

Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu

Kazimierz Opoka

**Wpływ warunków eksploatacji
na układ zawieszenia samochodu**

Nowy Sącz 2024

Redaktor Naukowy

dr hab. inż. Sławomir Kowalski, prof. ANS

Recenzja

dr hab. inż. Krzysztof Słowiński, prof. URK

Redaktor Techniczny

dr Tamara Bolanowska-Bobrek

© Copyright by Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu
Nowy Sącz 2024

ISBN 978-83-67661-28-7

Wydawca

Akademia Nauk Stosowanych w Nowym Sączu
ul. Staszica 1, 33-300 Nowy Sącz
tel.: +48 18 443 45 45, e-mail: sog@ans-ns.edu.pl
www.ans-ns.edu.pl

Adres redakcji

Wydawnictwo Naukowe Akademii Nauk Stosowanych w Nowym Sączu
ul. Staszica 1, 33-300 Nowy Sącz
tel.: +48 18 443 45 45, e-mail: wn@ans-ns.edu.pl, tbolanowska@ans-ns.edu.pl
wydawnictwo.ans-ns.edu.pl

Druk

Wydawnictwo i drukarnia NOVA SANDEC s.c.
Mariusz Kałyniuk, Roman Kałyniuk
ul. Lwowska 14, 33-300 Nowy Sącz
tel.: +48 18 441 02 88, e-mail: biuro@novasandec.pl

Spis treści

1. Wstęp	5
2. Stan wiedzy na temat układów zawieszenia pojazdów drogowych	8
2.1. Rys historyczny	8
2.2. Aktualne rozwiązania konstrukcyjne układów zawieszenia	12
2.3. Układy zawieszenia pojazdów w świetle dotychczasowych badań naukowych	20
3. Warunki pracy układów zawieszenia	26
3.1. Czynniki statyczne i dynamiczne	27
3.2. Czynniki środowiskowe i eksploatacyjne	31
4. Formy zużycia i uszkodzenia elementów układów zawieszenia	34
4.1. Zużycia tribologiczne	35
4.2. Zużycia nietribologiczne	39
4.3. Zużycia mechaniczne i pozostałe	45
4.4. Analiza danych statystycznych odnośnie badań diagnostycznych	46
5. Cel i zakres pracy	55
6. Metodyka badań	57
6.1. Przedmiot badań	58
6.2. Warunki pracy	60
6.3. Urządzenia laboratoryjne i pomiarowe oraz metodyka badań	63
6.3.1. Pomiar nawierzchni drogi	63
6.3.2. Obserwacje makrograficzne	64
6.3.3. Badania mikrograficzne z analizą EDS	65
6.3.4. Pomiar topografii powierzchni	65
6.3.5. Pomiar twardości powierzchni belki i złącza spawanego	69
6.3.6. Wyznaczenie charakterystyk tulei wahacza	71
7. Analiza wyników badań laboratoryjnych	74
7.1. Pomiar równości nawierzchni drogi	74
7.2. Belka zawieszenia	78
7.2.1. Obserwacje makrograficzne	78
7.2.2. Ocena topografii powierzchni	85
7.2.3. Obserwacje mikroskopowe wraz z analizą EDS	94
7.2.4. Ocena stanu technicznego złącza spawanego belki	100
7.2.5. Twardość powierzchni belki i złącza spawanego	102

7.3. Drażek stabilizatora	103
7.3.1. Obserwacje makroskopowe.....	103
7.3.2. Ocena topografii powierzchni.....	105
7.4. Wahacz i tuleja metalowo-gumowa	112
7.4.1. Obserwacje makroskopowe wahacza.....	112
7.4.2. Obserwacje makroskopowe tulei metalowo-gumowych	113
7.4.3. Charakterystyki tulei metalowo-gumowych.....	113
7.5. Elementy usprężynowania	118
7.5.1. Sprężyna McPhersona.....	119
8. Szacowanie wskaźników niezawodności układu zawieszenia	122
8.1. Wiadomości ogólne	122
8.2. Szacowanie wskaźników niezawodnościowych	123
9. Podsumowanie i wnioski	131
9.1. Wnioski o charakterze poznawczym	132
9.2. Wnioski o charakterze użytkowym	133
9.3. Wnioski dotyczące dalszych badań.....	134
Bibliografia	135

1. Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się dynamiczny rozwój motoryzacji w zakresie konstrukcji, dzięki czemu pojazdy stają się coraz bezpieczniejsze, i to niezależnie od osiąganego prędkości jazdy. Analizując dane statystyczne dotyczące pojazdów zarejestrowanych w Polsce, można zauważyć duży wzrost liczby użytkowanych samochodów w ostatnim dziesięcioleciu. Dla porównania, w 2011 roku zarejestrowanych było ok. 24 mln pojazdów, a w roku 2021 już ponad 33 mln.

Przedstawiona sytuacja przekłada się na znaczny ruch samochodowy, w którym biorą udział pojazdy o różnicowanym stanie technicznym. Widoczne są pojazdy nowe, o dużym wskaźniku niezawodności, a także samochody używane, eksploatowane, ze znacznym przebiegiem. Stan techniczny takich pojazdów jest z reguły niski, co przekłada się na częste i niespodziewane uszkodzenia ich elementów.

Istotnym czynnikiem wpływającym na stan techniczny pojazdu (a w szczególności układu zawieszenia) jest stan dróg. Chociaż zwiększa się w Polsce liczba autostrad, dróg szybkiego ruchu i obwodnic miast, stan techniczny nawierzchni wielu dróg jest zły. Nierzadko spotyka się koleiny, ubytki w nawierzchni o znacznej głębokości, garby itp. Szereg dróg jest przebudowywanych bez wyłączenia ich z ruchu, co powoduje dużą zmienność nawierzchni (np. nawierzchnie asfaltowe, sfrezowane, z podłożem zagęszczonego budulca).

Duże natężenie ruchu drogowego wymaga od kierującego wzmożonej uwagi i większych umiejętności kierowania pojazdem, szczególnie po drogach o złym stanie technicznym. Ich brak może prowadzić do uszkodzenia układu zawieszania, a w efekcie nawet do zdarzenia drogowego.

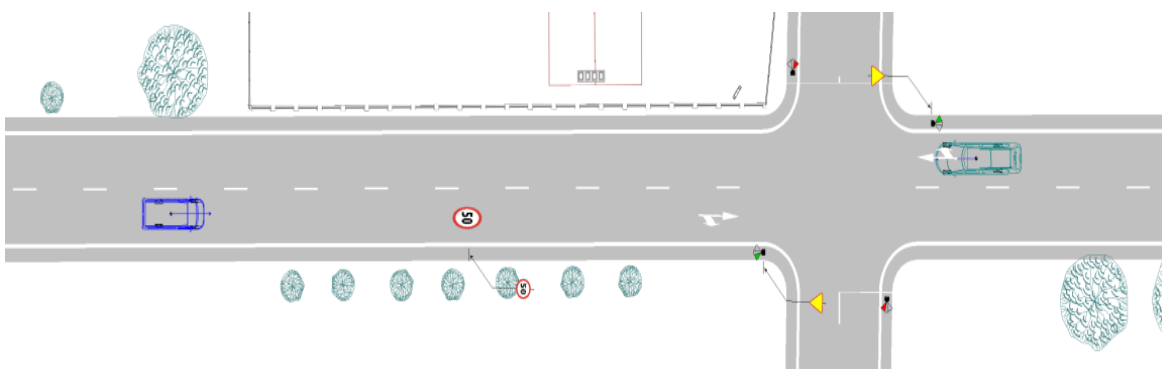
Z punktu widzenia budowy pojazdu jednym z najważniejszych elementów konstrukcyjnych odpowiedzialnych za komfort oraz bezpieczeństwo jazdy jest układ zawieszenia. Konstruktorzy sukcesywnie go ulepszają. Stosując m.in. nowoczesne materiały inżynierskie, nowe konstrukcje czy technologie wykonania, znacząco podnoszą trwałość i niezawodność samochodów. Pomimo wszystkich tych ulepszeń w dalszym ciągu odnotowuje się uszkodzenia elementów układu zawieszenia. Wpływ na ich powstawanie mają z jednej strony warunki drogowe i środowiskowe, a z drugiej – umiejętności kierowców.

Chociaż pojazdy podlegają obowiązkowym przeglądom technicznym i pracom serwisowym wynikającym z okresu eksploatacji, często dochodzi do nieoczekiwanych uszkodzeń elementów układu zawieszenia. Może to wynikać z braku rozpoznania mikropęknięć lub innych wad materiałowych, których nie da się zidentyfikować organoleptycznie bądź za pomocą dostępnych przyrządów serwisowych. Z czasem mogą one się rozwijać, szczególnie podczas jazdy w trudnych warunkach drogowych. Uszkodzenia niewykryte na czas rozwijają się i przekształcają w zużycie zmęczeniowe, którego konsekwencją jest pęknięcie elementu.

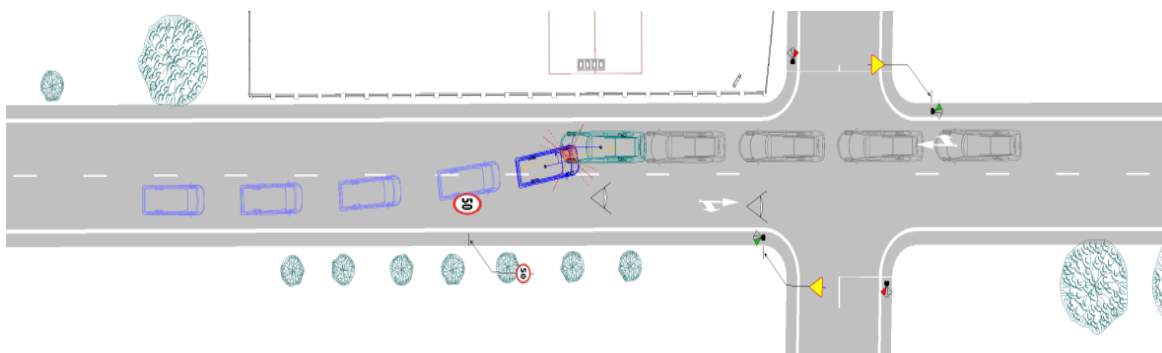
Podnosząc rangę ważności układu zawieszenia w pojeździe, należy zaznaczyć, że nagłe pęknięcie któregośkolwiek elementu układu zawieszenia doprowadzi do zdarzenia drogowego, a jego skutki zależne będą od reakcji kierującego, warunków drogowych,

prędkości poruszającego się pojazdu i natężenia ruchu. Jak podają analizy statystyczne, ok. 5% zdarzeń drogowych wynika z nieoczekiwanych uszkodzeń elementów pojazdu, w tym układu zawieszenia.

