektach. Gdy stosuje się metody punktowe, relacje pomiędzy kryteriami mogą być narzucane zewnątrz w postaci wektora preferencji, w przypadku metod relacyjnych są obliczane też jako wektor preferencji z macierzy dominacji. Istnieje więc wiele podobieństw pomiędzy analizowanymi metodami, jednak interpretacja wyników metody AHP jest znacznie trudniejsza. Żadna też nie bierze pod uwagę zależności korelacyjnych pomiędzy kryteriami [1].

Z analizy metod wyboru można wyciągnąć następujące wnioski (tab. 1):

- metoda punktowa, chociaż subiektywna, nawet przy dużej ilości kryteriów oraz tradycyjnej liniowej skali punktowej jest oceniana jako racjonalna i łatwa w zastosowaniach praktycznych. Po uwzględnieniu skali preferencji stwierdzono, że wrażenie subiektywizmu i równoważności definitywnie różnych kryteriów nie jest aż tak znaczące;
- w przypadku metody AHP pojawia się wiele trudności, gdy wystąpi konieczność porównania wielu systemów i przy zastosowaniu wielu kryteriów. Często pierwsze oceniane systemy uzyskują w stosunku do następnych lepsze oceny. Ocena może być niejednoznaczna ze względu na jej relatywizm i rozciągnięcie skali Likerta. Pracochłonność tej metody rośnie w porównaniu z metodą punktową wykładniczo w stosunku do ilości wykorzystywanych kryteriów oceny oraz ilości branych pod uwagę systemów [1].

Tab. 1. Ocena możliwości wykorzystania metod doboru urządzeń [11]

Cecha charakterystyczna	Metoda punktowa	Metoda AHP
Łatwość zastosowania	Wysoka	Niska
Łatwość nauczania się	Wysoka	Niska
Łatwość dokonania obliczeń	Wysoka	Wysoka przy dysponowaniu odpowiednim oprogramowaniem
Obiektywizm	Niski	Wysoki
Interpretacja wniosków	Wysoka	Średnia

3. METODA DOBORU ŚRODKÓW TECHNICZNYCH DO SYSTEMÓW LOGISTYCZNYCH

Na podstawie rodzaju magazynu można określić wstępnie, w której grupie urządzeń transportu bliskiego należy poszukiwać rozwiązania, które zaspokoi podstawowe wymagania w zakresie transportu wewnętrznego dla uwarunkowań wynikających z typu posiadanej lub projektowanej infrastruktury magazynowej.

Pierwszym krokiem jest określenie rodzaju zasilania urządzenia transportu bliskiego. Można wskazać następujące zalecenia [2]:

- w przypadku magazynów specjalnych zalecanym wyborem są wózki podnośnikowe o napędzie elektrycznym;
- w przypadku magazynów zamkniętych preferowanym wyborem są wózki o napędzie elektrycznym z możliwością dopuszczenia urządzeń o napędzie hybrydowym i spalinowym, co jednak nie jest wskazane; dla rozwiązań o napędzie spalinowym oraz hybrydowym konieczne jest uwzględnienie jakości oraz wydajności systemów wentylacyjnych;
- dla magazynów półotwartych i otwartych wybór dowolny; należy jednak mieć na uwadze sezonowość pracy magazynu – dla magazynów całorocznych zalecany wybór rozwiązań z silnikiem spalinowym zasilanym LPG (na ogół niższe koszty eksploatacji).

W kolejnym wstępnym etapie doboru urządzenia dla magazynów otwartych i półotwartych należy uwzględnić rodzaj podłoża miejsca pracy. Dla podłoża betonowego, asfaltu, kostki brukowej, płyt chodnikowych nie ma istotnych ograniczeń zawężających pole wyboru rozwiązań dopuszczalnych. Dla magazynów z podłożem wykonanym z ubitego żwiru lub będącym ubitym gruntem zalecane są rozwiązania wyposażone w koła z ogumieniem.

Szerokości dróg manewrowania, w tym np. szerokości korytarzy między regałami, również wpływają na dobór rodzaju analizowanego urządzenia. Ma to znaczenie głównie dla magazynów zamkniętych i specjalnych: dla magazynów o wąskich korytarzach nieprzekraczających 2500 mm należy rozważyć rozwiązania wózków jezdniowych podnośnikowych bocznych i czołowo-bocznych. Dla magazynów o znacznie szerszych korytarzach często przekraczających 4 m szerokości nie ma istotnych ograniczeń w tym zakresie [2].

Analizując dostępne na rynku konstrukcje wózków jezdniowych podnośnikowych w celu ich doboru do konkretnych zastosowań i ograniczenia szczegółowej analizy wszystkich rozwiązań, należy również uwzględnić charakterystykę ładunków, które będą podlegały procesom manipulacyjnym realizowanym w magazynach, i wymiary magazynów. Zawężając przestrzeń rozważanych rozwiązań, należy brać pod uwagę między innymi wymiary i masę ładunków oraz wysokość składowania.

Przedstawiona metoda jest implementacją metody subiektywno-punktowej.

Ze względu na ograniczoną objętość opracowania w dalszej części pracy przedstawiono kilka wybranych kryteriów (cech, wskaźników) dotyczących magazynu i ładunku.

Wartości poszczególnych współczynników (kryteriów) i ocen zawierają się w przedziale od 1 do 10.

Dla poszczególnych kryteriów (cech) wyznaczono wartości minimalne, jakie oceniane rozwiązania wózków jezdniowych podnośnikowych muszą spełniać dla danego rodzaju magazynu i przyjętych założeń. Nazwano je współczynnikami.

Przyjęte minimalne wartości analizowanych współczynników dla poszczególnych kryteriów (cech) mają charakter ilustracyjny i są uzależnione od preferencji i oczekiwań decydentów. Dla przykładu kryteria prestiżu marki oraz ceny zakupu i kosztów eksploatacji danego rozwiązania w dużej mierze zależą od oczekiwań decydentów i nie wpływają na ocenę pod względem technicznym danej konstrukcji.

W przypadku magazynów otwartych oraz półotwartych przy doborze wózków jezdniowych podnośnikowych zazwyczaj występują podobne wymagania oraz oczekiwania względem poszukiwanego urządzenia. Poniżej zaprezentowano kryteria oraz wartości współczynników dla oceny wariantów wózków, mające na celu ułatwienie podejmowania decyzji dotyczącej doboru urządzeń do danego systemu logistycznego [2].

Dla magazynów otwartych, jak i półotwartych istotnym parametrem jest rodzaj podłoża, które bezpośrednio przekłada się na wymóg doboru odpowiednich rozwiązań dotyczących rodzaju zastosowanych kół i ogumienia. Przyjęto następujące wartości zastosowanych współczynników liczbowych dla zastosowanego podłoża w magazynie [2]:

- nawierzchnia betonowa, asfaltowa, kostka brukowa – współczynnik: 3 (koła z oponami superelastycznymi),
- nawierzchnia z ubitego tłucznia – współczynnik: 6 (koła z oponami pneumatycznymi),
- nawierzchnia z ubitego gruntu – współczynnik: 9 (koła z oponami pneumatycznymi dodatkowo wózek wyposażony w system amortyzacji).

Kolejną cechą (wskaźnikiem, kryterium) analizowaną w przypadku prezentowanej metody jest masa ładunku [2]:

- do 1000 kg – współczynnik 4,
- od 1001 do 1500 kg – współczynnik 4,5,

- od 1501 do 2000 kg – współczynnik 5,
- od 2001 do 2500 kg – współczynnik 5,5,
- od 2501 do 3000 kg – współczynnik 6,
- od 3001 do 3500 kg – współczynnik 6,5,
- od 3501 do 4000 kg – współczynnik 7,
- od 4001 do 4500 kg – współczynnik 7,5,
- od 4501 do 5000 kg – współczynnik 8,
- od 5001 do 5500 kg – współczynnik 8,5,
- od 5501 do 6000 kg – współczynnik 9,
- powyżej 6000 kg – współczynnik 10.

Ostatnim kryterium poddanym analizie jest wysokość docelowego składowania ładunku, dla którego przyjęto następujące wartości współczynników do oceny rozwiązań [2]:

- do 1500 mm – współczynnik 1,
- od 1501 do 3000 mm – współczynnik 2,
- od 3001 do 4500 mm – współczynnik 3,
- od 4501 do 6000 mm – współczynnik 4,
- powyżej 6000 mm – współczynnik 5.

Kryteria przedstawione powyżej są warunkami koniecznymi do spełnienia w przypadku doboru wózka jezdniowego podnośnikowego celu zapewnienia jego poprawnej pracy. W przypadku magazynu, w którym występuje więcej rodzajów nawierzchni, należy przyjąć wariant mniej korzystnej nawierzchni, tzn. stawiającej wyższe wymagania dla wózka. Dla proponowanej metody to wariant o wyższej wartości współczynnika.

Dla systemów logistycznych, w przypadku których zarówno dla kryterium masy ładunku, jak i wysokości składowania przyjęto najwyższe wartości współczynników, należy uwzględnić częstotliwość obsługi takich ładunków oraz ich udział procentowy w całym procesie magazynowym całej jednostki organizacyjnej. Na podstawie wyników takiej analizy należy rozważyć możliwość i celowość zastosowania różnych rozwiązań w zależności od masy ładunku i wysokości składowania lub zastosowania także innych specjalizowanych rozwiązań.

W kolejnym kroku należy uwzględnić pozostałe założenia dotyczące zapotrzebowania systemu logistycznego. W przypadku gdy dany czynnik, cecha czy warunek nie występują, należy je pominąć. Dla przykładu wprowadzono kryteria związane z ergonomią i bezpieczeństwem.

Przyjęto dla wyposażenia wózka w urządzenia i systemy bezpieczeństwa operatora wartość współczynnika bazowego na poziomie 3. W przypadku występowania większej liczby rozwiązań wpływających na bezpieczeństwo operatora należy do oceny urządzenia dodać wartość 1 za każdy dodatkowy system.

Dla urządzeń i systemów bezpieczeństwa ładunku przyjęto 3 jako wartość bazową współczynnika. W przypadku występowania większej liczby rozwiązań

wpływających na bezpieczeństwo ładunku należy do oceny urządzenia dodać wartość 1 za każdy dodatkowy system.

Dla wyposażenia analizowanego obiektu technicznego w inne urządzenia i systemy bezpieczeństwa, w tym czujniki obecności i pozycji operatora w obiekcie, zabezpieczenia przed nieautoryzowanym uruchomieniem systemu stabilizacji wózka itp., przyjęto 2 jako wartość współczynnika bazowego. Dla każdego z kolejnych rozwiązań oferowanych w wózku jezdniowym, które uznaje się za istotne, należy dodać wartość 1.

W analogiczny sposób można uwzględnić inne cechy analizowanej konstrukcji i ich wagę w ocenie całościowej danego rozwiązania, np. [2]:

- wyposażenie obiektu technicznego w inne urządzenia dodatkowe mogące pośrednio lub bezpośrednio wpływać na bezpieczeństwo i ergonomię pracy operatora lub bezpieczeństwo ładunku oraz efektywność realizacji procesów logistycznych (dodatkowe oświetlenia, ergonomiczne stanowisko operatora, prędkość podnoszenia, systemy wizyjne itp.) – współczynnik bazowy na poziomie 2. Dla każdego kolejnego dodatkowego rozwiązania należy dodać 0,5;
- preferencje dotyczące marki urządzenia i/lub kraju pochodzenia producenta – przyjęto wartość współczynnika na poziomie 4,
- cena i koszty eksploatacji – przyjęto wartość współczynnika na poziomie 1 dla każdego obniżenia wartości oszacowanych kosztów o 10% od wartości średniej dla analizowanych rozwiązań.

Dla przyjętych założeń można zbudować przykładową tabelę (tab. 2) minimalnych wymogów stawianych przez system logistyczny w zakresie obsługi magazynu otwartego dla wózków jezdniowych podnośnikowych.

Tab. 2. Przykładowa tabela wymogów magazynu otwartego dla wózków jezdniowych podnośnikowych (opracowanie własne na podstawie [2])

Podłoże magazynu	Wysokość składowania	Masa składowanego ładunku	Bezpieczeństwo ładunku	Bezpieczeństwo operatora	Łączna ocena
Nawierzchnia betonowa	do 1,5 m	do 3000 kg	Wymagane	Wymagane	
3	1	6	3	3	16
Rodzaj kół	Wysokość unoszenia	Udźwig	Systemy bezpieczeństwa ładunku	Systemy bezpieczeństwa operatora	

Dla rozwiązania magazynu otwartego łączna wartość z wyznaczonych współczynników wynosi 16.

W podobny sposób można zbudować układy kryteriów i minimalne wartości współczynników oceniających stopień spełnienia kryterium dla innych rodzajów magazynów.

Magazyny zamknięte w odróżnieniu od magazynów otwartych i półotwartych nie wymagają tak restrykcyjnego podejścia do kwestii rodzaju nawierzchni, która przekłada się na konieczność zwrócenia uwagi na rodzaj zastosowanych kół w wózku. W przypadku magazynów zamkniętych również występuje możliwość zastosowania urządzeń wyposażonych w napędy spalinowe odpowiednio przystosowane do pracy w zamkniętych przestrzeniach. Nie jest to zalecane, nawet w sytuacji gdy w magazynie zastosowane są odpowiednie systemy wentylacji. Dla tej kategorii magazynów istotne do przeprowadzenia analizy jest kryterium dotyczące szerokości korytarzy pracy. Sposób oceny tej cechy realizowany jest podobnie jak dla wysokości podnoszenia. Dla przykładu można uwzględnić następujące wartości współczynników [2]:

- powyżej 5000 mm – współczynnik 1,
- od 4501 do 5000 mm – współczynnik 2,
- od 4001 do 4501 mm – współczynnik 3,
- od 3501 do 4000 mm – współczynnik 4,
- od 3001 do 3500 mm – współczynnik 5,
- od 2501 do 3000 mm – współczynnik 6,
- od 2001 do 2501 mm – współczynnik 7,
- do 2000 mm – współczynnik 8.

W przypadku magazynów specjalnych w zależności od ich rodzaju, warunków magazynowania, rodzaju asortymentu magazynowanych towarów należy uwzględnić ich specyfikę poprzez analizę dodatkowych kryteriów.

Poza dodatkowymi warunkami wynikającymi ze specyfiki magazynów specjalnych sposób oceny i analizy jest zbliżony jak w przypadku magazynów zamkniętych, czyli w obszarze wymogów głównych obejmuje wysokość składowania, udźwig oraz szerokość korytarzy roboczych.

W celu zilustrowania rozważań poniżej przedstawiono sposób doboru wózka jezdniowego podnośnikowego z zastosowaniem prezentowanej metody dla analizowanego rodzaju magazynu. Ze względu na charakter i objętość opracowania przedstawiony przykład jest uproszczony i obejmuje analizę dwóch rozwiązań wózków.

Do analizy przyjęto hipotetyczny magazyn półotwarty zajmujący się składowaniem materiałów budowlanych przechowywanych na paletach. Istnieje możliwość piętrzenia ładunku w stosach po dwie sztuki. Podłoże magazynu wykonane jest z betonu. Magazyn pracuje cały rok w klimacie środkowoeuropejskim. Nie są planowane zmiany asortymentu ani zmiany związane ze sposobem składowania w magazynie.

Dla analizowanego magazynu otwartego przyjęto, że preferowanym wyborem będą rozwiązania z napędem spalinowym zasilane LPG. Przyjęto ponadto poniższe założenia.

Transportowany ładunek zazwyczaj będzie miał masę przekraczającą 1000 kg, ale nie będzie przekraczał 2000 kg. Przyjęto na podstawie masy jednej palety cegieł wynoszącej 1254 kg [6] bez masy palety oraz około 1280 kg z uwzględnieniem masy palety.

Poddano analizie dwa warianty wózków jezdniowych podnośnikowych czołowych firm: PROMAG S.A. o napędzie spalinowym oraz Mitsubishi serii "FG"/"FD". Obie firmy oferują szeroką gamę rozwiązań zarówno z napędem elektrycznym, jak i spalinowym.