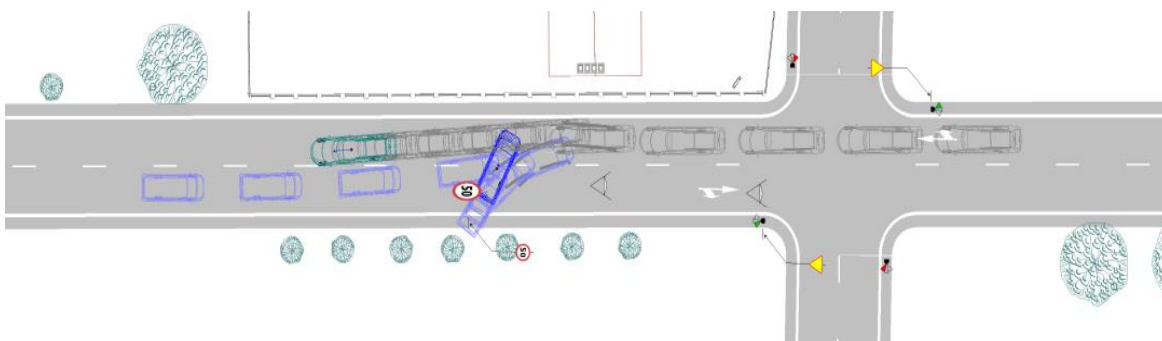
Przykład zachowania się pojazdu, w którym doszło do przemieszczenia lewego przedniego koła o kąt o wartości 4° w wyniku nagłego uszkodzenia elementu układu zawieszenia, prezentuje symulacja wykonana w programie V-SIM 5.0. W symulacji tej założono, że w chwili uszkodzenia układu zawieszenia pojazd dostawczy o masie własnej 1 937 kg (kolor niebieski) poruszał się z prędkością 60 km/h, a kierowca nie zdołał utrzymać jego toru jazdy na prawym pasie ruchu. Natężenie ruchu w tym momencie było niewielkie, tzn. z przeciwnego kierunku nadjeżdżał tylko jeden samochód dostawczy o masie własnej 5 200 kg (kolor zielony) również z prędkością 60 km/h. Na rysunkach 1.1-1.3 przedstawiono opisaną sytuację drogową.



Rysunek 1.1. Sytuacja drogową w stanie początkowym.
Źródło: opracowanie własne.

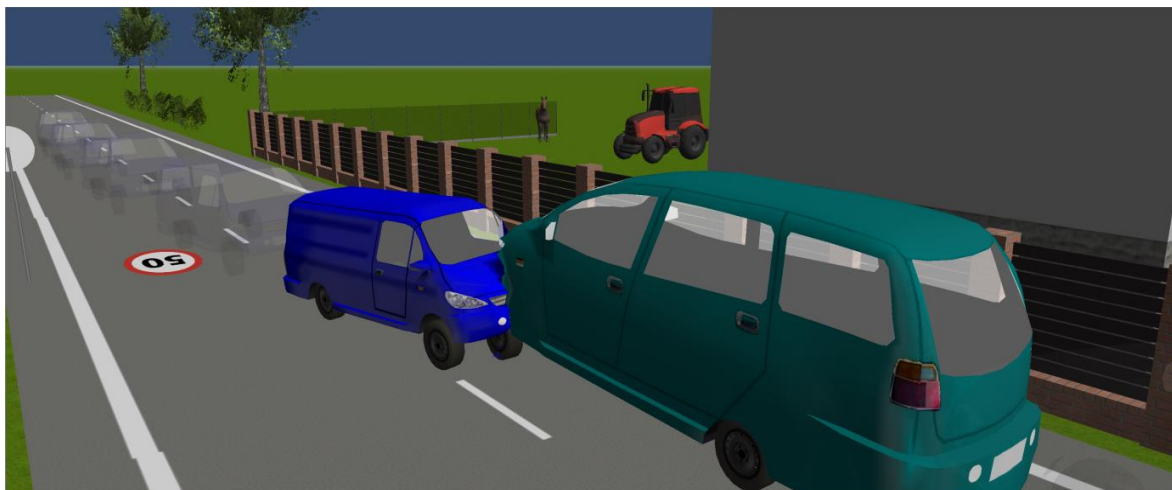


Rysunek 1.2. Sytuacja drogową w chwili zderzenia.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 1.3. Sytuacja drogową po zderzeniu.
Źródło: opracowanie własne.

Skutkiem uszkodzenia układu zawieszenia było przemieszczenie koła. Spowodowało ono nagłą zmianę toru jazdy na pas lewy. Po tym, jak samochód przejechał odcinek drogi o długości ok. 30 m, doszło do zderzenia. W jego wyniku powstały znaczne uszkodzenia obu pojazdów oraz infrastruktury przy drodze. Obrys uszkodzeń zderzonych stref przedstawia wizualizacja 3D (rysunki 1.4 i 1.5). Uczestnicy wypadku odnieśli niewielkie obrażenia. Skutki uszkodzenia elementów układu zawieszenia przy prędkości wyższej, np. równej dopuszczalnej na autostradzie, mogłyby być dotkliwsze, włącznie z ofiarami śmiertelnymi.



Rysunek 1.4. Wizualizacja 3D sytuacji drogowej w chwili zderzenia.

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 1.5. Wizualizacja 3D sytuacji drogowej po wypadku.

Źródło: opracowanie własne.

Mając na uwadze wpływ stanu technicznego układu zawieszenia na bezpieczeństwo i komfort jazdy, w niniejszej pracy podjęto próbę analizy uszkodzeń oraz zużycie wybranych elementów tego układu dla samochodu dostawczego, uwzględniając warunki drogowe oraz środowiskowe. W analizie uwzględniono takie elementy układu, jak: belka zawieszenia, drążek stabilizatora, wahacz wraz z tulejami metalowo-gumowymi oraz sprężynę McPhersona.

2. Stan wiedzy na temat układów zawieszenia pojazdów drogowych

Układy zawieszenia pojazdów drogowych, jak każdy inny element samochodu, ciągle się ulepsza, aby zwiększyć jakość i bezpieczeństwo podróży. W niniejszym rozdziale przedstawiony został krótki rys historyczny oraz aktualnie wykorzystywane rozwiązania konstrukcyjne układów zawieszenia.

2.1. Rys historyczny

Analizując historię powstania samochodu i jego napędu, bez trudu można zauważyć, że była to adaptacja pojazdu zaprzęgowego do pojazdu poruszającego się samodzielnie. Ewolucja budowy pojazdów jeżdżących samodzielnie (w tym zmieniające się rozwiązania dotyczące napędu) wymagała równoczesnego rozwoju budowy elementów łączących nadwozie z podwoziem, czyli zespołem, który poprzez koła bezpośrednio współpracował z drogą. Zatem do zadań zespołów podwoziowych należało przeniesienie mocy silnika na koła, utrzymywanie zadanego toru jazdy, z osiągnięciem odpowiedniego poziomu sterowności pojazdem oraz zapewnienie komfortu jazdy pasażerom. Stąd też do sztywnych, całościowych konstrukcji wprowadzano elementy rozdzielające część nadwoziową (czyli miejsce przewożenia osób lub ładunków) od części podwoziowej współpracującej bezpośrednio z drogą.

Ówczesne zawieszenia w wozach ciągniętych przez zwierzęta miały formę platformy zawieszanej na żelaznych łańcuchach, które przymocowane były do ramy osadzonej na osi zestawu kół. Z postępem czasu żelazne łańcuchy zostały zastąpione przez skórzane pasy nazywane *thoroughbraces* (rysunek 2.1), na których opierał się korpus wozu.



Rysunek. 2.1. Przykład układu zawieszenia ówczesnych pojazdów drogowych.
Źródło: www.modelexpoonline.com.

Dalsze ewolucyjne zmiany to zastosowanie w wozach konnych (Landau) resorów piórowych, które szybko zyskały popularność dzięki swoim własnościom tłumiącym.

Źródła historyczne wskazują, że resor piórowy (rysunek 2.2) pojawił się w 1616 roku na kartach książki o maszynach (*Machinae Novae*) autorstwa włoskiego wynalazcy Fausto Veranzio. Nadwozie na eliptycznych sprężynach przymocowanych bezpośrednio do osi opatentował w 1804 roku O. Elliott. Jednym z ostatnich samochodów osobowych z resorem piórowym w zawieszeniu (pełniącym jednocześnie funkcję stabilizatora) był fiat 126p, którego produkcję rozpoczęto w Bielsku Białej w roku 1973, a zakończono w roku 2000.



Rysunek 2.2. Widok pierwszego w historii resoru piórowego.

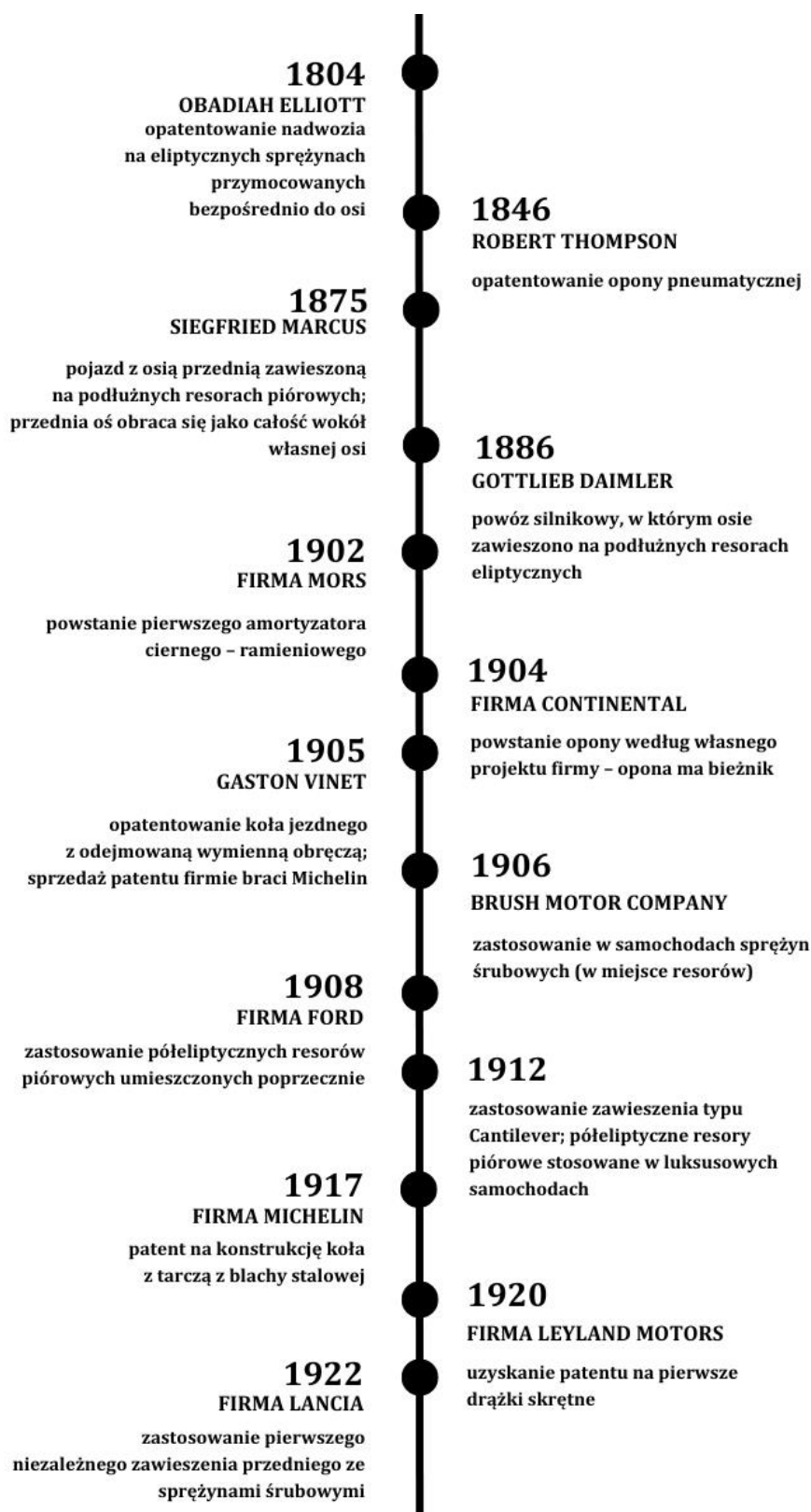
Źródło: rycina pochodzi z książki *Machinae Novae*.

Z biegiem lat rozwój układu zawieszenia postępował. Ówcześni konstruktorzy proponowali nowe rozwiązania, wpływające na poprawę komfortu podróży. Jedną z takich propozycji jest resor poprzeczny zastosowany w fordzie T (przedstawionym na rysunku 2.3). Historię postępu konstrukcyjnego układu zawieszenia, ze wskazaniem istotnych dat, przedstawiono na osi czasu (rysunki 2.4 i 2.5).



Rysunek 2.3. Ford T, w którym zabudowano resor poprzeczny.

Źródło: *Samochody osobowe. Dzieje rozwoju*, A. Zieliński, 2009, Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności Sp. z o.o.



Rysunek 2.4. Historia rozwoju samochodów i ich układów zawieszenia – lata 1804-1922.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 2.5. Historia rozwoju samochodów i ich układów zawieszenia – lata 1923-1998.
Źródło: opracowanie własne.

2.2. Aktualne rozwiązania konstrukcyjne układów zawieszenia

Zawieszenia samochodowe to układy dynamiczne, które w sposób bezpośredni wpływają na komfort jazdy, a także na bezpieczeństwo podróży (Burdzik, Konieczny, Adamczyk, 2014). Na układy zawieszenia działają siły statyczne, pochodzące od masy pojazdu i utrzymujące nadwozie w założonej pozycji, a także siły dynamiczne wynikające z ruchu pojazdu.

Obecne układy zawieszenia pojazdów muszą spełniać wiele różnych wymagań (uwzględniających warunki jazdy), do których można zaliczyć: przyspieszanie oraz hamowanie pojazdu, jazdę bez obciążenia i przy zmiennym obciążeniu, jazdę w ruchu prostym i krzywoliniowym oraz poruszanie się po nawierzchni drogi o zróżnicowanej geometrii. Aby zaspokoić potrzeby wynikające z wysokich standardów jazdy, projektanci proponują coraz to nowsze rozwiązania konstrukcyjne układów zawieszenia. Aktualny podział rozwiązań konstrukcyjnych przedstawiono na rysunku 2.6.

Układ zawieszenia		
ze względu na sposób prowadzenia kół jezdnych	ze względu na rodzaj zastosowanych elementów sprężystych	ze względu na możliwość dostosowania charakterystyki zawieszenia w zależności od obciążenia pojazdu i stanu drogi
zależne	z elementami stalowymi	aktywne
niezależne	z elementami gumowymi i z tworzyw sztucznych	pasywne
półzależne	z elementami pneumatycznymi	semiaktywne
	z elementami hydropneumatycznymi	
	z elementami hydroelastycznymi	
	z elementami elektromagnetycznymi	

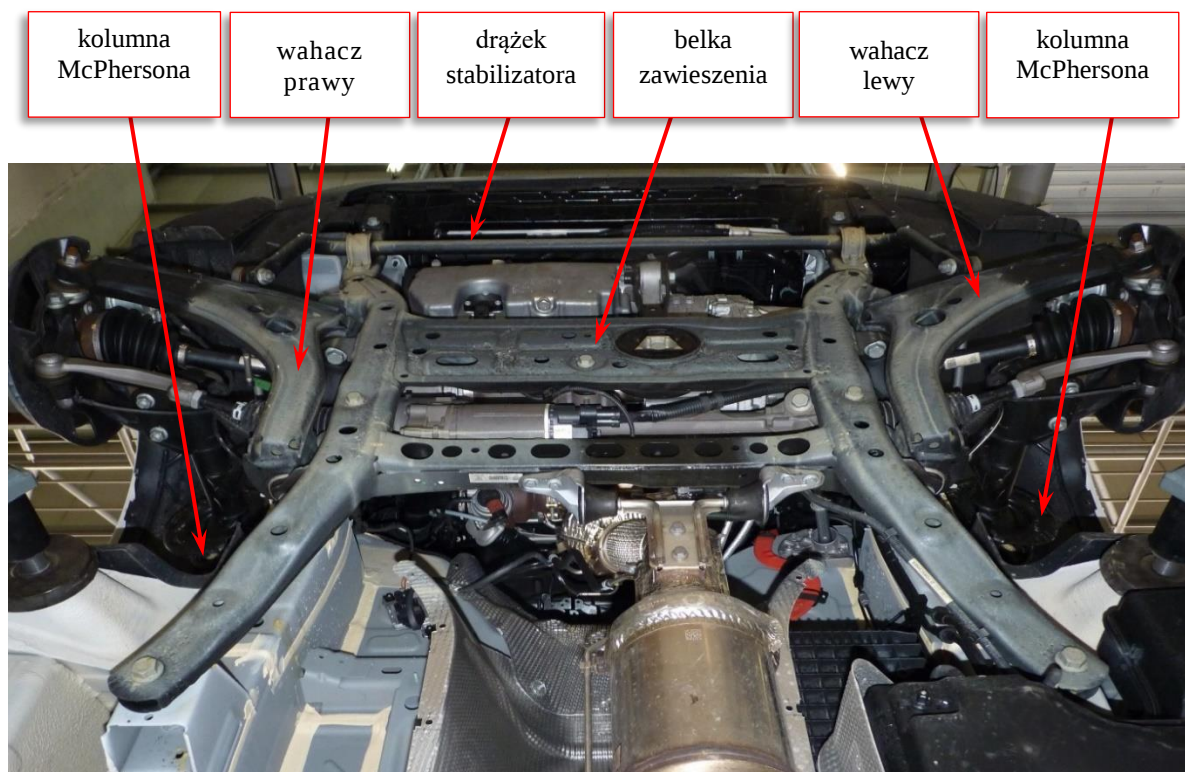
Rysunek 2.6. Podział układów zawieszenia.

Źródło: opracowanie własne.

W każdego rodzaju zawieszeniach zawsze znajdują się:

- elementy sprężyste, których zadaniem jest neutralizowanie sił wynikających z nierówności drogi, oddziaływania oporów ruchu oraz sił napędowych (zapewniają one maksymalne zmniejszenie ruchu pionowego nadwozia względem mas resorowanych, a do elementów tych zalicza się sprężyny śrubowe, resory);
- elementy tłumiące, których zadaniem jest ciągle tłumienie ruchów, w tym drgań nadwozia, proporcjonalnych do prędkości ugięcia zawieszenia (wpływają na ciągłość kontaktu kół z jezdnią, do elementów tych zalicza się amortyzatory);
- elementy prowadzące, które stanowią łącznik między elementami zawieszenia a nadwoziem pojazdu, tworząc mechanizmy ustalające pozycje kół względem pojazdu oraz podłoża jego ruchu (do elementów tych zalicza się drążek stabilizatora, wahacze).