Firma Mitsubishi w swojej ofercie ma między innymi serię wózków oznaczonych "FG"/"FD" z możliwością konfiguracji w zakresie udźwigu oraz maksymalnej wysokości podnoszenia ładunku. Producent oferuje następujące warianty udźwigu: 1500 kg, 2000 kg, 2500 kg, 3000 kg oraz 3500 kg. Maksymalna wysokość podnoszenia wideł w przypadku konfiguracji może przyjąć następujące wartości: 3300 mm, 3700 mm, 4000 mm, 4500 mm, 4700 mm oraz 5500 mm. W tej serii wózków dostępne są silniki spalinowe zasilane LPG lub olejem napędowym. Wybrane podstawowe wyposażenie omawianych wózków obejmuje:

- ogumienie superelastyczne nowe,
- kabina dla operatora, niezabudowana,
- amortyzowany fotel operatora,
- przesuw boczny wideł,
- pełne oświetlenie,
- lusterka wsteczne,
- krata ochrony ładunku,
- instrukcja obsługi.

Na rysunku 1 przedstawiono model FG35N umożliwiający podnoszenie ładunku o masie do 3500 kg.



Rys. 1. Model FG35N Mitsubishi umożliwiający podnoszenie ładunku o masie do 3500 kg [3]

Polska firma PROMAG S.A. w swojej ofercie ma wózki o napędzie elektrycznym w wariantach trójkołowych i czterokołowych oraz konstrukcje o napędzie spalinowym zasilane LPG (rys. 2) oraz olejem napędowym.



Rys. 2. Model wózka jezdniowego podnośnikowego firmy PROMAG S.A. o napędzie spalinowym zasilanym LPG [5]

Rozwiązania firmy PROMAG S.A. oferowane z silnikiem spalinowym charakteryzują się między innymi następującymi cechami [4, 5]:

- udźwig: 1500–5000 kg,
- wysokość podnoszenia: 3000–6000 mm,
- przekładnię automatyczną sterowaną elektronicznie,
- wielorolkowym prowadzeniem masztu,
- kabiną operatora oddzieloną od ramy układem wibroizolatorów (FL15-35T),
- przejrzystym cyfrowym wyświetlaczem deski rozdzielczej,
- inteligentnym systemem wspomagającym bezpieczeństwo pracy ISS.

Różnice występujące w oferowanych przez firmę PROMAG S.A. rozwiązaniach wynikają z zastosowanej jednostki napędowej oraz osprzętu dodatkowego – systemu oczyszczania spalin EPS. Dla rozwiązania zasilanego LPG jest to trójfunkcyjny katalizator, a dla rozwiązania zasilanego olejem napędowym – filtr cząstek stałych [4, 5].

Analizowane modele obu firm dostępne są z możliwością zasilania LPG. Obie firmy oferują także jednostki napędowe zasilane olejem napędowym. W przypadku analizowanego magazynu oraz dobieranych rozwiązań wózków nie zostały określone preferencje dotyczące kraju pochodzenia oraz prestiżu marki. Wszystkie konfiguracje w obrębie wskazanych modeli obsługujące ładunek powyżej 2500 kg spełniają warunki wyboru.

W tabeli 3 przedstawiono zestawienie wymagań dla analizowanego magazynu półotwartego, natomiast w tabeli 4 zawarto ocenę stopnia spełnienia analizowanych kryteriów (wskaźników oceny) przez porównywane warianty wózków jezdniowych podnośnikowych.

Tab. 3. Zestawienie wymagań dla analizowanego magazynu półotwartego (opracowanie własne na podstawie [2])

podłoże magazynu	nawierzchnia betonowa	3	rodzaj kół	dowolny
wysokość składowania	do 1,5 m	1	wysokość unoszenia	min. 1,5 m
masa składowanego ładunku	do 2000 kg	5	udźwig	min. 2000 kg
bezpieczeństwo ładunku	brak wymaganych	brak wymaganych	systemy bezpieczeństwa ładunku	brak wymaganych
bezpieczeństwa operatora	brak wymaganych	brak wymaganych	systemy bezpieczeństwa operatora	brak wymaganych
inne urządzenia bezpieczeństwa	brak wymaganych	brak wymaganych	brak wymaganych	brak wymaganych
dodatkowe parametry	brak wymaganych	brak wymaganych	brak wymaganych	brak wymaganych
łączna ocena	8			

Tab. 4. Ocena stopnia spełnienia analizowanych kryteriów (wskaźników oceny) przez porównywane warianty wózków jezdniowych podnośnikowych (opracowanie własne na podstawie [2])

Cecha	Wartość/ Rodzaj/ Zakres	Minimalna wartość	Wariant 1	Wariant 2
podłoże magazynu	nawierzchnia betonowa	3	6	3
wysokość składowania	do 1,5 m	1	4	5
masa składowanego ładunku	do 2000 kg	5	8	6,5
bezpieczeństwo ładunku	brak wymaganych	brak wymaganych	4	4
bezpieczeństwa operatora	brak wymaganych	brak wymaganych	4	0
inne urządzenia bezpieczeństwa	brak wymaganych	brak wymaganych	5	4
dodatkowe parametry	brak wymaganych	brak wymaganych	4,5	2
łączna ocena		17	44,5	33,5

4. PODSUMOWANIE

W systemach logistycznych dostępnych jest wiele rozwiązań urządzeń i systemów stosowanych do realizacji procesów w ramach transportu bliskiego. Znaczna część stosowanych rozwiązań to urządzenia podnośnikowe, wśród których dominują urządzenia klasyfikowane jako urządzenia dźwignicowe. W zależności od potrzeb stosowane są różnorodne rozwiązania techniczne. Coraz częściej pojawiają się różne rozwiązania urządzeń autonomicznych stosowanych w systemach logistycznych. Mimo ciągłego postępu technicznego i rozwoju urządzeń transportu bliskiego nadal często stosowane są wózki jezdniowe podnośnikowe sterowane bezpośrednio przez operatora.

W opracowaniu przedstawiono założenia metody doboru środków technicznych do systemów logistycznych na przykładzie doboru wózków jezdniowych podnośnikowych dostosowanych do określonego rodzaju magazynu. W celu zilustrowania rozważań przedstawiono uproszczony przykład jej zastosowania.

Przedstawiony sposób postępowania ma na celu ułatwić dobór właściwego, w świetle analizowanych kryteriów, rozwiązania odnośnie do wózków jezdniowych podnośnikowych do zastosowania w istniejących oraz powstających czy projektowanych systemach logistycznych.

Otrzymany wynik nie zawsze będzie jednoznaczny, a sama metoda w takim przypadku ma na celu ułatwienie w postaci zawężenia możliwych wariantów wyboru, ponieważ każde rozwiązanie spełniające warunki narzucane przez metodę jest rozwiązaniem dopuszczalnym. W pewnych przypadkach właściwym rozwiązaniem może okazać się zastosowanie kilku różnych rozwiązań.

LITERATURA

- [1] Denzin N.K., Lincoln Y.S. (red.), 2009. Metody badań jakościowych. T. 1 i 2. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [2] Frąszczak P., 2023. Analiza rozwiązań wózków jezdniowych podnośnikowych stosowanych w systemach logistycznych. Praca dyplomowa, niepublikowana. PBŚ, Bydgoszcz.
- [3] <https://movincar.pl/dostepne-od-reki> (dostęp: 03.03.2024).
- [4] <https://promag.pl/produkty/wozki-magazynowe-i-czolowe/wozki-widlowe-czolowe/wozki-widlowe-spalinowe/wozki-widlowe-spalinowe-diesel/> (dostęp: 03.03.2024).
- [5] <https://promag.pl/produkty/wozki-magazynowe-i-czolowe/wozki-widlowe-czolowe/wozki-widlowe-spalinowe/wozki-widlowe-spalinowe-gazowe/> (dostęp: 03.03.2024).
- [6] <https://sklep.ceradbud.pl/pl/p/Cegla-pelna-klasa-20-paleta-330szt./40> (dostęp: 03.09.2023).

- [7] Landowski B., 2011. Metoda oceny informatycznych systemów wspomagających służby utrzymania ruchu. *Studia i Materiały Polskiego Stowarzyszenia Zarządzania Wiedzą. Seria: Studia i Materiały* 46, 190–203.
- [8] Miles M.B., Huberman A.M., 2000. *Analiza danych jakościowych*. Trans Humana, Białystok.
- [9] Norma PN-ISO 5053:1999 – wersja polska Wózki jezdniowe napędzane – Terminologia.
- [10] Silverman D., 2008. *Interpretacja danych jakościowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.
- [11] Silverman D., 2008. *Prowadzenie badań jakościowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

ANALIZA RYZYKA WYSTĄPIENIA ZDARZEŃ NIEPOŻĄDANYCH W SYSTEMIE NAPRAW PREWENCYJNYCH AUTOBUSÓW MIEJSKICH

Mirosław Szubartowski¹, Magdalena Czyżewska², Andrzej Neubauer³,
Klaudiusz Migawa^{2*}

¹ Management Business and Service, ul. Jagiellońska 103, 85-027 Bydgoszcz

² Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, Polska

³ Kujawska Szkoła Wyższa we Włocławku, Wydział Mechaniczny, Plac Wolności 1,
87-800 Włocławek

Streszczenie. W pracy przedstawiono model matematyczny procesu eksploatacji autobusów miejskich, który dotyczy realizowanych napraw przewencyjnych oraz napraw korekcyjnych. Model matematyczny opracowano z zastosowaniem teorii procesów semi-markowa. Rozważany system eksploatacji analizowany jest ze względu na ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych, które generują dodatkowe koszty. Dotyczy to nieplanowanych napraw realizowanych po uszkodzeniu obiektu technicznego (napraw korekcyjnych). W modelowanym systemie uwzględnia się dwa rodzaje napraw korekcyjnych: realizowane przez jednostki Pogotowia Technicznego oraz realizowane na stanowiskach Stacji Obsługi. Przedstawione w publikacji rozważania teoretyczne zilustrowano przykładowymi wynikami obliczeń.

Słowa kluczowe: ryzyko, naprawy korekcyjne, naprawy przewencyjne, transport miejski, procesy semi-Markowa

1. WPROWADZENIE

W trakcie realizacji procesu eksploatacji obiekty techniczne ulegają uszkodzeniom, które wpływają negatywnie na efektywność funkcjonowania danego systemu eksploatacji, np. na gotowość, dochód oraz bezpieczeństwo [5, 11]. W systemach tych zapewnienie wymaganej efektywności i bezpieczeństwa realizowane jest przez wprowadzanie rozmaitych strategii działań profilaktycznych w celu zmniejszenia liczby uszkodzeń użytkowanych obiektów technicznych, np. autobusów miejskich [1, 10]. Wśród tych działań można przede wszystkim wyróżnić naprawy przewencyjne oraz naprawy korekcyjne. Naprawy korekcyjne obiektów technicznych przeprowadzane są z użyciem dwóch wariantów: naprawy minimalnej („zły jak stary”) oraz naprawy dokładnej („dobry jak nowy”) [9]. W systemach eksploatacji autobusów miejskich naprawy realizowane przez jednostki Pogotowia Technicznego, ze względu na ich ograniczony zakres i czas trwania, często traktowane są jako naprawy minimalne, natomiast naprawy realizowane na stanowiskach Stacji Obsługi – jako naprawy dokładne. W literaturze można spotkać się w różnymi

* adres korespondencyjny: klaudiusz.migawa@pbs.edu.pl

modelami takich napraw. W pracach [2–4, 9, 12] przedstawiono modele napraw minimalnych wraz z działaniami prewencyjnymi według „wieku” obiektu technicznego, a także modele z zastosowaniem teorii procesów Markowa i semi-Markowa. W modelach tych minimalizacja kosztów utrzymania systemów realizowana jest za pomocą wdrażania w systemach eksploatacji, w których realizowane są naprawy korekcyjne, strategii napraw prewencyjnych. Z założenia koszty napraw prewencyjnych są mniejsze od kosztów napraw korekcyjnych. Przekłada się to również na czas przestoju (oczekiwania na naprawę oraz naprawy) obiektu technicznego. Czas ten jest wyższy w przypadku napraw korekcyjnych niż w przypadku napraw prewencyjnych.

W przedstawionym w publikacji modelu procesu eksploatacji autobusów miejskich do analizy jakości funkcjonowania zastosowano charakterystyki opisujące ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych, które powodują w badanym systemie eksploatacji zakłócenie procesu realizacji przydzielonych zadań przewozowych oraz generują w związku z tym dodatkowe koszty, takie jak koszty przestojów, koszty napraw, koszty kar, koszty utrzymania obiektów rezerwowych, koszty utraty dochodu. W opracowanym matematycznym modelu procesu eksploatacji autobusów miejskich stanami niepożądanymi modelu (stanami modelu, które dotyczą możliwości wystąpienia zdarzeń niepożądanych) są stan naprawy korekcyjnej realizowanej przez Pogotowie Techniczne po uszkodzeniu autobusu miejskiego oraz stan naprawy korekcyjnej realizowanej po uszkodzeniu autobusu miejskiego na stanowiskach Stacji Obsługi.

W pracy do budowy matematycznego modelu procesu eksploatacji autobusów miejskich zastosowano zagadnienia dotyczące teorii procesów semi-Markowa oraz metod modelowania systemów napraw prewencyjnych oraz napraw korekcyjnych. W celu zbudowania funkcji opisującej ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych zastosowano twierdzenie graniczne dla procesów semi-Markowa [6, 7]. Również w pracach [8] oraz [9] do budowy analizowanych funkcji opisujących jakość funkcjonowania obiektów technicznych zastosowano przedstawione podejście. Przyjęto, że czas do uszkodzenia obiektu technicznego (autobusu miejskiego) ma rozkład Weibulla. Przedstawione w pracy rozważania stanowią pierwszy etap opracowania kompleksowej metody sterowania złożonymi systemami eksploatacji obiektów technicznych z uwzględnieniem analizy trzech rodzajów charakterystyk opisujących działanie tego typu systemów: efektywności eksploatacyjno-technicznej (np. gotowości obiektów technicznych do realizacji przydzielonych zadań), efektywności ekonomicznej (np. dochodów generowanych w systemie eksploatacji) oraz bezpieczeństwa (np. ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych).

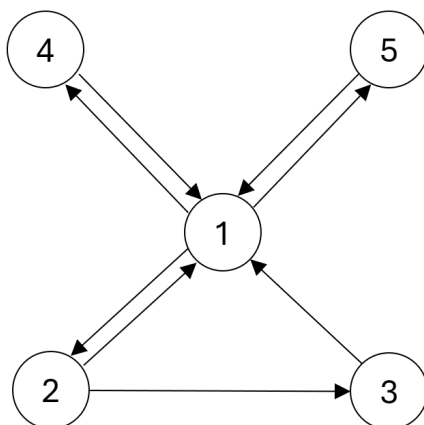
2. MODEL PROCESU EKSPLOATACJI AUTOBUSÓW KOMUNIKACJI MIEJSKIEJ

2.1. Graf modelu procesu eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej

W pracy rozpatrywany jest model procesu eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej. W modelu tym obiekty techniczne (autobusy miejskie) mogą znajdować się w jednym z pięciu stanów eksploatacyjnych:

- stan 1 – stan realizacji zadania przewozowego – stan, w którym zdalny pojazd wraz z kierowcą realizują przydzielone zadanie przewozowe osób na określonej trasie;
- stan 2 – stan diagnozowania przewencyjnego – stan, w którym weryfikowana jest konieczność realizacji naprawy przewencyjnej oraz określany jest rodzaj i zakres tej naprawy;
- stan 3 – stan naprawy przewencyjnej – zdalny obiekt techniczny poddawany jest naprawie przewencyjnej (przed uszkodzeniem) po określonym przedziale czasu, zgodnie z przyjętą strategią działania;
- stan 4 – stan naprawy korekcyjnej (po uszkodzeniu) realizowanej przez Pogotowie Techniczne;
- stan 5 – stan naprawy korekcyjnej (po uszkodzeniu) realizowanej na stanowiskach Stacji Obsługi.

Na rysunku 1 przedstawiono graf skierowany odwzorowania modelu procesu eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej.