Przywołane elementy przedniego zwieszenia samochodu dostawczego widoczne są na rysunku 2.7. Jest to przykład zawieszenia niezależnego, w którym elementem prowadzącym, nośnym i tłumiącym drgania jest tzw. kolumna prowadząca McPhersona.



Rysunek 2.7. Przykład zawieszenia niezależnego zabudowanego w samochodzie dostawczym.

Na powyższym rysunku zaprezentowano zawieszenie niezależne, które charakteryzuje się oddzielnym układem elementów prowadzących, co umożliwia niezależną pracę kół. W przypadku tego typu zawieszenia zwiększenie liczby elementów prowadzących koła (i związane z tym zwiększenie liczby płaszczyzn ruchu kół) wpływa na wzrost możliwości zapewnienia właściwego przekazywania sił na nadwozie (Reimpell, Betler, 2008).

Obok wspomnianych wcześniej niezależnych układów zawieszenia w konstrukcji pojazdów można spotkać układy zawieszenia zależne i półzależne.

W układach zawieszenia zależnych koła połączone są ze sobą na sztywno przez belkę osi nienapędzanej lub obudowę mostu napędowego. Zasada działania tego typu układów zawieszenia polega na tym, że jeżeli jedno koło przechyli się, to drugie również zmieni swoją pozycję. Takie rozwiązania układów zawieszenia najczęściej wykorzystywane są w pojazdach ciężarowych oraz terenowych (Dishant i in., 2017). Wadami zależnych układów zawieszenia są: wzajemne oddziaływanie na siebie kół danej osi, pogorszenie komfortu jazdy, ograniczona sterowność pojazdu.

Półzależne układy zawieszenia w swojej konstrukcji mają wahacze wzdłużne połączone na belce poprzecznej. W tego typu rozwiązaniach w ograniczonym zakresie umożliwiające są wzajemne ruchy kątowe każdego z kół (Gabrylewicz, 2015). Układy te charakteryzuje zwarta konstrukcja, gdzie belka skrętna pełni funkcję stabilizatora. Do głównych wad półzależnych układów zawieszenia należą: słaba izolacja nadwozia od wstrząsów wynikających z nierówności nawierzchni jezdni, wysokie naprężenia skrętne i tnące działające na belkę poprzeczną i wzajemne oddziaływanie ruchów kół na siebie.

Każdemu z wymienionych układów zawieszenia stawia się następujące wymagania (Reimpell, Betler, 2008):

- niezależne od siebie przemieszczenia kół danego zawieszenia (z wyjątkiem zawieszenia ze sztywną osią);
- małe masy nieresorowane zawieszenia, w celu zapewnienia możliwie małych zmian obciążeń dynamicznych kół;
- właściwe wprowadzenie w nadwozie sił pochodzących od kół;
- małe wymiary i prostota konstrukcji z uwzględnieniem możliwych do uzyskania tolerancji geometrycznych i wytrzymałościowych;
- łatwość naprawy;
- uwzględnienie wymagań dotyczących bezpieczeństwa biernego pasażerów i innych uczestników ruchu;
- ograniczony koszt produkcji.

Oprócz wymienionych wymagań decydujący wpływ na konstrukcję układu zawieszenia ma kierowność pojazdu i możliwość przenoszenia momentu napędowego.

Inny podział układów zawieszenia rozróżnia układy zawieszenia aktywne, pasywne i semiaktywne.

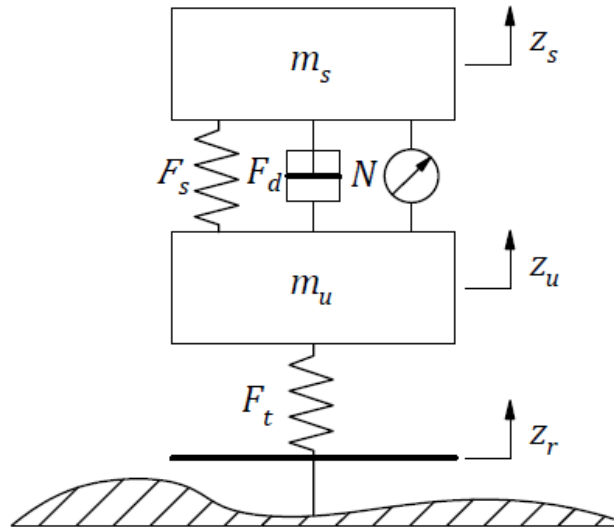
Zawieszenie aktywne charakteryzuje się strukturą, która ma możliwość zmiany w stosunku do warunków ruchu. W zawieszeniu tym umiejscowiono izolator pomiędzy kołami a nadwoziem. Sterowanie izolatora odbywa się automatycznie dzięki sygnałom uzyskanym z czujników (Jaśkiewicz, Więckowski, 2018). Umożliwia to:

- modyfikację statycznego ugięcia zawieszenia;
- regulację współczynnika sztywności oraz/lub współczynnika tłumienia zawieszenia;
- utrzymanie stałej wysokości zawieszenia niezależnie od zmieniającego się powolnie obciążenia;
- dostarczanie pomiędzy koła a nadwozie siły, której charakterystyka w określony sposób zmienia się w zależności od warunków ruchu.

Zawieszenia aktywne pozwalają na manualne oraz automatyczne sterowanie wysokością nadwozia, a także utrzymywanie stałej, zadanej wysokości niezależnie od obciążenia pojazdu. Uzyskuje się to poprzez regulowanie sztywności zawieszenia oraz przez stałą, automatyczną regulację tłumienia. Zasada pracy zawieszeń aktywnych oparta jest na dostarczeniu dodatkowej energii. Wyróżnia się następujące zawieszenia aktywne (Ibidem):

- hydropneumatyczne;
- pneumatyczne;
- elektromagnetyczne.

Szczegółowy opis budowy i zasadę działania wymienionych typów układów zawieszenia aktywnych omówili J. Reimpell i J. Betler (2008), M. Gabrylewicz, (2015) i J. Wysocki (2019). Model aktywnego układu zawieszenia oraz model matematyczny zaprezentowano na rysunku 2.8.



Rysunek 2.8. Model aktywnego układu zawieszenia.

Źródło: „A review of the vehicle suspension system”, I. Jirenga, G. Sirata, 2020, *Journal of Mechanical and Energy*, 4(44), s. 109-114.

Matematyczny opis równania dla aktywnych układów zawieszenia resorowanego i nieresorowanego można wyrazić za pomocą następujących wzorów (Jirenga, Sirata, 2020):

- dla masy resorowanej

$$\begin{aligned}
 m_s \ddot{z}_s + F_d(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + F_s(z_s - z_u) &= 0 \\
 \sum F m_s &= F_d(\dot{z}_u - \dot{z}_s) + F_s(z_u - z_s) \\
 \sum F m_s &= m_s \ddot{z}_s
 \end{aligned}$$

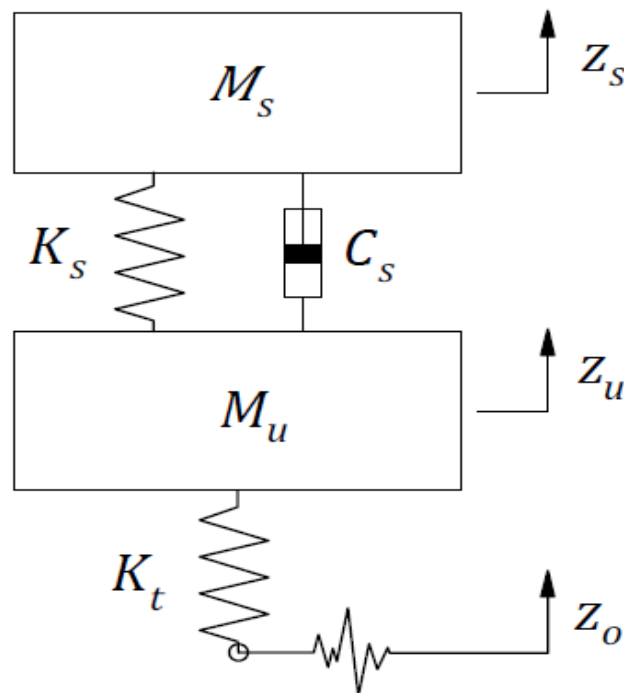
- dla masy nieresorowanej

$$\begin{aligned}
 m_u \ddot{z}_u - F_d(\dot{z}_s - \dot{z}_u) - F_s(z_s - z_u) + F_t(z_u - z_r) &= 0 \\
 \sum F m_s &= F_d(\dot{z}_s - \dot{z}_u) + F_s(z_s - z_u) - F_t(z_u - z_r) \\
 \sum F m_s &= m_u \ddot{z}_u
 \end{aligned}$$

gdzie:

- z_s – pionowe przemieszczenie masy resorowanej (m),
- z_u – przemieszczenie pionowe masy nieresorowanej (m),
- z_r – przemieszczenie pionowe spowodowane oddziaływaniem drogi (m),
- m_s – masa resorowana (kg),
- m_u – masa nieresorowana (kg),
- F_s – sztywność sprężyny (kN/m),
- F_t – sztywność opony (kN/m),
- F_d – współczynnik tłumienia między masą resorowaną a nieresorowaną (kNs/m),
- F – współczynnik tłumienia między drogą a masą nieresorowaną (kNs/m).

Pasywne układy zawieszenia należą do najbardziej znanych i popularnych rodzajów układów zawieszenia (Agharkali, Sabet, Barouz, 2012). Ich budowa to zwykle elementy o liniowej sprężystości oraz nieliniowym tłumieniu, opartym na stałej charakterystyce. Zawieszenia te obecnie stosowane są w różnych konfiguracjach elementów sprężystych i tłumiących. Podczas jazdy wymagany współczynnik tłumienia drgań musi spełniać 2 warunki. Po pierwsze, jego wartość ma być na tyle niska, aby były wytłumiane drgania dla wyższych częstotliwości wymuszenia, które przyczyniają się do pogorszenia komfortu jazdy i niekorzystnie wpływają na człowieka. Po drugie, istotne jest, żeby wartość współczynnika tłumienia drgań była na tyle wysoka, aby pojazd był stabilny przy wykonywaniu manewrów na drodze. Jednocześnie należy dążyć do tego, by były osłabione amplitudy związane z częstotliwościami własnymi przy wymuszeniach o niższych częstotliwościach (Nabagło, 2006). Model pasywnego układu zawieszenia zaprezentowano na rysunku 2.9.



Rysunek 2.9. Model pasywnego układu zawieszenia.

Źródło: „A review of the vehicle suspension system”, I. Jirenga, G. Sirata, 2020, *Journal of Mechanical and Energy*, 4(44), s. 109-114.

Matematyczny opis równania ruchu zawieszenia pasywnego można ukazać w sposób przedstawiony w równaniach 1 i 2:

$$\begin{aligned} M_s \ddot{z}_s &= K_s(z_u - z_s) + C_s(\dot{z}_u - \dot{z}_s) \\ M_u \ddot{z}_u &= K_t(z_o - z_u) - K_s(z_u - z_s) - C_s(\dot{z}_u - \dot{z}_s) \end{aligned}$$

gdzie:

z_s – przemieszczenie pionowe masy resorowanej [m],

z_u – przemieszczenie pionowe masy nieresorowanej [m],

z_o – nierówności drogi [m],

M_s – masa resorowana [kg],

M_u – masa nieresorowana [kg],

K_s – sztywność sprężyny [kN/m],

K_t – sztywność opon [kN/m],

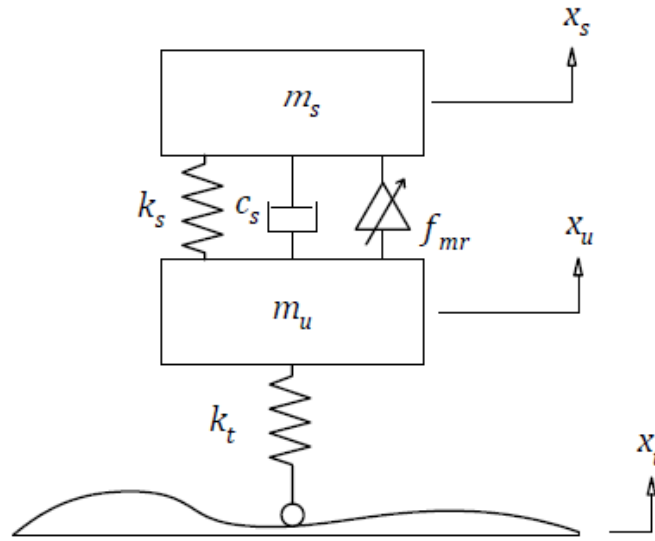
C_s – współczynnik tłumienia [kN.s/m].

Autorzy pracy *Using an inerter to enhance an active-passive-combined vehicle suspension* (He, Jiang, Burrow, Neild, Conn, 2021) uważają, że wydajność pasywnego zawieszenia pojazdu może zostać poprawiona za pomocą aktywnego siłownika. Wiąże się to jednak z potencjalnie problematycznymi wymaganiami, dotyczącymi sterowania, takimi jak wysokie zużycie energii i duże siły działające na siłownik. Aby zmaksymalizować korzyści płynące z osiągnięć, nie wymagając przy tym znacznych nakładów na sterowanie, elementy pasywne i aktywne muszą działać synergicznie. W swych badaniach naukowych autorzy proponują nowatorską metodę kombinowanego, pasywnego i aktywnego tłumienia drgań. W metodzie tej część pasywna jest wzmocniona przez inerter w celu poprawy kompromisu pomiędzy dynamiczną wydajnością a wymaganiami sterowania. Za pomocą tego podejścia można zidentyfikować optymalną konfigurację pasywną – składającą się z inertera (inertery), sprężyny (sprężyn) oraz tłumika (tłumików) o z góry określonej liczbie – oraz optymalny parametr sterowania aktywnego. Podejście to jest zademonstrowane w studium przypadku, w którym zawieszenie zespolone jest projektowane z uwzględnieniem modelu ćwierćsamochodu i typowego regulatora aktywnego (tj. sterowania *skyhook*). Wykazano, że w porównaniu z konwencjonalną, pasywną częścią amortyzatora sprężynowego dodanie równoległe inertera może znacząco poprawić optymalność pareto pomiędzy komfortem jazdy a zapotrzebowaniem na moc (lub siłę). Poprawa ta jest dodatkowo wzmocniona przez systematyczne badanie wszystkich możliwości sieci pasywnej o określonej złożoności za pomocą techniki imitancji struktury. To podejście można również zastosować do tłumienia drgań innych konstrukcji inżynierskich.

Układy zawieszenia semiaktywnego zawierają w sobie elementy sprężyste oraz elementy tłumiące, w których wartość współczynnika tłumienia może być zmieniana w czasie. Zmiana ta może być dokonywana w sposób ciągły w czasie jazdy samochodem przez automatyczny układ sterowania, reagujący poprzez zespół czujników na warunki, w których znajduje się pojazd w określonej chwili (Nabagło, 2006). Dobór odpowiedniej strategii sterowania siłą tłumienia amortyzatorów zawieszenia semiaktywnego jest tematem podejmowanym przez wielu badaczy i w dalszym ciągu powstają nowe propozycje algorytmów (Melnik, Koziak, Dižo, 2018; Balamurugan, Jancirani, Eltantawy, 2014).

Przy zastosowaniu odpowiednich układów sterowania układy zawieszenia semiaktywnego poprawiają komfort jazdy i bezpieczeństwo podróży. Przyczyniają się też do polepszenia stabilności pojazdu w czasie jazdy, redukując przechyły boczne oraz ruchy pionowe i wzdłużne karoserii (Lozoya-Santos i in., 2011; Zhang, Winner, Li, 2009).

Wśród systemów sterowania można wyróżnić: automatyczne systemy tłumienia typu CDC (*Continuous Damping Control*), w pełni aktywne systemy sterowania typu ARS (*Anti Roll Stabilisation*) oraz ASC (*Active Suspension Control*). Na rysunku 2.10 przedstawiono teoretyczny model semiaktywnego układu zawieszenia.



Rysunek 2.10. Teoretyczny model semiaktywnego układu zawieszenia.

Źródło: „A review of the vehicle suspension system”, I. Jirenga, G. Sirata, 2020, *Journal of Mechanical and Energy*, 4(44), s. 109-114.

Równanie ruchu dla zawieszenia semiaktywnego dla przypadku 2 stopni swobody można przedstawić w następujący sposób (Jirenga, Sirata, 2020):

$$m_s \ddot{x}_s + k_{s1}(x_s - x_u) + k_{s2}(x_s - x_u)^2 + k_{s3}(x_s - x_u)^3 + C_{s1}(\dot{x}_s - \dot{x}_u) + C_{s2}(\dot{x}_s - \dot{x}_u)^2 + f_d = 0$$

$$m_u \ddot{x}_u + k_{t1}(x_u - x_t) + k_{t2}(x_u - x_t)^2 + k_{t3}(x_u - x_t)^3 - k_{s1}(x_s - x_u) + k_{s2}(x_s - x_u)^2 - k_{s3}(x_s - x_u)^3 + C_{s1}(\dot{x}_s - \dot{x}_u) - C_{s2}(\dot{x}_s - \dot{x}_u)^2 - f_d = 0$$

gdzie:

m_s – masa resorowana,

m_u – masa nieresorowana,

k_{s1} – sztywność sprężyny; k_{s1} , k_{s2} , k_{s3} – współczynniki sztywności zawieszenia,

k_{t1} , k_{t2} , k_{t3} – współczynniki sztywności opony,

C_s – amortyzator zawieszenia, obejmujący: C_{s1} i C_{s2} – współczynniki tłumienia zawieszenia,

f_{mr} – sterowalna siła tłumienia generowana przez amortyzator,

k_t – sztywność opony,

f_d – nieliniowa siła tłumienia.

Długotrwałe, ciągłe drgania losowe, spowodowane nierównościami na drodze, mogą uszkodzić części pojazdu, a także generować krytyczne problemy zdrowotne u osób podróżujących w tak niekomfortowych sytuacjach. Samochody zintegrowane z technologią opartą na półaktywnym lub aktywnym układzie zawieszenia mogą z powodzeniem poprawić komfort jazdy pasażerów oraz prowadzenie pojazdów w porównaniu z zawieszeniem pasywnym (Singh, 2018; Devdutt, Aggarwal, 2015).

Omówione rozwiązania konstrukcyjne układów zawieszenia stanowią podstawową grupę elementów, które z biegiem lat i rozwojem motoryzacji ulegają ulepszeniom konstrukcyjnym zarówno pod względem zastosowanych materiałów inżynierskich, jak i budowy. Działania takie związane są z wymaganiami stawianymi współczesnym układom zawieszenia, do których należy zaliczyć przede wszystkim poprawę komfortu jazdy i bezpieczeństwo podróży. Analizując literaturę naukową i literaturę producentów pojazdów, można więc znaleźć różne innowacyjne rozwiązania konstrukcyjne układów zawieszenia.

Jako przykład takiego rozwiązania można wskazać układ z adaptacyjnym systemem tłumienia drgań ADS (*Adaptive Damping System*). Jest to czterostopniowy system tłumienia, zaprojektowany przez połączenie miękkiej i twardej charakterystyki dla stopni rozszerzania oraz ściskania w charakterystyce kompresji. Cztery różne charakterystyki tłumienia uzyskuje się za pomocą 2 tłoków w zewnętrznym module regulacyjnym, połączonych indywidualnie równolegle z konwencjonalnym tłokiem roboczym (Soliman, Kaldas, 2021; Konieczny, Burdzik, 2017).