Rys. 1. Graf skierowany odwzorowania modelu procesu eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej z przestrzenią stanów $S = \{1, 2, 3, 4, 5\}$ (opracowanie własne)

2.2. Model matematyczny procesu eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej

Dla grafu skierowanego przedstawionego na rysunku 1 zbudowano model matematyczny z zastosowaniem teorii procesów semi-Markowa [7]. W publikacji omówiono 5-stanowy model procesu semi-Markowa $X(t)$ odwzorowujący rozpatrywany model procesu eksploatacji autobusów komunikacji miejskiej. Przyjęto założenie, że jeśli $X(t) = i$, to modelowany proces w chwili t znajduje się w i -tym stanie. Macierz przejść włożonego w proces semi-markowski $X(t)$ łańcucha Markowa dla rozpatrywanego modelu ma postać:

$$P = \begin{bmatrix} 0 & p_{12} & 0 & p_{14} & p_{15} \\ p_{21} & 0 & p_{23} & 0 & 0 \\ p_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

gdzie:

p_{ij} , $i, j = 1, 2, 3, 4, 5$ – prawdopodobieństwo przejścia ze stanu i do stanu j .

W celu wyznaczenia prawdopodobieństw granicznych włożonego w proces semi-markowski $X(t)$ łańcucha Markowa należy rozwiązać następujący układ macierzowy:

$$\begin{bmatrix} 0 & p_{21} & p_{31} & p_{41} & p_{51} \\ p_{12} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & p_{23} & 0 & 0 & 0 \\ p_{14} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{15} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \pi_4 \\ \pi_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \pi_1 \\ \pi_2 \\ \pi_3 \\ \pi_4 \\ \pi_5 \end{bmatrix} \quad (2)$$

gdzie:

π_i , $i = 1, 2, 3, 4, 5$ – prawdopodobieństwo graniczne włożonego w proces semi-markowski $X(t)$ łańcucha Markowa.

Układ macierzowy (2) zastąpiono układem równań liniowych (4), w którym w celu otrzymania jednoznacznego rozwiązania wprowadzono warunek normalizacyjny (3):

$$\sum_{i=1}^5 \pi_i = 1 \quad (3)$$

wówczas układ równań liniowych (4) przyjmuje postać:

$$\begin{cases} \pi_1 + \pi_2 + \pi_3 + \pi_4 + \pi_5 = 1 \\ p_{12} \cdot \pi_1 = \pi_2 \\ p_{23} \cdot \pi_2 = \pi_3 \\ p_{14} \cdot \pi_1 = \pi_4 \\ p_{15} \cdot \pi_1 = \pi_5 \end{cases} \quad (4)$$

W wyniku rozwiązania układu równań liniowych (4) otrzymano wzory przedstawiające prawdopodobieństwa graniczne dla analizowanego łańcucha Markowa:

$$\begin{aligned}\pi_1 &= \frac{1}{m_1} \\ \pi_2 &= \frac{p_{12}}{m_1} \\ \pi_3 &= \frac{p_{12} \cdot p_{23}}{m_1} \\ \pi_4 &= \frac{p_{14}}{m_1} \\ \pi_5 &= \frac{p_{15}}{m_1}\end{aligned}\tag{5}$$

gdzie:

$$m_1 = 1 + p_{12} \cdot (1 + p_{23}) + p_{14} + p_{15}$$

W publikacji przedstawiono model matematyczny procesu eksploatacji, w którym autobusy komunikacji miejskiej są diagnozowane i naprawiane prewencyjnie po określonym czasie lub naprawiane korekcyjnie po uszkodzeniu. Przez $T_1(x)$ określa się czas do diagnozowania i naprawy prewencyjnej lub uszkodzenia, a następnie naprawy korekcyjnej. Zmienną $T_1(x)$ definiuje się następująco:

$$T_1(x) = \begin{cases} T_1, & \text{gdy } T_1 < x \\ x, & \text{gdy } T_1 \geq x \end{cases}\tag{6}$$

Zakłada się, że po czasie x , gdy autobus nie uległ uszkodzeniu, przechodzi w stan diagnozowania i następnie w stan naprawy prewencyjnej. Proces zmian stanów $i = 1, 2, 3, 4, 5$ z uwzględnieniem diagnozowania i naprawy prewencyjnej po czasie x jest nowym procesem semi-Markowa z macierzą $P(x)$. W odniesieniu do macierzy P zmienia się tylko pierwszy wiersz tej macierzy, wówczas macierz $P(x)$ przyjmuje postać:

$$P(x) = \begin{bmatrix} 0 & p_{12}(x) & 0 & p_{14}(x) & p_{15}(x) \\ p_{21} & 0 & p_{23} & 0 & 0 \\ p_{31} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{41} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ p_{51} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\tag{7}$$

natomiast prawdopodobieństwa graniczne wyznaczone dla łańcucha Markowa przedstawiono poniżej:

$$\begin{aligned}
\pi_1(x) &= \frac{1}{m_2} \\
\pi_2(x) &= \frac{p_{12}(x)}{m_2} \\
\pi_3(x) &= \frac{p_{12}(x) \cdot p_{23}}{m_2} \\
\pi_4(x) &= \frac{p_{14}(x)}{m_2} \\
\pi_5(x) &= \frac{p_{15}(x)}{m_2}
\end{aligned} \tag{8}$$

gdzie:

$$m_2 = 1 + p_{12}(x) \cdot (1 + p_{23}) + p_{14}(x) + p_{15}(x)$$

3. RYZYKO WYSTĄPIENIA ZDARZEŃ NIEPOŻĄDANYCH

W pracy rozpatrywany jest 5-stanowy matematyczny model procesu eksploatacji autobusów miejskich, którego odwzorowanie stanowi semi-markowski model procesu $X(t)$ z przestrzenią stanów $S = \{1, 2, 3, 4, 5\}$. W opracowanym semi-markowskim modelu procesu eksploatacji autobusów miejskich realizowane są zarówno naprawy prewencyjne wykonywane przed uszkodzeniem obiektu technicznego – działania planowane (stan 3 modelu), jak i naprawy korekcyjne przeprowadzane po uszkodzeniu obiektu technicznego – działania nieplanowane (stany 4 i 5 modelu). Prawidłowość funkcjonowania rozpatrywanego systemu eksploatacji autobusów miejskich analizowana jest ze względu na ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych, które powodują zakłócenie procesu realizacji przydzielonych zadań przewozowych oraz generują z tym związane dodatkowe koszty (koszty przestoju, koszty naprawy, koszty kar, koszty utrzymania obiektów rezerwowych, koszty utraty dochodu). W przypadku rozpatrywanego modelu procesu eksploatacji stanami niepożądanymi modelu (stanami modelu, które dotyczą możliwości wystąpienia zdarzeń niepożądanych) są:

- stan 4 – stan naprawy korekcyjnej (po uszkodzeniu) realizowanej przez Pogotowie Techniczne,
- stan 5 – stan naprawy korekcyjnej (po uszkodzeniu) realizowanej na stanowiskach Stacji Obsługi.

Dla rozpatrywanego modelu, ryzyko wystąpienia straty w trakcie procesu eksploatacji autobusów miejskich w [PLN na h] można opisać wzorem:

$$r(x) = \sum_{i \in S_N} p_i^*(x) \cdot c_i \quad (9)$$

gdzie:

- S_N – zbiór stanów niepożądanych, które mogą wystąpić w trakcie procesu eksploatacji autobusów miejskich,
- $p_i^*(x)$ – prawdopodobieństwo graniczne przebywania w i-tym niepożądanym stanie procesu eksploatacji,
- c_i – koszty (straty) jednostkowe w [PLN na h], które są generowane w i-tym niepożądanym stanie procesu eksploatacji; straty te dotyczą kosztów ponoszonych w trakcie przerwy w realizacji zadania przewozowego, w tym kosztów utrzymania autobusu podczas przestoju, kosztów oczekiwania na naprawę, kosztów naprawy oraz utraty potencjalnych dochodów.

W opracowanym modelu dotyczy to w szczególności:

- 1) ryzyka wystąpienia straty spowodowanej przestojem autobusu miejskiego ze względu na naprawę korekcyjną realizowaną przez jednostkę Pogotowia Technicznego w [PLN na h]:

$$r_1(x) = \sum_{i \in S_{N1}} p_i^*(x) \cdot c_i \quad (10)$$

gdzie:

- S_{N1} – zbiór stanów niepożądanych spowodowanych przestojem autobusu miejskiego ze względu na naprawę przez jednostkę Pogotowia Technicznego; w rozpatrywanym modelu $S_{N1} = \{4\}$,
- $c_i = z_i + d_i$; w rozpatrywanym modelu $z_i = z_4$ oznacza koszty utrzymania autobusu miejskiego podczas przestoju ze względu na naprawę korekcyjną przez jednostkę Pogotowia Technicznego; $d_i = z_1$ oznacza utratę dochodu podczas przestoju autobusu miejskiego ze względu na naprawę przez jednostkę Pogotowia Technicznego.

Jeżeli:

$$r_1(x) = r_{1a}(x) + r_{1b}(x) \quad (11)$$

gdzie:

- 1.1) ryzyko poniesienia kosztów utrzymania autobusu miejskiego podczas przestoju ze względu na naprawę przez jednostkę Pogotowia Technicznego w [PLN na h]:

$$r_{1a}(x) = \sum_{i \in S_{N1}} p_i^*(x) \cdot z_i = \frac{\pi_4(x) \cdot ET_4 \cdot z_4}{\pi_1(x) \cdot ET_1(x) + \sum_{i=2}^5 \pi_i(x) \cdot ET_i} \quad (12)$$

- 1.2) ryzyko utraty dochodu podczas przestoju autobusu miejskiego ze względu na naprawę przez jednostkę Pogotowia Technicznego w [PLN na h]:

$$r_{1b}(x) = \sum_{i \in S_{N1}} p_i^*(x) \cdot d_i = \frac{\pi_4(x) \cdot ET_4 \cdot z_1}{\pi_1(x) \cdot ET_1(x) + \sum_{i=2}^5 \pi_i(x) \cdot ET_i} \quad (13)$$

wówczas:

$$r_1(x) = \sum_{i \in S_{N_1}} p_i^*(x) \cdot c_i = \frac{\pi_4(x) \cdot ET_4 \cdot (z_4 + z_1)}{\pi_1(x) \cdot ET_1(x) + \sum_{i=2}^5 \pi_i(x) \cdot ET_i} \quad (14)$$

- 2) ryzyka wystąpienia straty spowodowanej przestojem autobusu miejskiego ze względu na naprawę korekcyjną realizowaną na stanowisku Stacji Obsługi w [PLN na h]:

$$r_2(x) = \sum_{i \in S_{N_2}} p_i^*(x) \cdot c_i \quad (15)$$

gdzie:

S_{N_2} – zbiór stanów niepożądanych spowodowanych przestojem autobusu miejskiego ze względu na naprawę korekcyjną na stanowisku Stacji Obsługi; w rozpatrywanym modelu $S_{N_2} = \{5\}$,
 $c_i = z_i + d_i$; w rozpatrywanym modelu $z_i = z_5$ oznacza koszty utrzymania autobusu miejskiego podczas przestoju ze względu na naprawę korekcyjną na stanowisku Stacji Obsługi; $d_i = z_1$ oznacza utratę dochodu podczas przestoju autobusu miejskiego ze względu na naprawę korekcyjną na stanowisku Stacji Obsługi.

Jeżeli:

$$r_2(x) = r_{2a}(x) + r_{2b}(x) \quad (16)$$

gdzie:

- 2.1) ryzyko poniesienia kosztów utrzymania autobusu miejskiego podczas przestoju ze względu na naprawę korekcyjną na stanowisku Stacji Obsługi w [PLN na h]:

$$r_{2a}(x) = \sum_{i \in S_{N_2}} p_i^*(x) \cdot z_i = \frac{\pi_5(x) \cdot ET_5 \cdot z_5}{\pi_1(x) \cdot ET_1(x) + \sum_{i=2}^5 \pi_i(x) \cdot ET_i} \quad (17)$$

- 2.2) ryzyko utraty dochodu podczas przestoju autobusu miejskiego ze względu na naprawę korekcyjną na stanowisku Stacji Obsługi w [PLN na h]:

$$r_{2b}(x) = \sum_{i \in S_{N_2}} p_i^*(x) \cdot d_i = \frac{\pi_5(x) \cdot ET_5 \cdot z_1}{\pi_1(x) \cdot ET_1(x) + \sum_{i=2}^5 \pi_i(x) \cdot ET_i} \quad (18)$$

wówczas:

$$r_2(x) = \sum_{i \in S_{N_2}} p_i^*(x) \cdot c_i = \frac{\pi_5(x) \cdot ET_5 \cdot (z_5 + z_1)}{\pi_1(x) \cdot ET_1(x) + \sum_{i=2}^5 \pi_i(x) \cdot ET_i} \quad (19)$$

W szczególności na podstawie prac [8, 9] można zapisać:

$$\begin{aligned} p_{12}(x) &= p_{12} \cdot F_{12}(x) + R_1(x) \\ p_{14}(x) &= p_{14} \cdot F_{14}(x) \\ p_{15}(x) &= p_{15} \cdot F_{15}(x) \end{aligned} \quad (20)$$

oraz dla uproszczenia dalszych rozważań przyjęto, że:

$$F_{12}(x) = F_{14}(x) = F_{15}(x) = F_1(x) \quad (21)$$

gdzie:

$F_{1j}(x)$, $j = 2, 4, 5$ – warunkowe rozkłady czasu przebywania w stanie 1, pod warunkiem, że kolejnym stanem będzie stan $j = 2, 4, 5$;

$R_1(x) = 1 - F_1(x)$ – funkcja niezawodności zmiennej losowej T_1 .

Biorąc powyższe pod uwagę, można zauważyć, że funkcje (10) oraz (15) opisujące ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych w [PLN na h] wyrażone są odpowiednio wzorami:

$$r_1(x) = \frac{p_{14} \cdot ET_4 \cdot (z_4 + z_1) \cdot F_1(x)}{ET_1(x) + ET_2 + p_{23} \cdot ET_3 - [(1 - p_{12}) \cdot (ET_2 + p_{23} \cdot ET_3) - (p_{14} \cdot ET_4 + p_{15} \cdot ET_5)] \cdot F_1(x)} \quad (22)$$

$$r_2(x) = \frac{p_{15} \cdot ET_5 \cdot (z_5 + z_1) \cdot F_1(x)}{ET_1(x) + ET_2 + p_{23} \cdot ET_3 - [(1 - p_{12}) \cdot (ET_2 + p_{23} \cdot ET_3) - (p_{14} \cdot ET_4 + p_{15} \cdot ET_5)] \cdot F_1(x)} \quad (23)$$

4. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ

Na rysunkach od 2 do 4 przedstawiono wykresy funkcji $r_1(x)$ w przypadku ryzyka wystąpienia straty spowodowanej przestojem autobusu miejskiego ze względu na naprawę korekcyjną realizowaną przez jednostkę Pogotowia Technicznego, natomiast na rysunkach od 5 do 7 przedstawiono wykresy funkcji $r_2(x)$ w przypadku ryzyka wystąpienia straty spowodowanej przestojem autobusu miejskiego ze względu na naprawę korekcyjną realizowaną na stanowisku Stacji Obsługi. Obliczenia wykonano dla następujących danych:

1) wartości macierzy prawdopodobieństw zmian stanów modelu P :

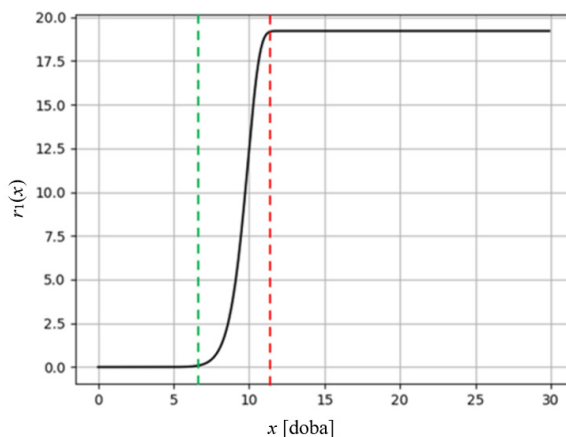
$$P = \begin{bmatrix} 0 & 0,30 & 0 & 0,29 & 0,41 \\ 0,17 & 0 & 0,83 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

2) wartości średnie czasów przebywania obiektu technicznego w stanach modelu w [h]:

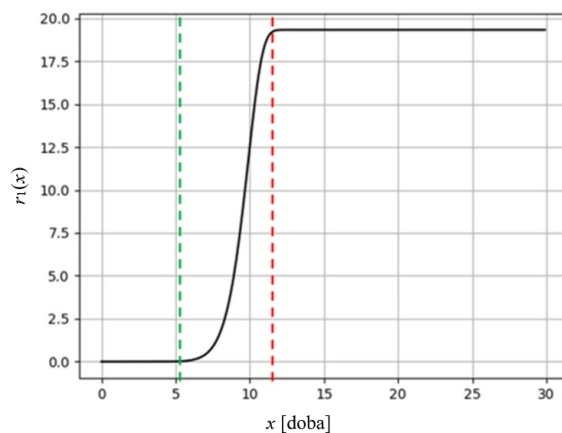
$ET_2 = 0,620$, $ET_3 = 1,783$, $ET_4 = 0,717$, $ET_5 = 3,621$; dla czasu zdadności (czasu do uszkodzenia) ET_1 przyjęto rozkład Weibulla, dla którego wartość parametru skali $scale = 10$; analizowano trzy przypadki, gdy wartość parametru kształtu rozkładu Weibulla wynosi odpowiednio $shape \in \{9; 11,5; 14\}$,

3) wartości średnie dochodów lub kosztów jednostkowych generowanych w stanach modelu w [PLN na h]:

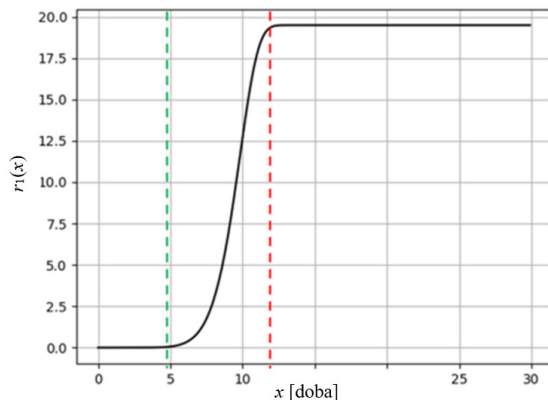
$$z_1 = 38, z_2 = -98, z_3 = -121, z_4 = -84, z_5 = -143.$$



Rys. 2. Wykres funkcji $r_1(x)$ w [PLN na h] – ryzyko wystąpienia straty spowodowanej przestojem autobusu miejskiego ze względu na naprawę korekcyjną realizowaną przez jednostkę Pogotowia Technicznego, wyznaczony dla rozkładu Weibulla o wartościach parametrów skali = 10 i kształtu = 14 (opracowanie własne)

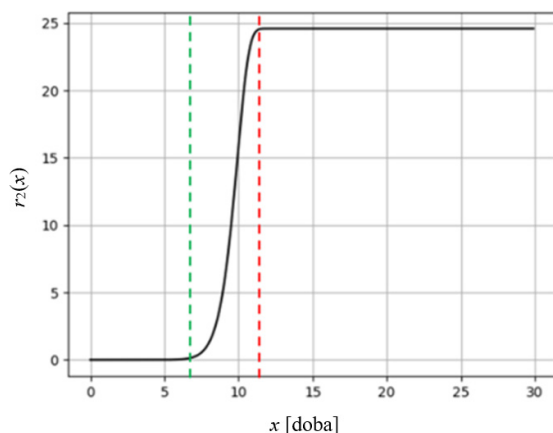


Rys. 3. Wykres funkcji $r_1(x)$ w [PLN na h] – ryzyko wystąpienia straty spowodowanej przestojem autobusu miejskiego ze względu na naprawę korekcyjną realizowaną przez jednostkę Pogotowia Technicznego, wyznaczony dla rozkładu Weibulla o wartościach parametrów skali = 10 i kształtu = 11,5 (opracowanie własne)

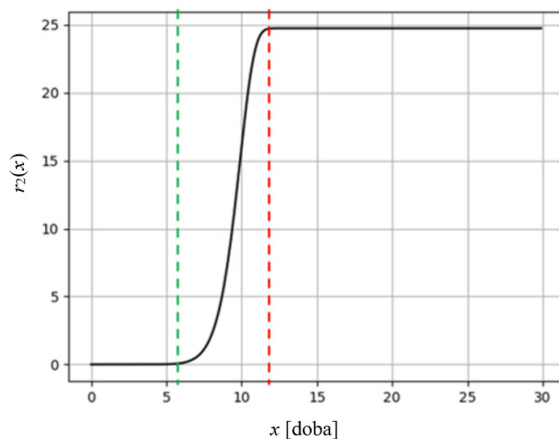


Rys. 4. Wykres funkcji $r_1(x)$ w [PLN na h] – ryzyko wystąpienia straty spowodowanej przestojem autobusu miejskiego ze względu na naprawę korekcyjną realizowaną przez jednostkę Pogotowia Technicznego, wyznaczony dla rozkładu Weibulla o wartościach parametrów skali = 10 i kształtu = 9 (opracowanie własne)

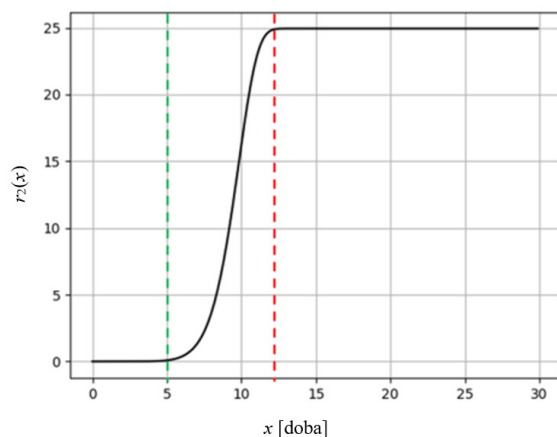
Na rysunkach od 2 do 4 przedstawiono ryzyko $r_1(x)$ wystąpienia straty spowodowanej przestojem autobusu miejskiego ze względu na naprawę korekcyjną realizowaną przez jednostkę Pogotowania Technicznego, w funkcji czasu do uszkodzenia x . W pierwszym przedziale od $x = 0$ do $x = 4,9 \div 6,5$ doby (zielona linia), prawdopodobieństwa uszkodzenia $F_1(x) = F_{14}(x) = 0$, dlatego ryzyko $r_1(x) = 0$. W drugim przedziale od $x = 4,9 \div 6,5$ doby (zielona linia) do $x = 11,5 \div 12,0$ doby (czerwona linia) następuje wzrost prawdopodobieństwa uszkodzenia $F_1(x) = F_{14}(x)$ od 0 do 1, a tym samym ryzyko $r_1(x)$ wzrasta od wartości minimalnej do wartości maksymalnej. W trzecim przedziale powyżej $x = 12,0$ doby, dla prawdopodobieństwa uszkodzenia $F_1(x) = F_{14}(x) = 1$ (czerwona linia), ryzyko $r_1(x)$ przyjmuje wartości maksymalne od 19,0 do 19,5 [PLN na h].



Rys. 5. Wykres funkcji $r_2(x)$ w [PLN na h] – ryzyko wystąpienia straty spowodowanej przestojem autobusu miejskiego ze względu na naprawę korekcyjną realizowaną na stanowisku Stacji Obsługi, wyznaczony dla rozkładu Weibulla o wartościach parametrów skali = 10 i kształtu = 14 (opracowanie własne)



Rys. 6. Wykres funkcji $r_2(x)$ w [PLN na h] – ryzyko wystąpienia straty spowodowanej przestojem autobusu miejskiego ze względu na naprawę korekcyjną realizowaną na stanowisku Stacji Obsługi, wyznaczony dla rozkładu Weibulla o wartościach parametrów skali = 10 i kształtu = 11,5 (opracowanie własne)



Rys. 7. Wykres funkcji $r_2(x)$ w [PLN na h] – ryzyko wystąpienia straty spowodowanej przestojem autobusu miejskiego ze względu na naprawę korekcyjną realizowaną na stanowisku Stacji Obsługi, wyznaczony dla rozkładu Weibulla o wartościach parametrów skali = 10 i kształtu = 9 (opracowanie własne)

Na rysunkach od 5 do 7 przedstawiono ryzyko $r_2(x)$ wystąpienia straty spowodowanej przestojem autobusu miejskiego ze względu na naprawę korekcyjną realizowaną na stanowisku Stacji Obsługi, w funkcji czasu do uszkodzenia x . W pierwszym przedziale od $x = 0$ do $x = 5,0 \div 6,5$ doby (zielona linia), prawdopodobieństwa uszkodzenia $F_1(x) = F_{15}(x) = 0$, dlatego ryzyko $r_2(x) = 0$. W drugim przedziale od $x = 5,0 \div 6,5$ doby (zielona linia) do $x = 11,5 \div 12$ doby (czerwona linia) następuje wzrost prawdopodobieństwa

uszkodzenia $F_1(x) = F_{15}(x)$ od 0 do 1, a tym samym ryzyko $r_2(x)$ wzrasta od wartości minimalnej do wartości maksymalnej. W trzecim przedziale powyżej $x = 12$ doby dla prawdopodobieństwa uszkodzenia $F_1(x) = F_{15}(x) = 1$ (czerwona linia), ryzyko $r_2(x)$ przyjmuje wartości maksymalne od 24,8 do 25,0 [PLN na h].

5. PODSUMOWANIE

Opracowana metoda wyznaczania i analizy ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych w systemie eksploatacji autobusów miejskich dotyczy strat spowodowanych koniecznością realizacji napraw korekcyjnych uszkodzonych autobusów miejskich.

Na rysunkach od 2 do 7 przedstawiono wykresy ryzyka poniesienia kosztów (strat) spowodowanych koniecznością realizacji napraw korekcyjnych w funkcji czasu do uszkodzenia autobusu miejskiego. Na każdym z przedstawionych wykresów można wyróżnić trzy przedziały czasu do uszkodzenia x . W pierwszym przedziale czasu x (poniżej wartości oznaczonej zieloną linią), wyznaczone ryzyka $r_1(x) = 0$ oraz $r_2(x) = 0$. Wynika to z faktu, że w tym przedziale prawdopodobieństwo uszkodzenia obiektu wynosi zero. W drugim przedziale czasu x , pomiędzy zieloną linią a czerwoną linią, następuje wzrost prawdopodobieństwa uszkodzenia, a tym samym ryzyko uszkodzenia wzrasta od wartości minimalnej do wartości maksymalnej. Jest to przedział czasu, w którym należy planować realizację napraw prewencyjnych eksploatowanych obiektów technicznych. Wyznaczenie optymalnego czasu do naprawy prewencyjnej będzie kolejnym etapem realizowanych badań. W trzecim przedziale czasu x , powyżej wartości oznaczonej czerwoną linią, ryzyko przyjmuje wartości maksymalne (prawdopodobieństwo uszkodzenia w tym przedziale jest największe).

W pracy przedstawiono metodę wyznaczania i analizy ryzyka wystąpienia zdarzeń niepożądanych (napraw korekcyjnych autobusów miejskich), która stanowi pierwszy etap opracowania kompleksowej metody oceny oraz sterowania złożonymi systemami eksploatacji obiektów technicznych różnych klas. W kolejnych etapach zostanie określona funkcja kryterialna opisująca ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych z uwzględnieniem zarówno napraw korekcyjnych oraz napraw prewencyjnych, zostaną wyznaczone warunki konieczne istnienia optimum (minimum) tej funkcji oraz wyznaczone rozwiązania optymalne.

LITERATURA

- [1] Borowski S., Szubartowski M., Migawa K., Sołtysiak A., Neubauer A., Hujo L., Nosian J., 2023. Mathematical Model for Determining the Time of Preventive Replacements in the Agricultural Machinery Service System with Minimal Repair. Applied Sciences 13(1), 640.

- [2] Chang C.C., 2014. Optimum preventive maintenance policies for system subject to random working time, replacement, and minimal repair. *Computers & Industrial Engineering* 67, 185–194.
- [3] Chang C.C., Sheu S.H., Chen Y.L., 2013. A bivariate optimal replacement policy for system with age-dependent minimal repair and cumulative repair-cost limit. *Communications in statistics – Theory and methods* 42(22), 4108–4126.
- [4] Chang C.C., Sheu S.H., Chen Y.L., Zhang Z.G., 2011. A multi-criteria optimal replacement policy for a system subject to shocks. *Computer and Industrial Engineering* 61, 1035–1043.
- [5] Czyżewska M., Migawa K., Neubauer A., Martinod R., 2023. Semi-Markov model for the Kaplan preventive repair system for water turbines. *MATEC Web of Conferences, Bydgoszcz – Drezno* 375, 1–9.
- [6] Grabski F., 2002. *Semi-markowskie modele niezawodności i eksploatacji [Semi-Markov models of reliability and maintenance]*. IBS PAN, Warszawa.
- [7] Grabski F., 2014. *Semi-Markov Processes: Applications in System Reliability and Maintenance*. Elsevier, Amsterdam.
- [8] Knopik L., Migawa K., 2018. Multi-state model of maintenance policy. *Maintenance and Reliability* 20(1), 125–130.
- [9] Knopik L., Migawa K., 2017. Optimal age-replacement policy for non-repairable technical objects with warranty. *Maintenance and Reliability* 19(2), 172–178.
- [10] Migawa K., Borowski S., Neubauer A., Sołtysiak A., 2021. Semi-Markov Model of the System of Repairs and Preventive, Replacements by Age of City Buses. *Applied Sciences* 11(21), 16. DOI: 10.3390/app112110411
- [11] Migawa K., Sołtysiak A., Czyżewska M., 2021. Semi-Markov model for the Kaplan preventive repair system for water turbines with periodic inspection of the technical condition. *MATEC Web of Conferences, Bydgoszcz – Poledno* 351, 1–10.
- [12] Tadj L., Ouali M.S., Yacount S., Ait-Kadi D., 2011. *Replacement Models with minimal Repair, Chapter: A Survey of Replacement Models with Minimal Repair*. Springer Verlag, London.

ANALIZA WYBRANYCH WŁASNOŚCI OLEJÓW ROŚLINNYCH Z PUNKTU WIDZENIA MOŻLIWOŚCI ICH ZASTOSOWANIA W SILNIKACH SPALINOWYCH

Małgorzata Malinowska^{1*}, Łukasz Muślewski², Lubomir Hujo³

¹ Uniwersytet Morski w Gdyni, Wydział Mechaniczny, ul. Morska 81–87, 81-225 Gdynia

² Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej, Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

³ Faculty of Special Technology, Trenčianska Univerzita Alexandra Dubčeka v Trenčíne, 911 50 Trenčin, Slovakia

Streszczenie. Celem badań była ocena trzech wybranych olejów roślinnych jako proekologicznej alternatywy dla konwencjonalnych olejów silnikowych. Do celów porównawczych wybrano komercyjny olej mineralny Marinol RG1240. Oleje roślinne mogą być zamiennikami tradycyjnych ropopochodnych olejów silnikowych ze względu na wysoki wskaźnik lepkości, dobre właściwości smarne, wysoką temperaturę zapłonu, nietoksyczność, niską emisję i biodegradowalność, przy uwzględnieniu, że mają też swoje ograniczenia. Na podstawie uzyskanych wyników wielokryterialnej oceny jako najlepszą bazę do dalszych badań wybrano trzy rodzaje olejów roślinnych: rycynowy, rzepakowy i lniany. W publikacji szczegółowo omówiono wybrane propozycje z uwzględnieniem właściwości fizykochemicznych oraz charakterystyki składu chemicznego. Ocenę właściwości użytkowych wybranych olejów naturalnych jako olejów do smarowania silników spalinowych przeprowadzono na podstawie charakterystyki lepkościowo-temperaturowej w zakresie od -10 do 120°C, zależności lepkości dynamicznej od szybkości ścinania w zakresie od 0 do 200000 s⁻¹ (właściwości reologiczne), a także wpływu starzenia termicznego na lepkość. Zakłada się, że przedstawiona praca może dostarczyć badaczom i użytkownikom przydatnych informacji na temat olejów silnikowych przyjaznych środowisku, w postaci alternatywnych – względem stosowanych tradycyjnie ropopochodnych olejów silnikowych – olejów roślinnych.