Innym przykładem może być system zawieszenia pneumatycznego typu VB-FullAir, który jest automatycznym rozwiązaniem, umożliwiającym zastąpienie istniejącego zawieszenia piórowego lub też sprężynowego pełnym zawieszeniem pneumatycznym. System ten składa się z poduszek pneumatycznych, amortyzatorów, czujników wysokości, kompresora oraz odpowiedniej elektroniki.

System ABC (*Active Body Control*) jest hydraulicznym układem amortyzacji, którego zadaniem, poza tłumieniem drgań, jest także kompensowanie ruchów nadwozia względem drogi oraz jego wysokości zależnie od obciążenia (*ABC – Active Body Control – co to jest?*). Odbywa się to za pomocą hydraulicznych siłowników, stale regulujących twardość sprężyn. System ten za pomocą kamer wykrywa z wyprzedzeniem nierówności nawierzchni i reguluje amortyzatory. Kamera analizuje nierówności drogi, przekazując informacje do komputera, który po analizie danych zarządza siłą tłumienia z osobna dla każdego koła (Dahiphale i in., 2016).

W systemie Kayaba DRC (*Dynamic Ride Control*) amortyzatory wyposażone są w system wielozaworowy, wpływający na przyczepność samochodu. Centralny moduł sterujący łączy 2 tylne amortyzatory, tworząc zespół tłumiący współpracujący z poprzeczką tylnego zawieszenia, który spełnia funkcję trzeciego amortyzatora z ruchomym tłokiem i zbiornikiem hydraulicznym. W czasie jazdy po łuku lub przy omijaniu przeszkód system łączy lewy i prawy amortyzator w jeden wspólny układ, zwiększając efekt tłumienia ruchu pojazdu. System DRC filtruje nierówności drogi, wpływając na stabilność pojazdu (Floreán-Aquino i in., 2021).

Wspólną cechą przywołanych systemów i zastosowanych w nich rozwiązań jest dążenie do poprawy stabilności ruchu pojazdu, która wymagana jest w różnych sytuacjach drogowych.

Technologia podwozia ewoluuje w kierunku aktywnego zawieszenia, w którym siłowniki mogą przenosić siły na każde koło z osobna. Pozwala to przezwyciężyć tradycyjny kompromis między komfortem a prowadzeniem, kosztem większej złożoności oraz zużycia energii elektrycznej. W celu zmniejszenia zapotrzebowania na energię elektryczną autorzy pracy *Modeling of an active torsion bar automotive suspension for ride comfort and energy analysis in standard road profiles* (Tavares i in., 2019) badali rozwiązania regeneracyjne, które są w stanie odzyskać pewną ilość energii rozpraszanej w zawieszeniu pojazdu i poprawić dynamikę pojazdu, zwiększając komfort jazdy i bezpieczeństwo na drodze. Aktywne zawieszenie, oparte na belce skrętnej, było modelowane i analizowane pod wpływem wzbudzenia przez znormalizowane profile drogowe zgodnie z normą ISO 8608. Sterownik *skyhook* zaimplementowany został w modelu ćwierćsamochodu w celu oceny komfortu jazdy, zużycia energii oraz możliwości wykorzystania silnika prądu stałego, zgodnie z zasadą pracy czterokwadrantowej, pracującego jako generator. Wyniki symulacji wskazują, że dla prędkości 50 km możliwy jest pobór mocy 50-60 W z pojazdu poruszającego się po drodze klasy C z zachowaniem kompromisu komfortu jazdy.

2.3. Układy zawieszenia pojazdów w świetle dotychczasowych badań naukowych

Jak już niejednokrotnie podnoszono, układ zawieszenia pojazdu jest jednym z najważniejszych układów, gdyż od jego prawidłowego działania zależy bezpieczeństwo oraz komfort podróży (Zhang, Tan, Dai, 2021). Dlatego też układ ten jest obiektem badań wielu naukowców. W niniejszym rozdziale zaprezentowane zostaną wybrane (według autora najciekawsze) prace naukowe dotyczące układów zawieszenia, obejmujące m.in. badania uszkodzeń elementów, materiały inżynierskie stosowane w konstrukcji elementów zawieszenia oraz metodykę badań.

W artykule *Impact of the hardness on the selected mechanical properties of rigid polyurethane elastomers commonly used in suspension systems* (Junik i in., 2021) zaprezentowano wyniki badań eksperymentalnych materiałów poliuretanowych, stosowanych w układach zawieszenia samochodów. Autorzy przeprowadzili badania materiałów stosowanych do produkcji tulei metalowo-gumowych o twardości 80 oraz 90 ShA, które wykorzystali przy badaniach zawieszenia samochodów. W tym celu wyprodukowali 2 rodzaje materiałów poliuretanowych (PUR). Materiały te poddano testom mechanicznym, polegającym na: rozrywaniu, rozciąganiu, ściskaniu i zużyciu ściernym. Ostatecznie powstał model tulei poliuretanowej, który również poddano testom zmęczeniowym. Wyniki badań pokazały, że nawet niewielki wzrost twardości materiału istotnie wpływa na zmiany parametrów zmęczeniowych i ogólnie parametrów związanych z pękaniem materiału.

W artykule *Application of the Photoelastic Coating Technique in Car* (Jankowski, Reksa, 2019) przedstawiono wyniki eksperymentu przeprowadzonego w celu ustalenia przyczyny uszkodzenia prawego tylnego wahacza wleczonego zabudowanego w samochodzie osobowym. Rutynowa kontrola pojazdu, a także badanie ramienia uszkodzonego podczas jazdy wykazały wady produkcyjne jako przyczynę niebezpiecznej awarii. Zakwestionowano wyniki ekspertyzy i sformułowano tezę, że proces awarii wahacza został zainicjowany podczas kradzieży kół w wyniku podniesienia samochodu w sposób niezgodny z zaleceniami producenta. Symulację tego zdarzenia przeprowadzono

poprzez podniesienie pojazdu na wahaczu wleczonym. Do oceny bujaka wykorzystano technikę powlekania fotoelastycznego. Analiza wyników pomiarów wykazała, że incydent kradzieży nie mógł zainicjować procesu zmęczenia, który doprowadził do awarii wahacza wleczonego. W kolejnych pracach autorzy będą szukać innej przyczyny uszkodzenia wahacza.

W pracy *Development of efficient short/continuous fiber thermoplastic composite automobile suspension upper control arm* (Anandakumar, Timmaraju, Velmurugan, 2021) badano doświadczalnie właściwości mechaniczne wkładek kompozytowych z ciągłego włókna szklanego/polipropylenu w warunkach obciążeń wzdłużnych, poprzecznych i ścinających. Wyniki te zostały wykorzystane w symulacji numerycznej ramienia sterującego. Wahacz jest jednym z elementów nośnych w układzie zawieszenia, który zazwyczaj wykonany jest ze stali. Symulacja numeryczna górnego wahacza wykonanego z kompozytu polipropylenowego o krótkich włóknach z wkładkami z włókien ciągłych została przeprowadzona przy użyciu programu ANSYS APDL 12.0. Zbadano wpływ zastosowania wkładek z włókien ciągłych na nośność wahacza. Kompozyty termoplastyczne z włóknami krótkimi i wkładkami z włókien ciągłych wykazały lepsze właściwości w porównaniu z kompozytami stalowymi i kompozytami wzmocnionymi włóknami krótkimi.

Autorzy pracy *Design and Modeling of Car Front Suspension Lower Arm* (Taksande, Vanalkar, 2015) przedstawili projekt i procedurę modelowania dolnego wahacza przedniego zawieszenia samochodu do badania stanu naprężeń i zwiększenia grubości dolnej płyty przedniego wahacza. Głównym celem tego badania było określenie krytycznych miejsc oraz rozkładów odkształcenia elementów. Praca miała na celu zakończenie analizy metodą elementów skończonych przedniego wahacza dolnego zawieszenia, które składają się z optymalizacji naprężeń i analizy dla deformacji.

Autorzy artykułu *The optimum matching control and dynamic analysis for air suspension of multi-axle vehicles with anti-roll hydraulically interconnected system* (Li i in., 2020) zauważyli, że w literaturze brakuje badań dotyczących działania zawieszenia pojazdów wieloosiowych z hydraulicznie połączonym układem sterowania zapobiegającym przechyłom. W przedmiotowym artykule przedstawili rozwiązania tego problemu, skupiając się na osiągnięciu oporów toczenia i optymalnym dopasowaniu pojazdów przegubowych wyposażonych w przeciwwprzechyłne, hydraulicznie połączone zawieszenie sterujące. Trzy hydraulicznie połączone systemy sterowania dla jednoosiowego, dwuosiowego i trzyosiowego zawieszenia naczep były modelowane i weryfikowane w programie AMESim. Następnie 7 modeli pojazdów sprzęgających zostało wytworzonych metodą kosymulacji w programach AMESim, MATLAB/Simulink i Trucksim. Analiza symulacji dynamicznej pokazała, że D23 i D123 mają dużą wartość aplikacyjną, jako optymalna strategia, biorąc pod uwagę koszty inżynierskie. Wyniki pracy pokazują, że zaprojektowany sterownik może jeszcze skuteczniej poprawić stabilność prowadzenia pojazdu.

W pracy *Analysis and experiment of time-delayed optimal control for vehicle suspension system* (Yan, Fang, Xu, 2019) zbadano działanie układu zawieszenia pojazdu w warunkach optymalnego sterowania z opóźnieniem czasowym. Omówiono wpływ opóźnienia czasowego na stabilność sterowania aktywnego zawieszenia. Symulacja matematyczna posłużyła do weryfikacji poprawności stabilnego przedziału otrzymanego za pomocą teorii równań różniczkowych dla układów liniowych

o stałych współczynnikach i opóźnieniu czasowym. Wyniki symulacji pokazały, że strategia sterowania może nie tylko zagwarantować stabilność systemu niezależnie od zmienności opóźnienia czasowego sterowania, ale też poprawić działanie zawieszenia. Dodatkowo autorzy analizowali wpływ zaprojektowanego aktywnego opóźnienia czasowego na amplitudę przyspieszenia masy resorowanej, ugięcie zawieszenia. Przedstawili eksperymenty kontroli drgań aktywnego układu zawieszenia w warunkach wzbudzenia harmonicznego z opóźnioną w czasie optymalną kontrolą w celu porównania z symulacjami. Widać, że zaprojektowana, opóźniona w czasie optymalna strategia kontroli jest skuteczna i może być zastosowana.

W artykule *Failure analysis of a helical compression spring for a heavy* (Zhu, Wang, Huang, 2014) autorzy analizowali przyczynę pęknięcia sprężyny śrubowej w stanie przejściowym pierwszego zwoju, podczas kiedy naprężenia nominalne powinny być w tym miejscu zawsze znacznie mniejsze niż w stanie pełnej aktywności zwoju. Obserwacje wizualne wykazały, że na pierwszym aktywnym zwoju utworzyła się rysa inicjująca zużycie, a na powierzchni pęknięcia widoczne były promieniste grzbiety wychodzące z tej rysy. Skaningowa mikroskopia elektronowa wykazała obszar w kształcie półksiężyca i ślady typowe dla uszkodzenia zmęczeniowego. Warstwa fosforanu ZnCapH i malowanie wokół strefy kontaktu uległy zużyciu w wyniku kontaktu z czynnikami zewnętrznymi i tarcia, co spowodowało korozję i wżery korozyjne indukowane lokalną koncentracją naprężeń. Analiza naprężeń wykazała, że pojawiły się one na krawędziach strefy kontaktu, co ułatwiło poślizg podczas cyklu pracy zawieszenia i rozwój pęknięć zmęczeniowych. Autorzy w pracy przedstawili również zalecenia dotyczące poprawy wytrzymałości zmęczeniowej sprężyn zawieszenia.

W pracy *Durability assessment of suspension coil spring considering the multifractality of road excitations* (Chin i in., 2020) autorzy przedstawili charakterystykę multifraktalności szeregów czasowych wzbudzenia drogi w różnych warunkach drogowych do prognozowania trwałości sprężyny śrubowej zawieszenia. Sygnały przyspieszenia wymuszeń drogowych oraz sygnały odkształcenia pobrali z układu zawieszenia pojazdu poruszającego się w różnych warunkach drogowych. Analiza multifraktalna wykazała wyższą tendencję do multifraktalności w wymuszeniu drogowym o większej nierówności nawierzchni. Na podstawie trwałości zmęczeniowej (przewidywanej za pomocą różnych modeli) autorzy ustanowili liniowe modele przewidywania trwałości zmęczeniowej oparte na multifraktalności dróg. Bazując na uzyskanych wynikach, stwierdzili, że model liniowy oparty na teorii Morrow daje najdokładniejsze oszacowanie trwałości zmęczeniowej. Uznali, że modele do przewidywania trwałości zmęczeniowej sprężyn śrubowych w oparciu o multifraktalność dróg stanowią dokładną i szybszą alternatywę dla oceny trwałości sprężyn śrubowych.

Autorzy pracy *Failure mode analysis of torsion beam rear suspension under service conditions* (Zhao, Zheng, Feng, 2014) w warunkach eksploatacji zbadali uszkodzenia tylnego zawieszenia z belką skrętną, poszukując miejsca awarii i obciążeń krytycznych. Pomiary przeprowadzili na torze doświadczalnym poligonu. Miejsce uszkodzenia określali, porównując wartości uszkodzeń obszarów krytycznych obliczonych za pomocą liniowej reguły uszkodzenia, zaś obciążenia krytyczne określali na podstawie analizy korelacji między obciążeniami kół a odkształceniami miejsca uszkodzenia. Wyniki porównania uszkodzeń i analizy korelacji wskazują, że uszkodzenie zmęczeniowe występuje na belce skrętnej w pobliżu spawu między belką a elementem

wzmacniającym i może być spowodowane siłami pionowymi na kole, zwłaszcza różnicą pomiędzy lewym i prawym kołem, która wprowadza dodatkowy moment obrotowy na belce. Poprawność metodyki weryfikowali, przeprowadzając badania zmęczeniowe na symulatorze obciążenia drogowego MTS 6DOF przy wszystkich obciążeniach koła i tylko siłach pionowych. Wniosek może być pomocny przy projektowaniu oraz opracowywaniu spektrum obciążeń dla przyspieszonego testu wytrzymałościowego tego rodzaju tylnego zawieszenia.

Celem pracy *Design and analysis of composite mono leaf spring for passenger cars* (Varma i in., 2021) było badanie przydatności hybrydowej sprężyny kompozytowej, która zawiera włókna węglowe i włókna lniane jako wzmocnienie pierwotne i wtórne. Stwierdzono, że częstotliwość drgań własnych kompozytowej sprężyny piórowej jest o 93% większa niż stali. Ponadto wbudowanie warstw lnu pomiędzy włókna węglowe zwiększyło współczynnik bezpieczeństwa i energię odkształcenia dzięki jego wysokim właściwościom.

Praca *A new methodology for detection of a loose or worn ball joints used in vehicles suspension system* (Carvalho, Santos, Ferreira, 2018) skupiała się na opracowaniu zautomatyzowanego narzędzia do określania stanu zużycia przegubów kulowych, stosowanych w układach zawieszenia pojazdów. Zaproponowano metodykę opartą na przenikalności pomiędzy przyspieszeniami, mierzonymi w 2 punktach układu zawieszenia. Badania przeprowadzono na kilku pojazdach, których stan przegubów kulowych był znany, wykorzystując wzbudzenia generowane podczas próby zawieszenia, wykonywanej w trakcie wymaganych przepisami okresowych badań technicznych pojazdów. W rzeczywistości ocena stanu zużycia przegubów kulowych dokonywana była na podstawie oględzin, które nie stanowią dobrze zdefiniowanego i jednorodnego kryterium. Uzyskane wyniki eksperymentalne udowodniły, że proponowana metodyka może być z powodzeniem stosowana do określania zużycia przegubów kulowych oraz ich luzu w sposób ilościowy, a także zautomatyzowany, promując bezpieczeństwo pojazdu.

Przegub kulowy zapewnia uniwersalny ruch obrotowy pomiędzy piastami kół a wahaczami. Zastosowanie tradycyjnych rozdzielaczy przegubów kulowych było naznaczone pęknięciami, uszkodzeniem nakrętki zabezpieczającej na sworzniu przegubu i gorszymi właściwościami mechanicznymi. W odpowiedzi na te braki w działaniu i powtarzające się awarie, konieczne było opracowanie projektu adaptacyjnego. Dlatego też celem pracy *Adaptive design of a universal automotive ball joint separating device* (Okafor i in., 2020) były badania ukierunkowane na zaprojektowanie i produkcję uniwersalnego urządzenia do rozdzielania przegubów kulowych. Do poszukiwania nowych materiałów autorzy wykorzystali selektor GRANTA. Proces projektowania zrealizowali za pomocą analizy elementów skończonych ANSYS, a analizę naprężeń strukturalnych przeprowadzili w zakresie obciążeń 200-1400 N. Maksymalne naprężenia i maksymalne odkształcenia wystąpiły w pobliżu osi obrotu u podstawy dolnej połowy i na końcu górnej części separatora przegubu kulowego. Autorzy stwierdzili zatem, że wpływ zmiennych sterujących i ich optymalizacja są bardzo przydatne do określenia optymalnej przewagi mechanicznej urządzenia. Naprężenia są jednak mniejsze niż granica plastyczności stali wysoko węglowej wybranej do produkcji elementu, a separator spełnił wymagane zadania bezawaryjnie.

W pracy *Rotary regenerative shock absorbers for automotive suspensions* (Galluzzi i in., 2021) autorzy zaproponowali nową metodykę projektowania dla obrotowych amortyzatorów regeneracyjnych i zbadali ich działanie z perspektywy eksperymentalnej. Projekt koncentrował się na uzyskaniu kompaktowego rozwiązania, które byłoby w stanie spełnić określone wymagania dotyczące tłumienia. W związku z tym w proponowanej metodzie uwzględniono zintegrowaną definicję maszyny elektrycznej, przekładni i połączenia. Wyprodukowano w pełni funkcjonalny prototyp, który został pomyślnie zwalidowany pod względem zdolności tłumienia, całkowitej sprawności konwersji oraz zachowania akustycznego. Uzyskane wyniki dowodziły słuszności proponowanej metodyki i korzystnych cech tłumików obrotowych w stosunku do innych rozwiązań zawieszenia regeneracyjnego.

W artykule *Adaptive sliding mode control based nonlinear disturbance observer for active suspension with pneumatic spring* (Ho, Tran, Ahn, 2021) przedstawiono adaptacyjne sterowanie trybem ślizgowym (SMC), oparte na nieliniowym obserwatorze zakłóceń (NDOB). SMC zaprojektowano w celu uzyskania komfortu pasażerów oraz utrzymania bezpieczeństwa jazdy pneumatycznego aktywnego zawieszenia. Nieliniowy obserwator zakłóceń jest proponowany do asymptotycznego odrzucenia zewnętrznych zakłóceń i przewyżczenia parametrycznych niepewności, które istnieją w systemie zawieszenia, takich jak profile dróg, różne masy pasażerów i dynamika siłownika. Wreszcie, symulacje porównawcze oraz wyniki eksperymentalne są podane i porównywane przez pneumatyczne zawieszenie pojazdu *test bench*, żeby wykazać skuteczność proponowanego SMC-NDOB schematu dla różnych warunków drogowych. Wyniki pokazują, że wartość RMS przyspieszenia jest zmniejszona o 41,5%, gdy proponowane sterowanie jest używane dla eksperymentu z profilem drogi wyboistej.