Słowa kluczowe: oleje roślinne, oleje silnikowe, lepkość dynamiczna, szybkość ścinania, starzenie termiczne

1. WPROWADZENIE

Do najważniejszych funkcji oleju silnikowego należy zmniejszanie tarcia poprzez utrzymanie odpowiedniego filmu smarnego pomiędzy ruchomymi częściami silnika, a tym samym – zmniejszenie zużycia silnika. Olej silnikowy powinien również wypełniać mikrouszkodzenia na smarowanych powierzchniach, uszczelniać komorę spalania, tłumić hałas etc. [11, 16]. Należy również zaznaczyć, że olej silnikowy pracuje w ekstremalnych temperaturach, a także powinien pracować jako czynnik chłodzący, tj. odprowadzać ciepło, ułatwiając właściwemu układowi chłodzenia utrzymanie określonej temperatury.

Oleje silnikowe zazwyczaj składają się z oleju bazowego oraz dodatków uszlachetniających. Oleje bazowe mogą być mineralne (pochodzące z ropy naft-

* adres korespondencyjny: m.malinowska@wm.am.gdynia.pl

towej), syntetyczne (polialfaolefiny, glikole, estry syntetyczne, silikony etc.) lub roślinne (olej słonecznikowy, olej rzepakowy, olej palmowy etc.). Większość stosowanych obecnie smarów stanowi mieszaninę węglowodorów parafinowych, naftenowych i aromatycznych [2, 6, 8]. Obecnie w okolicznościach wzrastającego zanieczyszczenia środowiska oraz rosnącej świadomości społeczeństwa prowadzi się wiele badań nad zastąpieniem tradycyjnych olejów pochodzących z ropy naftowej olejami roślinnymi [6].

Oleje roślinne charakteryzują się wysoką biodegradowalnością i niskim negatywnym oddziaływaniem na środowisko [8]. Wyróżniają się także dobrymi właściwościami lepkościowymi, smarnymi i temperaturowymi. Wykazują również dużą odporność na ścinanie i nie powodują korozji metali [12]. Jednak z drugiej strony mogą mieć słabą stabilność oksydacyjną i hydrolityczną, wysoką temperaturę płynięcia, a także wysoką cenę [6].

Wiele analiz skupia się na badaniach olejów roślinnych w stanie świeżym, zatem można je uznać za pozytywne jedynie w przypadku krótkotrwałego stosowania. W szczególności zakładając zastosowanie oleju roślinnego jako smaru dla silnika spalinowego, należy wziąć pod uwagę, że tego typu urządzenia charakteryzują się bardzo trudnym środowiskiem pracy, np. olej pracuje w wysokich temperaturach, a także oddziałują na niego wysokie wartości szybkości ścinania oraz różnego typu zanieczyszczenia. Właściwości smarne olejów roślinnych należy zatem oceniać nie tylko w kontekście oczekiwań dotyczących krótkotrwałego, lecz także długotrwałego stosowania [4]. Analizując badania [10] dotyczące wpływu utleniania oleju rzepakowego na jego właściwości tribologiczne, przeprowadzając pomiary na aparacie czterokulowym, gdzie wcześniej próbkę oleju podgrzewano w temperaturze 100°C przez 40 godzin, zauważono, że smarność oleju rzepakowego zależy od czasu utleniania, czyli że dłuższy czas utleniania powoduje pogorszenie smarności oleju. Można zatem oczekiwać, że oleje roślinne w stanie niestarszonym będą wykazywać lepsze właściwości smarne niż oleje mineralne, jednakże wraz ze starzeniem termicznym mogą wykazywać utratę swoich właściwości tribologicznych. Jednak badania te dotyczyły tylko jednego rodzaju oleju, a czas 40 h wydaje się krótki w stosunku do rzeczywistej ilości godzin pracy czynnika w silniku spalinowym. Należy podkreślić, że w omawianych badaniach skupiono się jedynie na ocenie smarności próbek, a pominięto badania nad lepkością olejów, która jest najbardziej charakterystycznym parametrem smarów, a także nie uwzględniono badań nad właściwościami reologicznymi.

W pracy przedstawiono badania trzech różnych olejów roślinnych, tj. rzepakowego, rycynowego i lnianego, które zostały wybrane na podstawie wcześniej przeprowadzonej oceny wielokryterialnej (MCDA) [13] oraz programowania kompromisowego (CP). Do porównania olejów roślinnych wykorzystano komercyjny olej mineralny Marinol RG1240 przeznaczony do smarowania silników okrętowych średnioobrotowych. W pracy w głównej mierze skupiono się na pomiarach najbardziej charakterystycznego parametru olejów silnikowych – lepkości. Przeprowadzono trzy badania: zależności lepkości dynamicznej od temperatury dla olejów świeżych, zbadano wpływ starzenia w 100°C przez 168 oraz 336 godzin, a także zbadano właściwości reologiczne wybranych olejów.

2. MATERIAŁY

Do badań wykorzystano trzy oleje roślinne: olej lniany, olej rzepakowy oraz olej rycynowy. Do celów porównawczych użyto oleju mineralnego przeznaczonego do smarowania średnioobrotowych silników morskich.

2.1. Olej lniany

Źródłem oleju lnianego jest siemię lniane (*Linum usitatissimum*) [3]. Smar ten otrzymywany jest w wyniku prasowania ziaren, rzadziej przez ich ekstrakcję. Substancja ma kolor od bezbarwnego do żółtego. Olej lniany ma charakterystyczną budowę chemiczną, gdyż zawiera największą ilość wielonienasyconych kwasów tłuszczowych (zwłaszcza kwasu linolenowego, tab. 1), które umożliwiają jego utlenianie [12], a także nadają mu charakter oleju schnącego [3]. Ze względu na swoje właściwości olej ten znalazł zastosowanie w produkcji farb, substancji wykorzystywanych do konserwacji drewna, a także wykładzin podłogowych [3]. Podstawowe własności fizykochemiczne oleju lnianego przedstawiono w tab. 2.

Tab. 1. Charakterystyka składu chemicznego wybranych olejów roślinnych [8]

	Olej		
	Lniany	Rzepakowy	Rycynowy
Skład reszt kwasowych [%]			
Kwas laurynowy (12:0)	-	-	-
Kwas mirystynowy (14:0)	-	-	-
Kwas palmitnowy (16:0)	4–5	4–5	0,5–1
Kwas stearynowy (18:0)	2–4	1–2	0,5–1
Kwas oleinowy (18:1)	19,1	56–64	4–5
Kwas linolowy (18:2)	12–18	20–26	2–4
Kwas linolenowy (18:3)	56,6	8–10	0,5–1
Kwas rycynolowy (18:1)	-	-	83–85

Tab. 2. Fizykochemiczne własności wybranych olejów roślinnych [7, 8]

	Olej		
	Lniany	Rzepakowy	Rycynowy
Właściwości fizykochemiczne			
Lepkość kinematyczna w 40°C [mm ² ·s ⁻¹]	26–29	35	251
Współczynnik lepkości [-]	262,5	218,5	88
Gęstość w 15°C [g·cm ⁻³]	0,938	0,912	0,960
Temperatura zapłonu [°C]	241	246	229
Stabilność oksydacyjna w 110°C [h]	0,2	7,5	1,2
Temperatura płynięcia [°C]	-15	-15	-21
Liczba kwasowa [mg KOH na g]	8,92	9,75	1,19
Liczba jodowa [g I na 100g]	170–204	94–120	81–91

2.2. Olej rzepakowy

Źródłem oleju rzepakowego jest roślina z rodziny goździkowatych kwitnąca na żółto, którą w około 45% stanowi kwas erukowy. Zawartość kwasu erukowego ma bardzo istotny wpływ na jakość wyprodukowanego oleju. Rzepak składa się z 4 podstawowych elementów: wody, białka, oleju i błonnika, ale zawiera również kilka pomniejszych składników, takich jak wolne kwasy tłuszczowe, enzymy (zwłaszcza mirozynaza), glukozynolany i fosfatydy (guma), które mogą być bardzo przydatne podczas procesu smarowania [18]. Olej rzepakowy w porównaniu z innymi olejami zawiera największą ilość kwasów oleinowego oraz linolowego (tab. 1). Już w XIX wieku po raz pierwszy zastosowano olej rzepakowy jako smar do silników parowych [19]. Podstawowe własności fizykochemiczne przedstawiono w tabeli 2.

2.3. Olej rycynowy

Źródłem oleju rycynowego jest *Ricinus communis*. Nasiona, z których wytwarzany jest smar, zawierają od 40 do 60% oleju bogatego w trójglicerydy, zwłaszcza rycynoleinę. Za bardzo nietypowe właściwości smaru rycynowego odpowiada kwas rycynolowy (tab. 1). Jest to kwas, który występuje wyłącznie w tym rodzaju oleju. Charakteryzuje się doskonałymi właściwościami smarnymi w wysokich temperaturach, dużą lepkością w niskich temperaturach, rozpuszczalnością w alkoholu w dowolnych proporcjach oraz wysokim ciężarem właściwym [15] (szczegółowo parametry oleju zostały przedstawione w tabeli 2). Z drugiej strony ma ograniczoną rozpuszczalność w rozpuszczalnikach nadtlenkowych alifatycznych. Stosowanie tego oleju jest preferowane jako środek smarny w silnikach wysokoprężnych, odrzutowych i wyścigowych [19].

2.4. Porównawczy olej mineralny

Marinol RG1240 to rodzaj morskiego oleju przeznaczonego dla silników tłokowych (olej typu TPEO – *Trunk Piston Engine Oil*). Przeznaczony jest do smarowania morskich silników bezwodnikowych na paliwo lekkie. Wybrane parametry Marinolu przedstawiono w tabeli 3. Olej spełnia wymagania API CD (*American Petroleum Institute*, kategoria CD) dla silników okrętowych, a jego skład opiera się na głęboko rafinowanych, odparafinowanych rozpuszczalnikowo i hydrorafinowanych destylatach olejowych otrzymywanych z ropy naftowej. Zawiera odpowiednio dobrany pakiet dodatków, np.: myjących, przeciwzużyciowych, antykorozyjnych, dyspergujących, samoutleniających, antykorozyjnych etc. [9, 13].

Tab. 3. Charakterystyka oleju mineralnego Marinol RG1240 [9]

Parametr	Metoda pomiarowa	Jednostka	Wielkość
Lepkość kinematyczna w 100°C	ASTM D-445	mm ² ·s ⁻¹	14,3
Temperatura płynięcia	ASTM D-5950	°C	-24
Temperatura zapłonu	PN-EN ISO 2592	°C	260
Liczba zasadowa	ASTM D-2896	mg KOH na g	12,5
Współczynnik lepkości	ASTM D-270		96
Corrosion effect at 100°C, 3 h, Cu	PN-EN ISO 2160 ASTM D-130	degree	1

3. METODY BADAWCZE

W badaniach skupiono się na pomiarach lepkości dynamicznej wybranych olejów. Najpierw zbadano zależności lepkości od temperatury w zakresie od -10 do 120°C, na podstawie których wyznaczono energię aktywacji reakcji. Wspomniana energia daje informacje odnośnie do szybkości zachodzących reakcji w oleju.

W dalszej części zrealizowano badania dotyczące parametrów lepkości wybranych olejów roślinnych oraz dokonano ogólnej analizy co do oceny ich własności lepkościowych i możliwości zastosowania jako oleju silnikowego w jednostkach spalinowych.

Silnik spalinowy podczas eksploatacji pracuje w różnych warunkach, które mają wpływ na zmiany ilościowe, a przede wszystkim zmiany jakościowe oleju smarnego. Dlatego w badaniach laboratoryjnych nad alternatywnymi – względem tradycyjnych – rodzajami płynów eksploatacyjnych warto również uwzględnić wpływ parametrów eksploatacyjnych. W przypadku oleju przeznaczonego do smarowania silnika spalinowego szczególnie ważne mogą okazać się badania długiego oddziaływania wysokiej temperatury oraz analiza zachowania przy wysokich szybkościach ścinania.

3.1. Badanie zależności lepkości od temperatury

Lepkość jest podstawową właściwością fizyczną olejów smarnych. Oznacza ona tarcie wewnętrzne w cieczy spowodowane interakcjami molekularnymi i jest związana z temperaturą, szybkością ścinania, a także ciśnieniem. Niska lepkość oznacza niski opór przepływu, a wysoka lepkość oznacza duży opór przepływu. Dla większości olejów roślinnych mieści się ona w przedziale 30–50 mm²·s⁻¹ (w temperaturze 40°C). Istnieje kilka wyjątków, z których najbardziej znanym jest olej rycynowy (220 mm²·s⁻¹) [2].

Zasadniczo lepkość cieczy zmienia się znacznie wraz ze zmianą temperatury. Wraz ze wzrostem temperatury siły przyciągania między cząsteczkami maleją, a efektem tego jest zmniejszenie tarcia wewnętrznego. Zmiana lepkości wraz

ze wzrostem temperatury jest wyrażona empirycznym równaniem Arrheniusa-Guzmana i ma postać funkcji wykładniczej:

$$\eta = Ae^{\frac{E_a}{RT}} [\text{Pa} \cdot \text{s}] \quad (1)$$

gdzie:

- η – lepkość dynamiczna [$\text{Pa} \cdot \text{s}$],
- E_a – energia aktywacji reakcji [$\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$],
- A – czynnik przedeksponencjalny związany z częstością zderzeń skutecznych w danej reakcji,
- R – uniwersalna stała gazowa wynosząca $8,31 [\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \text{mol}^{-1}]$,
- T – temperatura [K].

W przedstawionej zależności występuje energia aktywacji, która opisuje trudność reakcji chemicznej [20], w literaturze jest ona łączona z różnymi parametrami smarów [5, 14, 17]. Ogólnie rzecz biorąc, im wyższy parametr E_a , tym trudniejsza jest reakcja chemiczna. Zatem określenie energii aktywacji może być pomocne w badaniu mechanizmu utleniania smarów [14]. Może być także wskaźnikiem stabilności termicznej [5].

Do wykonania badania w zakresie temperatur od -10 do 120°C wykorzystano lepkościomierz Haake Mars III w układzie płytka – stożek. Stożek o średnicy $d = 60 \text{ mm}$ oraz kącie wierchołkowym 178° .

3.2. Badanie wpływu oddziaływania wysokiej temperatury na zmianę lepkości

Należy zaznaczyć, że wysoka temperatura jest główną przyczyną degradacji oleju w wyniku starzenia termicznego oraz utleniania. Dlatego zdecydowano się na przeprowadzenie laboratoryjnego procesu starzenia termicznego wybranych olejów. Metoda ta to prosty i przyspieszony test, który umożliwia wstępną selekcję olejów roślinnych ze względu na ich stabilność dla zastosowań długoterminowych.

Próbki w zamkniętych kolbach o objętości 250 ml podgrzewano do temperatury 100°C przez dwa okresy: 168 oraz 336 godzin. Następnie zmierzono lepkość dynamiczną w temperaturze 60°C przy szybkości ścinania 20000 s^{-1} na reometrze Haake Mars III.

3.3. Badanie zależności lepkości od szybkości ścinania

W wyniku występowania podczas pracy silnika sił ścinających lepkość tradycyjnych olejów silnikowych (oleje mineralne oraz syntetyczne) może się zmniejszać. W niektórych przypadkach spadek może wynosić nawet 50% , a tym samym pogarsza się współczynnik lepkości oleju. Przyczyną tego zjawiska jest fizyczna destrukcja cząstek oleju pod wpływem działania wspomnianych sił ścinających. Zjawisko to jest niepożądane w eksploatacji, a oleje

o właściwościach newtonowskich, czyli takich, że lepkość nie zmienia się wraz ze zmianą szybkości ścinania, są najbardziej odpowiednie.

Najprostszym matematycznym modelem reologicznym opisującym wspomniane zjawisko jest tzw. model potęgowy Ostwalda-de Waele [20]:

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \text{ [Pa]} \quad (2)$$

$$\eta = K\dot{\gamma}^{n-1} \text{ [Pa} \cdot \text{s]} \quad (3)$$

gdzie:

- τ – naprężenie styczne [Pa],
- K – współczynnik konsystencji [$\text{Pa} \cdot \text{s}^n$],
- $\dot{\gamma}$ – prędkość ścinania [s^{-1}],
- n – wskaźnik płynięcia [-],
- η – lepkość dynamiczna [$\text{Pa} \cdot \text{s}$].

Gdy wartość współczynnika płynięcia wynosi 1, wskazuje na płyn newtonowski, natomiast wartości różne od 1 oznaczają płyny nienewtonowskie. Płyny nienewtonowskie o wartościach n mniejszych niż 1 wykazują rozrzedzenie ścinaniem (płyny pseudoplastyczne). Płyny nienewtonowskie o wartościach n większych niż 1 wykazują tendencję do zagęszczania przy ścinaniu.

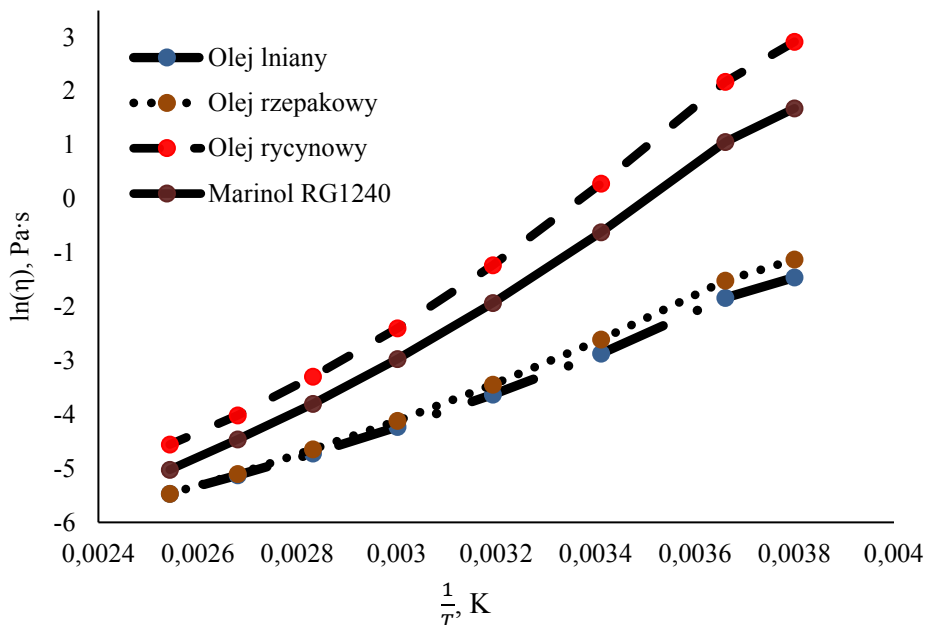
Do badania wykorzystano urządzenie reometr Haake Mars III w układzie cylinder – cylinder. Zastosowano rotor o średnicy $d = 21,951$ mm oraz szerokości szczeliny $s = 0,025$ mm. Pomiary prowadzono dla szybkości ścinania od 0 do 200000 s^{-1} oraz temperatury 60°C , która jest charakterystyczną temperaturą dla pracy smarnych olejów okrętowych.

4. WYNIKI BADAŃ

Poniżej przedstawiono wybrane wyniki badań dla analizowanych próbek olejów.

4.1. Badanie zależności lepkości od temperatury

Ogólnie rzecz biorąc, lepkość maleje wraz ze wzrostem temperatury cieczy i jest to funkcja wykładnicza. Ze względu na duże różnice w uzyskiwanych wartościach lepkości, np. w temperaturze -10°C lepkość oleju rzepakowego wynosi $18556,67 \text{ mPa} \cdot \text{s}$, a oleju lnianego $233,67 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ (tab. 5). Aby lepiej zinterpretować pomiary zależności lepkości od temperatury w badanym zakresie od -10°C do 120°C , przedstawiono je w postaci wykresów Arrheniusa $\ln(\eta)$ w funkcji $\frac{1}{T}$ (rys. 1).



Rys. 1. Wykres zależności lepkości od temperatury w badanym zakresie od -10°C do 120°C w postaci wykresu Arrheniusa $\ln(\eta)$ w funkcji $\frac{1}{T}$ (opracowanie własne)

Na rysunku 1 można zauważyć, że powstałe krzywe są głównie liniami prostymi, czyli są zgodne ze wzorem Arrheniusa-Guzmana. Pomimo ogólnej zasady, że oleje roślinne mają znacznie niższą lepkość niż oleje mineralne, zawartość kwasu rycynolowego w oleju rycynowym powoduje silny wzrost lepkości tej substancji. Najniższymi wynikami charakteryzuje się olej lniany, którego krzywa jest bardzo bliska do krzywej oleju rzepakowego, zwłaszcza w wysokich temperaturach.

Na podstawie przedstawionego wykresu można obliczyć energię aktywacji badanych olejów, czego wyniki przedstawiono w tabeli 4. Najwyższą energię aktywacji ma olej rycynowy ($50,98 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), a następnie Marinol RG1240 ($45,54 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), najniższą – olej lniany ($27,12 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$), niewiele więcej ma olej rzepakowy ($29,5 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$). Na podstawie tych wartości można stwierdzić, że olej lniany może mieć najgorszą stabilność oksydacyjną i termiczną, a reakcje chemiczne będą zachodzić w nim najszybciej.

Warto również wspomnieć, że w przypadku olejów roślinnych stopień nienasycenia, charakteryzujący się liczbą jodową, decyduje również o szybkości procesów termooksydacyjnych. Im wyższa liczba jodowa, tym większy stopień nienasycenia oleju. Badane oleje charakteryzują się następującymi wartościami liczby jodowej (tab. 2): olej lniany 170–204 g I na 100 g, olej rzepakowy 94–120 g I na 100 g i olej rycynowy 81–91 g I na 100 g.

Wyznaczenie energii aktywacji reakcji, a także porównanie wartości liczby jodowej dowodzą, że olej lniany jest olejem najmniej stabilnym. Dlatego najprawdopodobniej nie będzie odpowiedni dla zastosowań długoterminowych w silniku spalinowym.

Tab. 4. Wyznaczona energia aktywacji reakcji dla badanych olejów (opracowanie własne)

Olej	Lniany	Rzepakowy	Rycynowy	Marinol RG1240
Energia aktywacji reakcji [J·mol ⁻¹]	27,12	29,5	50,98	45,54

W celu przeprowadzenia dokładniejszej analizy zależności lepkości od temperatury dla badanych olejów porównano lepkość w 20°C z lepkościami w następujących temperaturach: -10°C, 60°C i 120°C (patrz tab. 5). Procentowy wzrost lepkości dla -10°C wyznaczono z zależności:

$$\text{procentowy wzrost lepkości [\%]} = \frac{\eta_{-10}}{\eta_{20}} \cdot 100\% \quad (4)$$

Procentowy spadek lepkości dla 60°C oraz 120°C określono ze wzoru:

$$\text{procentowy spadek lepkości [\%]} = 100\% - \left(\frac{\eta_{60} \text{ lub } \eta_{120}}{\eta_{20}} \cdot 100\% \right) \quad (5)$$

Wyniki obliczeń procentowych spadków i przyrostów lepkości przedstawiono w tabeli 7.

Tab. 5. Lepkości dynamiczne badanych olejów w temperaturach 20°C, -10°C, 60°C, 120°C oraz wyznaczone zmiany procentowe (opracowanie własne)

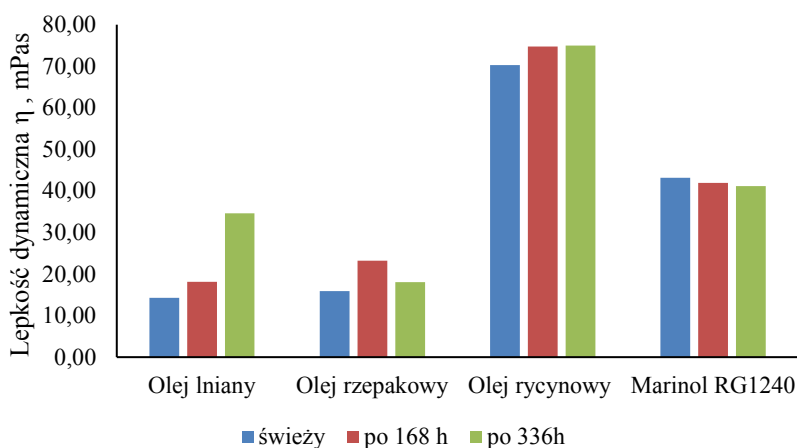
Olej	Lniany	Rzepakowy	Rycynowy	Marinol RG1240
Lepkość dynamiczna w 20°C η_{20} [mPa·s]	56,85	74,05	1336,6	539,25
Lepkość dynamiczna -10°C η_{-10} [mPa·s]	23,67	325,77	18556,67	5393
Wzrost lepkości [%]	411	440	1388	1000
Lepkość dynamiczna 60°C η_{60} [mPa·s]	14,6	16,3	90,83	51,4
Spadek lepkości [%]	74	78	93	90
Lepkość dynamiczna 120°C η_{120} [mPa·s]	4,21	4,22	10,51	6,59
Spadek lepkości [%]	93	94	99	99

Jak wynika z danych przedstawionych w tabeli 5, najlepsze właściwości lepkościowo-temperaturowe ma olej lniany. Najmniejszy (około 4-krotny) wzrost lepkości stwierdzono w temperaturze -10°C, a najmniejszy spadek w temperaturach 60°C i 120°C, odpowiednio 74% i 93%. Najgorzej w porów-

naniu wypada olej rycynowy, którego lepkość wzrasta prawie 14-krotnie i ma mocny spadek przy maksymalnej temperaturze, który wynosi 99%. Porównywany olej mineralny Marinol RG1240 w temperaturze -10°C ma lepkość ponad 3 razy mniejszą niż olej rycynowy i ponad 23 razy większą niż olej lniany. W temperaturze 120°C różnica lepkości jest znacznie mniejsza i wynosi $2,38\text{ mPa}\cdot\text{s}$ pomiędzy olejem mineralnym a lnianym oraz $3,92\text{ mPa}\cdot\text{s}$ pomiędzy olejem mineralnym a rycynowym. Na podstawie tych wyników można stwierdzić, że olej lniany ma najwyższy wskaźnik lepkości.

4.2. Badanie wpływu oddziaływania wysokiej temperatury na zmianę lepkości

Na wykresie kolumnowym przedstawiono pomiar lepkości dynamicznej dla wszystkich olejów w stanie świeżym oraz po starzeniu termicznym przez 168 h oraz 336 h. Pomiary lepkości były prowadzone w temperaturze 60°C oraz dla szybkości ścinania wynoszącej 20000 s^{-1} .



Rys. 2. Wykres przedstawiający zmianę lepkości dynamicznej w 60°C dla próbek olejów świeżych oraz starzonych termicznie przez 168 h oraz 336 h (opracowanie własne)

W przypadku porównawczego oleju mineralnego można zauważyć niewielkie spadki lepkości w wyniku oddziaływania wysokiej temperatury. Dla oleju lnianego oraz rycynowego odnotowuje się wzrosty lepkości, natomiast olej rzepakowy zachowuje się bardzo nietypowo, ponieważ po 168 h jego lepkość wzrasta, a po kolejnych 168 h jego lepkość maleje. Aby łatwiej zinterpretować wyniki, w tabeli 6 przedstawiono liczbowe wartości lepkości dynamicznej z uwzględnieniem procentowej zmiany w stosunku do oleju świeżego. Wartości procentowe z minusem oznaczają spadek, a ze znakiem dodatnim – wzrost lepkości w odniesieniu do oleju świeżego.

Tab. 6. Lepkości dynamiczne badanych olejów w temperaturze 60°C oraz wyznaczone zmiany procentowe (opracowanie własne)

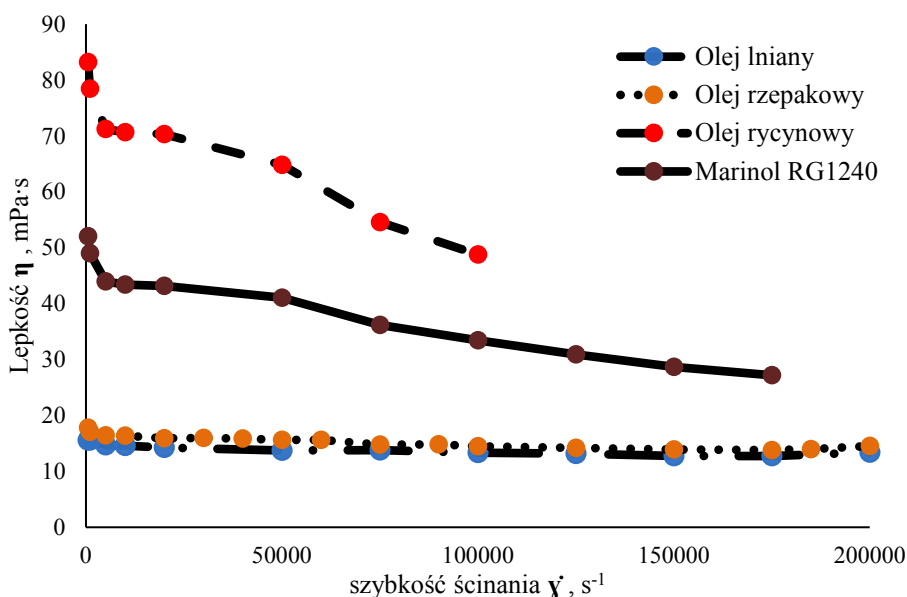
Olej	Lniany	Rzepakowy	Rycynowy	Marinol RG1240
Lepkość dynamiczna w 60°C dla oleju świeżego [mPa·s]	14,28	15,92	70,30	43,16
Lepkość dynamiczna 60°C dla oleju starzonego termicznie przez 168 h [mPa·s]	18,11	23,19	74,73	41,93
Procentowa zmiana lepkości [%]	-26,84%	-45,68%	-6,30%	+2,85%
Lepkość dynamiczna 60°C dla oleju starzonego termicznie przez 336 h [mPa·s]	34,60	18,07	74,94	41,20
Procentowa zmiana lepkości [%]	-142,32%	-13,55%	-6,61%	+4,54%

Na podstawie danych przedstawionych w tabeli 6 można zauważyć, że najmniejsze procentowe zmiany lepkości występują dla oleju mineralnego (2,85% oraz 4,54%), co jest wynikiem występowania w Marinolu dodatków uszlachetniających. Największe zmiany dotyczą natomiast oleju lnianego, w przypadku starzenia termicznego przez 336 h zmiana procentowa wynosi aż 142,32% i zachodzi bardziej gwałtownie po drugim starzeniu. Korzystnymi wartościami charakteryzuje się również olej rycynowy, którego pierwszy spadek lepkości wynosi 6,3%, ale drugi jest niewiele większy 6,61%. Olej ten może charakteryzować się dobrą odpornością na działanie wysokiej temperatury długoterminowo. Jak już wspomniano, olej rzepakowy zachowuje się dość nietypowo, po początkowym dużym spadku lepkości (ponad 45%) odnotowany jest jej wzrost i zmiana wynosi już tylko 13,5%. Można wnioskować, że jest dość obiecującym smarem dla zastosowań długoterminowych, po wcześniejszej obróbce termicznej.

4.3. Badanie zależności lepkości od szybkości ścinania

Wykres zależności lepkości dynamicznej od szybkości ścinania w zakresie od 0 do 200000 s⁻¹ przedstawiono na rysunku 3. Podczas przeprowadzania eksperymentów w dwóch próbach, tj. dla oleju rycynowego oraz oleju mineralnego nastąpiło zerwanie filmu olejowego przy szybkościach odpowiednio 100000 s⁻¹ oraz 175000 s⁻¹. Oleje te nie będą dobrze spełniać swoich funkcji w przypadku silników szybkoobrotowych, a olej rycynowy dodatkowo w silniku średnioobrotowym. Dla oleju lnianego oraz rzepakowego charakterystyki są bardzo podobne i można zauważyć niewielkie zmiany lepkości w całym zakresie szybkości ścinania, co jest własnością bardzo pożądaną dla nowoczesnych silników spalinowych.

W celu dokładnego opisanie własności reologicznych na podstawie otrzymanych parametrów podczas badań oraz wyznaczonych wartości z równań 2 i 3, wyznaczono wskaźniki płynięcia n dla próbek olejów. Wyniki przedstawiono w tabeli 7.



Rys. 3. Wykres zależności lepkości dynamicznej od szybkości ścinania w 60°C (opracowanie własne)

Tab. 7. Wyznaczony wskaźnik płynięcia badanych olejów

Olej	Lniany	Rzepakowy	Rycynowy	Marinol RG1240
Wskaźnik płynięcia n [-]	0,98	0,964	0,918	0,903

Współczynnik płynięcia dla temperatury 60°C dla wszystkich olejów w badanym zakresie szybkości ścinania jest bliski wartości 1. Jednak komercyjny olej mineralny ma najmniejszą wartość 0,903, czyli jest najbardziej podatny na rozrzedzenie ścinaniem, następnie jest olej rycynowy (0,918). Najbliżej charakterystyki cieczy newtonowskiej jest olej lniany (0,98), a niewiele gorszy olej rzepakowy (0,964).

5. WNIOSKI

W prezentowanej publikacji przedstawiono badania 3 wybranych olejów roślinnych (uznanych za przyjazne dla środowiska) i oleju mineralnego Marinol RG1240 typu TPEO. Oleje: lniany, rzepakowy i rycynowy wybrano na podstawie wcześniej przeprowadzonej oceny wielokryterialnej [13]. Dla wszystkich próbek zbadano zależność lepkości od temperatury, wyznaczono własności reologiczne oraz wpływ termicznego starzenia na lepkość dynamiczną.

Na podstawie uzyskanych wyników badań zależności lepkości od temperatury najmniejsze zmiany w zakresie badanych temperatur od -10°C do 120°C stwierdzono dla oleju lnianego i rzepakowego. Olej rycynowy ma najgorszy wskaźnik lepkości spośród wszystkich badanych próbek. Najlepsze właściwości reologiczne w badanej temperaturze ma także olej lniany, który ma charakter bliski płynowi newtonowskiemu. Bardzo dobre właściwości lepkości oleju lnianego wynikają z jego niskiej energii aktywacji. Sytuacja jest odwrotna w przypadku badania dotyczącego starzenia termicznego, które wykazuje poważną wadę dla zastosowań długoterminowych oleju lnianego, jaką jest bardzo niska stabilność termiczna.

Przedstawione wyniki wskazują, że budowa chemiczna olejów roślinnych ma silny wpływ na ich właściwości. Kluczowy wpływ na właściwości smaru ma odmienny skład kwasów nasyconych i nienasyconych, a także różna liczba wiązań. Znając jednak zaobserwowane zależności, można zmieniać parametry olejów naturalnych poprzez ingerencję w strukturę chemiczną oleju lub proponować mieszanki spełniające stawiane wymagania.

W kilku z przedstawionych porównań komercyjny olej mineralny Marinol RG1240 okazuje się lepszy od olejów roślinnych. Należy jednak pamiętać, że wzbogacony jest o pakiet dodatków, bez których nie mógłby spełniać swoich podstawowych funkcji, np. ze względu na pienienie.

Na podstawie uzyskanych wyników badań można wnioskować, że w pierwszej kolejności najkorzystniejsze własności eksploatacyjne ma olej rzepakowy i można go traktować jako alternatywę dla mineralnych olejów do silników tłokowych. Olej ten ma wysoki współczynnik lepkości. Jego lepkość dynamiczna niewiele zmienia się z szybkością ścinania, a długotrwały wpływ termicznego starzenia wywołuje wzrost lepkości.

LITERATURA

- [1] Ahmadi Nadooshan A., Hemmat Esfe M., Afrand M., 2017. Evaluation of rheological behavior of 10W40 lubricant containing hybrid nano-material by measuring dynamic viscosity. *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures* 92, 47–54. doi: 10.1016/j.physe.2017.05.011
- [2] Cecilia J.A., Plata D.B., Saboya R.M.A., De Luna F.M.T., Cavalcante C.L., Rodríguez-Castellón E., 2020. An overview of the biolubricant production process: Challenges and future perspectives. *Processes* 8(3), 257. doi: 10.3390/pr8030257
- [3] Długogorski B.Z., Kennedy E.M., Mackie J.C., 2011. Linseed oil and its tendency to self-heat. *Fire Safety Science* 10, 389–400. doi: 10.3801/IAFSS.FSS.10-389
- [4] Fox N.J., Stachowiak G.W., 2007. Vegetable oil-based lubricants – A review of oxidation. *Tribology International* 40(7), 1035–1046. doi: 10.1016/j.triboint.2006.10.001

- [5] Gamlin C.D., Dutta N.K., Choudhury N.R., Kehoe D., Matisons J., 2002. Evaluation of kinetic parameters of thermal and oxidative decomposition of base oils by conventional, isothermal and modulated TGA, and pressure DSC. *Thermochimica Acta* 392–393, 357–369. doi: 10.1016/S0040-6031(02)00121-1
- [6] Ghosh P., Karmakar G., 2014. Evaluation of sunflower oil as a multifunctional lubricating oil additive. *International Journal of Industrial Chemistry* 5(1), 1–10. doi: 10.1007/s40090-014-0007-7
- [7] Ijaz Malik M.A.I., Kalam M.A., Mujtaba M.A., Almomani F., 2023. A review of recent advances in the synthesis of environmentally friendly, sustainable, and nontoxic bio-lubricants: Recommendations for the future implementations. *Environmental Technology and Innovation* 32. doi: 10.1016/j.eti.2023.103366
- [8] Karmakar G., Ghosh P., Sharma B.K., 2017. Chemically modifying vegetable oils to prepare green lubricants. *Lubricants* 5(4), 44. doi: 10.3390/lubricants5040044
- [9] Karta Charakterystyki Marinol. Dostępne na www.lotos.pl
- [10] Kreivaitis R., Padgurskas J., Gumbyte M., Makarevičiene V., Spruogis B., 2011. The influence of oxidation on tribological properties of rapeseed oil. *Transport* 26(2), 121–127. doi: 10.3846/16484142.2011.586109
- [11] Ljubas D., Krpan H., Matanoviae I., 2010. Influence of engine oils dilution by fuels on their viscosity, flash point and fire point. *Nafta* 61(2), 73–79.
- [12] Malinowska M., 2019. The Full or Partial Replacement of Commercial Marine Engine Oil with Bio Oil, on the Example of Linseed Oil. *Journal of KONES* 26(3), 129–135. doi: 10.2478/kones-2019-0066
- [13] Malinowska M., Muślewski Ł., 2021. The Multiple Criteria Assessment on the selected vegetable oils for the lubricating engine. *MATEC Web of Conferences* 351, 01023. doi: 10.1051/mateconf/202135101023
- [14] Martín-Alfonso J.E., Valencia C., Sánchez M.C., Franco J.M., 2012. Evaluation of Thermal and Rheological Properties of Lubricating Greases Modified with Recycled LDPE. *Tribology Transactions* 55(4), 518–528. doi: 10.1080/10402004.2012.676162
- [15] Ogunniyi D.S., 2006. Castor oil: A vital industrial raw material. *Biore-source Technology* 97(9), 1086–1091. doi: 10.1016/j.biortech.2005.03.028
- [16] Santana N., Silva G.A., Mothe C.G., Mothe M.G., 2022. Evaluation of lubricating oil in marine diesel engine using thermal analysis. FTIR and rheology. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 147(23), 13261–13274. doi: 10.1007/s10973-022-1156811
- [17] Tripathi A.K., Vinu R., 2015. Characterization of thermal stability of synthetic and semi-synthetic engine oils. *Lubricants* 3(1), 54–79. doi: 10.3390/lubricants3010054
- [18] Unal H., Sincik M., Izli N., 2009. Comparison of some engineering properties of rapeseed cultivars. *Industrial Crops and Products* 30(1), 131–136. doi: 10.1016/j.indcrop.2009.02.011

- [19] Zainal N.A., Zulkifli N.W.M., Gulzar M., Masjuki H.H., 2018. A review on the chemistry, production, and technological potential of bio-based lubricants. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, 80–102. doi: 10.1016/j.rser.2017.09.004
- [20] Zhongyi H., Liping X., Sheng H., Aixi C., Jianwei Q., Xisheng F., 2013. Tribological and Antioxidation Synergistic Effect Study of Sulfonate-Modified Nano Calcium Carbonate. *PLoS One* 8(5). doi: 10.1371/journal.pone.0062050

BADANIE SZTYWNOŚCI SPRĘŻYN ZAWIESZEŃ POJAZDÓW SAMOCHODOWYCH

Szymon Szczukowski, Tomasz Jarzyna*

Politechnika Bydgoska im. J. i J. Śniadeckich, Wydział Inżynierii Mechanicznej,
Al. prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz

Streszczenie. Problematyka pracy dotyczy wyznaczania charakterystyk sztywności sprężyn zawieszonych pojazdów samochodowych. Badaniom doświadczalnym oraz obliczeniom komputerowym poddano zarówno sprężyny nowe, jak i poddane wcześniejszej eksploatacji. Obiektami badań były pojedyncze sprężyny oraz układy równoległe sprężyn.

Słowa kluczowe: sprężyny śrubowe, charakterystyka sprężyny, sztywność sprężyny

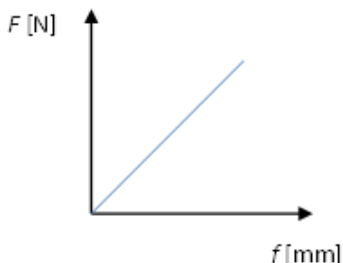
1. WSTĘP

Zawieszenie pojazdu wpływa na tłumienie wstrząsów spowodowanych toczeniem się kół jezdnych po nierównościach nawierzchni oraz łagodzi drgania powstające w wyniku ruchu pojazdu [1]. Stanowi ono układ elementów, które łączą koła jezdne lub osie z ramą lub bezpośrednio z nadwoziem. Elementy te można podzielić na trzy grupy: elementy sprężyste (np. sprężyny, resory), tłumiące i prowadzące. Elementy sprężyste zawieszonych pod wpływem obciążeń odkształcają się i mogą chwilowo gromadzić energię potencjalną. Energia ta umożliwia powrót nadwozia do pierwotnego położenia. Dużą zdolnością absorbowania energii na jednostkę masy charakteryzują się sprężyny śrubowe. Właściwości sprężyste sprężyn zawieszenia określa parametr sztywności k [3]. Wyraża się go jako stosunek przyrostu siły do przyrostu odpowiadającego tej sile odkształcenia

$$k = \frac{dP}{df} \quad (1)$$

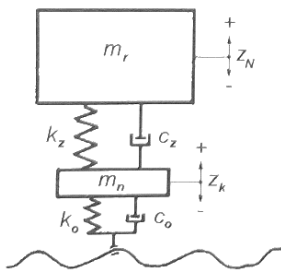
W przypadku sprężyn śrubowych zmiany średnicy drutu, skoku, średnicy zwoju oraz rodzaju materiału wpływają na zmianę parametru k . W przypadku gdy parametry te nie ulegają zmianie, sprężyny uginają się proporcjonalnie do przyłożonego obciążenia (rys. 1). Sztywność takich sprężyn jest stała [3]. Informacje dotyczące obliczeń sprężyn śrubowych można znaleźć w literaturze [5]. Sprężyny mogą pracować w różnych konfiguracjach. Dla układów równoległych (takich jak badano w pracy) sztywność układu jest sumą sztywności pojedynczych sprężyn.

* adres korespondencyjny: tomasz.jarzyna@pbs.edu.pl



Rys. 1. Charakterystyka liniowa sprężyny (opracowanie własne)

Z zależności (1) wynika, że zmiana sztywności sprężyn ma wpływ na zmianę ugięcia zawieszenia przy takim samym obciążeniu. Parametr ten związany jest ponadto z częstotliwością drgań własnych nadwozia. Dobierając sztywność zawieszenia na etapie projektowania pojazdu, należy kierować się zasadą, aby częstotliwość drgań własnych nadwozia zawierała się w przedziale 1–2 Hz. Uproszczony model drgający pojazdu przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Uproszczony dwumasowy model pojazdu o dwóch stopniach swobody: m_r – masa resorowana, m_n – masa nieresorowana, k_z – sztywność całego zawieszenia, c_z – współczynnik tłumienia całego zawieszenia, k_o – sztywność ogumienia, c_o – współczynnik tłumienia ogumienia [3]

Zmniejszenie sztywności zawieszenia powoduje wzrost komfortu jazdy, ale i większe przemieszczenia kół i nadwozia. Znaczne ugięcia zawieszenia wpływają negatywnie na stateczność ruchu pojazdu oraz wielkość bocznych i wzdłużnych przechyłów nadwozia.

Eksploatacja pojazdu samochodowego przekłada się na trwałość sprężyn. Szczególnie negatywne w tym zakresie są zmęczenie materiału oraz korozja elektrochemiczna. Pojawia się ona na zwojach sprężyny, powodując znaczące ubytki w elemencie. W połączeniu ze zmiennymi naprężeniami powoduje zarodkowanie i rozprzestrzenianie pęknięcia, co prowadzi do zniszczenia elementu [2].

Celem podjętych prac było wyznaczenie charakterystyk sztywności nowych oraz używanych sprężyn śrubowych stosowanych w zawieszeniach pojazdów samochodowych. Do jego realizacji przeprowadzono badania doświadczalne z wykorzystaniem autorskiego układu pomiarowego oraz obliczenia komputerowe. Analizie poddano zarówno pojedyncze sprężyny, jak i układy równoległe sprężyn.

2. BADANIA DOŚWIADCZALNE SPRĘŻYN

2.1. Obiekt i metodyka badań

Badaniom poddano sprężyny montowane w pojazdach BMW serii 3, generacji E30 w wersji touring. Oprócz czterech nowych sprężyn (które oznaczono numerami 1–4), zbadano także cztery wymontowane z aut używanych, w których były eksploatowane od nowości. Dwie z nich wyprodukowano w roku 1989, a przebieg pojazdu, z którego je wymontowano, wynosił 125 tys. km. Miały one na powierzchni niewielkie ogniska korozji. Sprężyny te oznaczono numerami 5, 6. Pozostałe dwie wyprodukowano w roku 1990. Pochodziły z auta o przebiegu 196 tys. km i nosiły ślady licznych ognisk korozji. Oznaczono je numerami 7, 8. Sposób eksploatacji aut, z których wymontowano sprężyny, jest nieznany. Sprężyny poddane badaniom przedstawiono na rysunku 3, natomiast ich podstawowe dane geometryczne zamieszczono w tabeli 1.

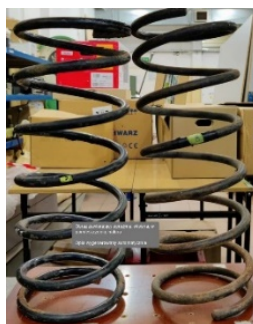
a)



b)



c)



Rys. 3. Widok ogólny sprężyn: a) nowych, oznaczonych numerami 1–4, b) używanych 5 i 6, c) używanych 7 i 8 (opracowanie własne)

Tab. 1. Podstawowe dane dotyczące badanych sprężyn [4]

Numer sprężyny	Średnica wewnętrzna D_w [mm]	Średnica zewnętrzna D_z [mm]	Średnica drutu d [mm]	Liczba zwojów czynnych n	Długość swobodna sprężyny L_o [mm]
1	116,6	141	12,5	6	375
2	116,5	141,1	12,51	6	375
3	116,5	141	12,5	6	375
4	116,5	141,2	12,5	6	375
5	116,1	140,8	12,35	6	375
6	116	140,8	12,25	6	375
7	115,7	140,5	12,10	6	375
8	115,8	140,6	12,18	6	375

Badania doświadczalne przeprowadzono na maszynie wytrzymałościowej ZD 40 (rys. 4).



Rys. 4. Widok ogólny maszyny wytrzymałościowej ZD 40 (opracowanie własne)

Wybrane parametry maszyny zamieszczono w tabeli 2.

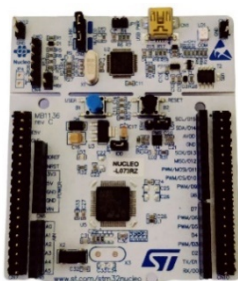
Tab. 2. Wybrane parametry maszyny wytrzymałościowej ZD 40 (opracowanie własne)

Zakres pomiarowy	Dokładność wskazań siły w poszczególnych zakresach pomiarowych
0÷400 kN	do 40 kN – 20 daN
	do 100 kN – 50 daN
	do 200 kN – 100 daN
	do 400 kN – 200 daN

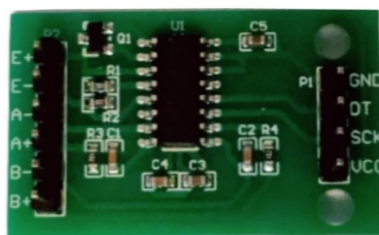
Dokładność wskazań maszyny okazała się zbyt mała do realizacji prób ściskania, dlatego postanowiono przygotować układ pomiarowy, którego podstawowe elementy przedstawiono na rysunku 5. Należą do nich:

- mikrokontroler STM32 F446RET6,
- wzmacniacz operacyjny/przetwornik analogowo-cyfrowy HX711,
- czujnik tensometryczny Keli SQB-A (2-tonowy),
- wyświetlacz OLED Waveshare 0,95 cala.

a)



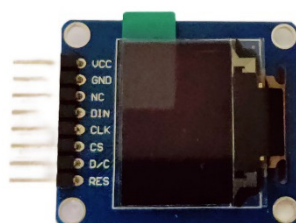
b)



c)

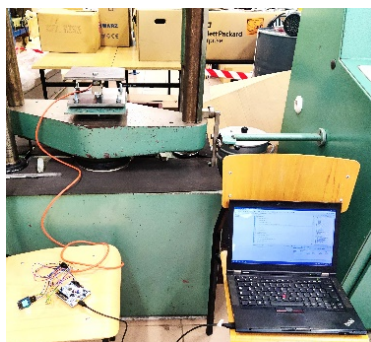


d)



Rys. 5. Elementy składowe układu pomiarowego: a) mikrokontroler STM32 446RET6, b) wzmacniacz/przetwornik HX711, c) czujnik tensometryczny Keli SQB – A, d) wyświetlacz Waveshare (opracowanie własne)

Widok ogólny kompletnego układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 6.



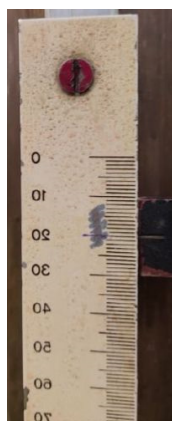
Rys. 6. Widok ogólny układu pomiarowego (opracowanie własne)

W pierwszym etapie badaniom poddano pojedyncze sprężyny zarówno nowe, jak i używane (rys. 7). W kolejnym przebadano układy równoległe sprężyn nowych i używanych (rys. 8).



Rys. 7. Widok ogólny pojedynczej sprężyny (opracowanie własne) Rys. 8. Widok ogólny układu czterech sprężyn (opracowanie własne)

Badania sprężyn odbywały się poprzez przykładanie obciążenia ściskającego i odczytywanie wartości ugięcia (co 20 mm) na przymiarze kreskowym maszyny (rys. 9). Wartość przykładanej siły ściskającej odczytywano na wyświetlaczu układu pomiarowego. Z uwagi na bezpieczeństwo badania przeprowadzano do ugięcia sprężyn wynoszących 160 mm (rys. 10).



Rys. 9. Widok ogólny przymiaru kreskowego maszyny ZD 40 (opracowanie własne)

Rys. 10. Widok ogólny sprężyny odkształconej o 160 mm (opracowanie własne)

2.2. Wyniki badań

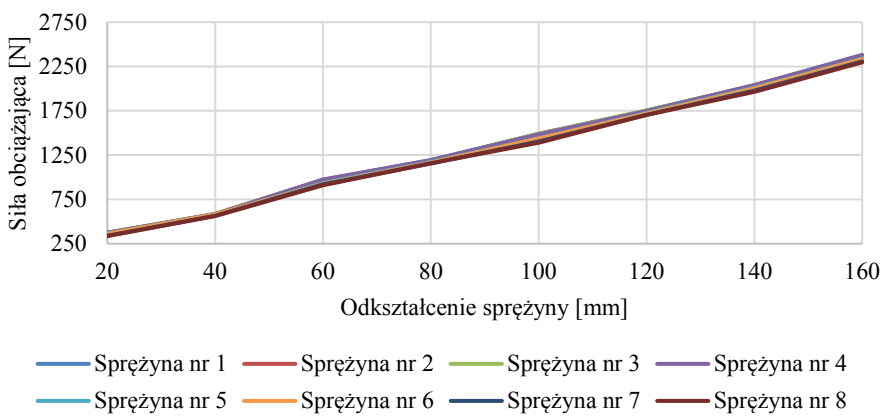
W tabelach 3 i 4 zamieszczono wyniki badań doświadczalnych pojedynczych sprężyn, a w tabeli 5 – ich układów. Wykresy odpowiadające uzyskanym wynikom przedstawiono na rysunkach 11 i 12.

Tab. 3. Wyniki badań doświadczalnych dla nowych sprężyn [4]

Numer pomiaru	Odkształcenie sprężyny [mm]	Siła obciążająca [N]			
		Sprężyna 1	Sprężyna 2	Sprężyna 3	Sprężyna 4
1	20	372	371	375	374
2	40	585	587	584	580
3	60	970	969	968	972
4	80	1189	1185	1192	1194
5	100	1490	1485	1490	1483
6	120	1751	1749	1753	1748
7	140	2031	2038	2032	2040
8	160	2378	2366	2375	2380

Tab. 4. Wyniki badań doświadczalnych dla używanych sprężyn [4]

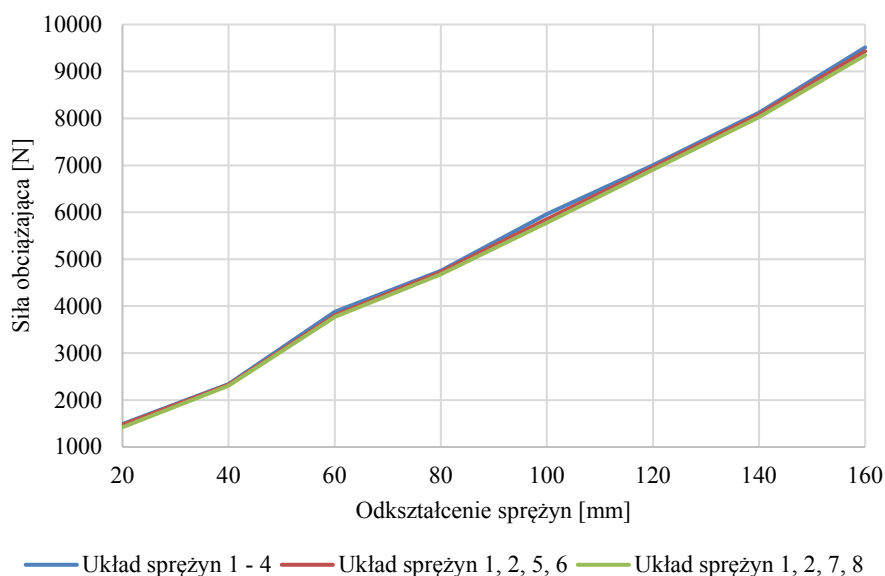
Numer pomiaru	Odkształcenie sprężyny [mm]	Siła obciążająca [N]			
		Sprężyna 5	Sprężyna 6	Sprężyna 7	Sprężyna 8
1	20	364	361	339	336
2	40	576	578	564	561
3	60	932	925	918	909
4	80	1173	1164	1153	1156
5	100	1437	1437	1404	1388
6	120	1726	1716	1705	1705
7	140	2010	2004	1977	1964
8	160	2337	2333	2307	2296



Rys. 11. Charakterystyki sztywności pojedynczych sprężyn [4]

Tab. 5. Wyniki badań doświadczalnych układów równoległych sprężyn [4]

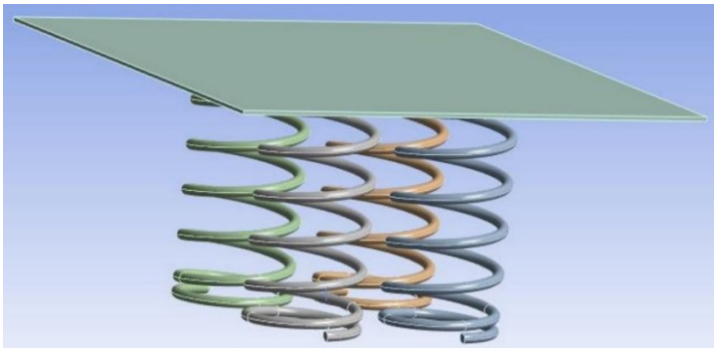
Numer pomiaru	Odkształcenie sprężyn [mm]	Siła obciążająca [N]		
		Sprężyny 1, 2, 3, 4	Sprężyny 1, 2, 5, 6	Sprężyny 1, 2, 7, 8
1	20	1488	1472	1420
2	40	2340	2322	2302
3	60	3880	3804	3774
4	80	4756	4724	4676
5	100	5960	5854	5778
6	120	7004	6954	6908
7	140	8124	8082	8030
8	160	9512	9430	9346



Rys. 12. Charakterystyki sztywności układów sprężyn (opracowanie własne)

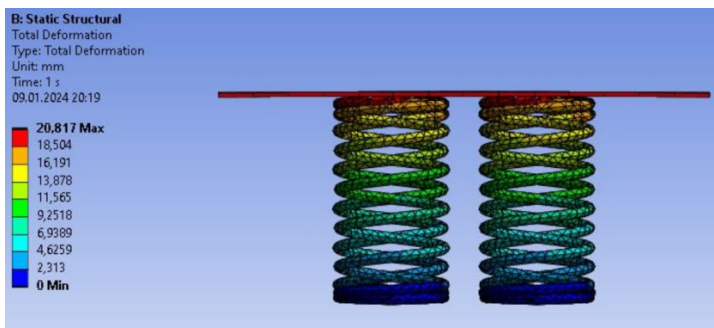
3. OBLICZENIA KOMPUTEROWE

W celu zweryfikowania poprawności przeprowadzonych badań doświadczalnych postanowiono przeprowadzić symulacje komputerowe z zastosowaniem oprogramowania Ansys Mechanical. Do obliczeń zastosowano zaimportowane z programu Autodesk Inventor geometrie sprężyn oraz układów sprężyn (rys. 13).



Rys. 13. Układ sprężyn zaimportowany z programu Autodesk Inventor [4]

Analogicznie jak w przypadku badań doświadczalnych wyznaczano zależność siły obciążającej w funkcji odkształcenia. Przykładowy obraz z przeprowadzanych obliczeń symulacyjnych zamieszczono na rysunku 14.



Rys. 14. Odkształcenie układu sprężyn dla zadanej wartości obciążenia [4]

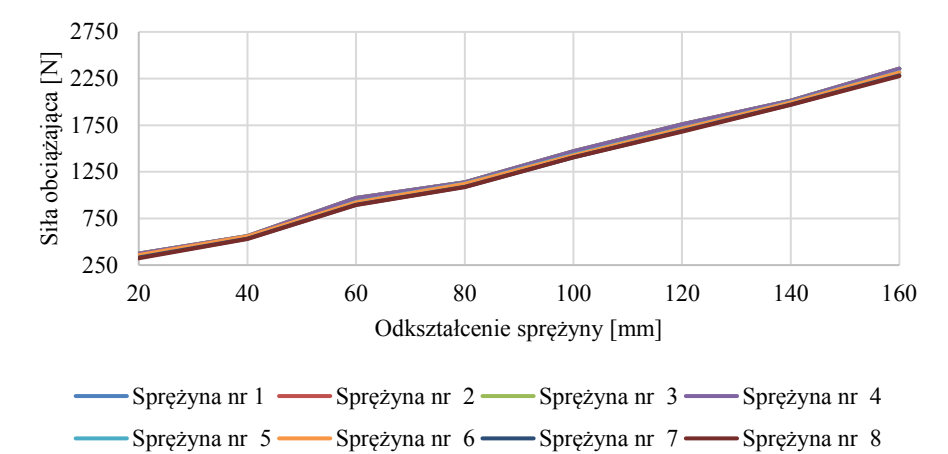
W tabelach 6 i 7 zamieszczono wyniki badań doświadczalnych pojedynczych sprężyn, a w tabeli 8 – ich układów. Wykresy odpowiadające uzyskanym wynikom przedstawiono na rysunkach 15 i 16.

Tab. 6. Wyniki obliczeń komputerowych dla nowych sprężyn [4]

Numer pomiaru	Odkształcenie sprężyny [mm]	Siła obciążająca sprężyny 1, 2, 3, 4 [N]
1	20	373
2	40	560
3	60	969
4	80	1136
5	100	1470
6	120	1757
7	140	2013
8	160	2356

Tab. 7. Wyniki obliczeń komputerowych dla używanych sprężyn [4]

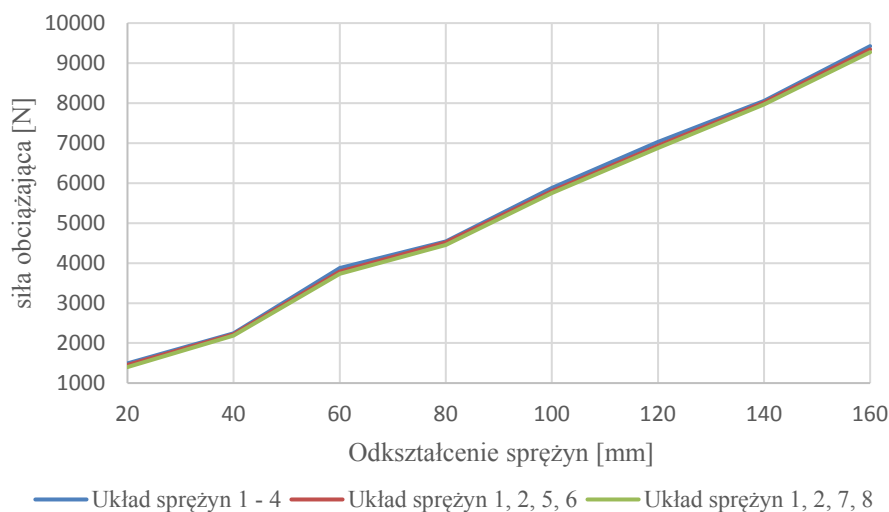
Numer pomiaru	Odształcenie sprężyny [mm]	Siła obciążająca [N]			
		Sprężyna 5	Sprężyna 6	Sprężyna 7	Sprężyna 8
1	20	350	358	331	323
2	40	543	557	535	531
3	60	926	922	898	895
4	80	1123	1120	1090	1087
5	100	1431	1427	1405	1404
6	120	1713	1709	1687	1680
7	140	1997	1992	1972	1968
8	160	2317	2314	2284	2276



Rys. 15. Charakterystyki sztywności pojedynczych sprężyn [4]

Tab. 8. Wyniki obliczeń komputerowych dla układów równoległych sprężyn [4]

Numer pomiaru	Odształcenie sprężyn [mm]	Siła obciążająca [N]		
		Sprężyny 1, 2, 3, 4	Sprężyny 1, 2, 5, 6	Sprężyny 1, 2, 7, 8
1	20	1492	1454	1400
2	40	2240	2220	2186
3	60	3876	3786	3731
4	80	4544	4515	4449
5	100	5880	5798	5749
6	120	7028	6936	6881
7	140	8052	8015	7966
8	160	9424	9343	9272



Rys. 16. Charakterystyki sztywności układów sprężyn [4]

4. WNIOSKI

1. Wyniki uzyskane z przeprowadzonych badań doświadczalnych okazały się zbliżone z wynikami uzyskanymi z symulacji komputerowych.
2. Na podstawie rezultatów prac można zauważyć, że charakterystyki sprężyn nowych są odmienne od charakterystyk sprężyn używanych. Eksploatacja pojazdu spowodowała zmniejszenie sztywności pojedynczych sprężyn oraz ich układów. Dlatego aby zapewnić odpowiednią stateczność ruchu pojazdu, należałoby wymieniać sprężyny parami na każdej osi.

LITERATURA

- [1] Biały W., 2003. Maszynoznawstwo. WNT, Warszawa.
- [2] BS EN 13906-1:2013 – Cylindrical helical springs made from round wire and bar – Calculation and design Part 1: Compression springs.
- [3] Gabrylewicz M., 2011. Podwozia i nadwozia pojazdów samochodowych. WKiŁ, Warszawa.
- [4] Szczukowski Sz., 2024. Analiza wpływu zużycia na sztywność wybranych układów sprężyn samochodowych. Praca magisterska, niepublikowana.
- [5] Wittek A.M., Gąska D., Łazarz B., Matyja T., 2016. Coil springs in passenger cars – general theoretical principles and structural requirements. The Archives of Automotive Engineering 72(2), 141–159.



**POLITECHNIKA
BYDGOSKA**
Wydawnictwa Uczelniane

ISBN 978-83-68285-14-7