W artykule *A universal suspension test rig for electrohydraulic active and passive automotive suspension system* (Omar, El-kassaby, Abdelghaffar, 2017) zaprojektowano oraz wykonano w pełni aktywne elektro-hydrauliczne i pasywne zawieszenie ćwierć samochodu, przedstawiono w nim również eksperymentalne stanowiska badawcze autorów. Badanie działania aktywnego zawieszenia w porównaniu z pasywnym przeprowadzono eksperymentalnie i numerycznie z wykorzystaniem biblioteki SIMULINK's Simscape. W celu uproszczenia procesu walidacji oba układy są modelowane jako układy o jednym stopniu swobody. Podczas realizacji stanowiska uwzględniono względy ekonomiczne. Stanowisko takie składa się z 2 identycznych platform zamocowanych obok siebie, umożliwiających jednoczesne badanie 2 niezależnych zawieszeń. Na obu platformach zainstalowane są czujniki położenia mas resorowanych i nieresorowanych. Napęd drogowy realizowany jest przez krzywkę oraz mechanizm rolkowy napędzany silnikiem indukcyjnym jednofazowym o mocy 1,12 kW z zespołem redukcji prędkości. Ze względu na wysoki stosunek mocy do masy najbardziej opłacalnym wyborem był aktywny siłownik hydrauliczny. Aktywne sterowanie jest typu proporcjonalno-integralno-różniczkowego (PID). Chociaż technika ta jest dość prosta i nie jest nowa, jednak nacisk w tym artykule położono na inżynierię, projekt, a także implementację eksperymentalnego układu oraz sterownika. Przeprowadzono udany proces walidacji. Komfort jazdy znacznie poprawił się z aktywnym zawieszeniem, jak pokazują wyniki – osiągnięte zostało 24,8% tłumienia drgań masy sprężynującej.

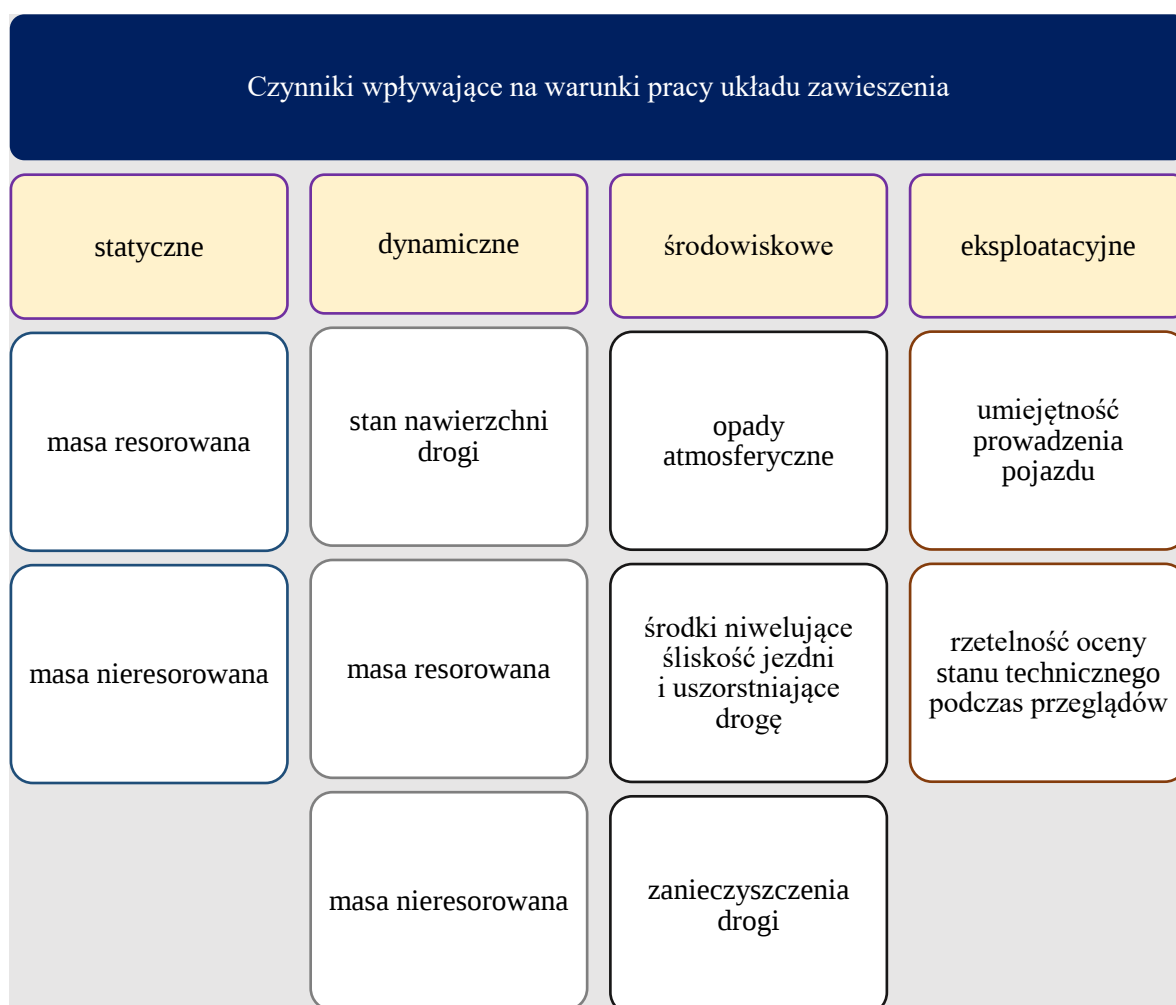
W pracy *Exploration of fatigue and modal analysis on mono leaf suspension made by natural composite materials* (Venkatesh i in. 2021) przeprowadzono analizę zmęczeniową oraz modalną zawieszenia *mono leaf spring* z różnymi kompozytami wykonanymi z *e-glass* oraz włókien naturalnych, a wyniki porównano z materiałem bazowym – stalą (65Si7). Modelowanie 3D przeprowadzono i przeanalizowano za pomocą programu ANSYS zarówno dla stalowej, jak też kompozytowej sprężyny piórowej.

Nowatorskie rozwiązanie konstrukcyjne hydraulicznego zawieszenia zbierającego energię (EH-HIS) zostało zaproponowane przez autorów pracy *Modeling, bench test and ride analysis of a novel energy-harvesting hydraulically interconnected suspension system* (Qin i in., 2022). Prototyp submodułu został opracowany w celu walidacji modelu analitycznego i przetestowany, żeby zbadać charakterystykę tłumienia oraz możliwości zbierania energii przez EH-HIS. Badania przeprowadzono, aby porównać odpowiedzi dynamicznych i wydajności zbierania energii przez cały pojazd wyposażony w: tradycyjne zawieszenie, hydraulicznie połączone zawieszenie (HIS), zbierający energię amortyzator hydroelektromagnetyczny (HESA) i proponowany EH-HIS. Wyniki testów stanowiskowych pokazują, że współczynnik tłumienia EH-HIS waha się od 3608 do 9913Ns/m. Średnia moc zbierana przez podmoduł osiąga 82 W przy wzbudzeniu o częstotliwości 2 Hz i amplitudzie 20 mm, podczas gdy pełnowymiarowy SUV wyposażony w EH-HIS może uzyskać średnią moc 215 W i 525 W na drodze klasy D z prędkością jazdy odpowiednio 60 km/h i 80 km/h. Ponadto pojazd wyposażony w EH-HIS charakteryzuje się lepszym komfortem jazdy na nierównym terenie oraz zadowalającą stabilnością prowadzenia w porównaniu z innymi układami zawieszenia. Z analizy wynika również, że EH-HIS wykazuje 60% i 11% poprawy w zakresie właściwości antyrollingowych i antyprzebieciowych w stosunku do tradycyjnego zawieszenia podczas manewrów nagłego kierowania i hamowania.

3. Warunki pracy układów zawieszenia

Pojazdy samochodowe są konstrukcjami utworzonymi z wielu mechanizmów, układów i zespołów, które współpracując ze sobą, dają możliwość przemieszczania się, transportu bagażu i ładunków. Użytkowane są w różnych strefach klimatycznych świata, które cechują znaczne różnice stanu pogody, takie jak temperatura powietrza, opady deszczu czy też śniegu. Warunki te mają (obok technologii wykonania drogi) decydujący wpływ na kształtowanie stanu technicznego wszystkich zespołów pojazdu.

Ze względu na przytoczone czynniki najbardziej narażonymi na uszkodzenia eksploatacyjne elementami pojazdów są układy zawieszenia. Dlatego też powinny się one charakteryzować dużą trwałością i niezawodnością. Jak można było zauważyć w poprzednim rozdziale, konstruktorzy dążą do ciągłego udoskonalania elementów układu zawieszenia, aby poprawić ich jakość użytkową. Zadanie to nie należy jednak do łatwych, gdyż układy zawieszenia pracują w różnych warunkach, uzależnionych od wielu czynników, które zgrupowano na rysunku 3.1.



Rysunek 3.1. Podział czynników wpływających na warunki pracy układu zawieszenia.
Źródło: opracowanie własne.

Obciążenie pojazdu, szczególnie dostawczego, służącego do przewozów kurierskich, który jest obiektem badań niniejszej pracy, zmienia się ze względu na zróżnicowanie przesyłek, tj. ich gabarytów i wagi, oddziałując jednocześnie na masę resorowaną pojazdu i pozostałe elementy układu zawieszenia. W cyklu przewozowym zachodzi zmiana obciążenia pojazdu od maksymalnej dopuszczalnej do zmniejszonej po rozładunku towaru. Takie wahania różnicy odciążenia powodują nieregularne ugięcie elementów układu zawieszenia, które w połączeniu z niesprzyjającymi warunkami drogowymi związanymi z warunkami środowiskowymi opisanymi poniżej mogą umożliwić przedostawanie się różnych zanieczyszczeń między łączone elementy, powodując ich destrukcję.

3.1. Czynniki statyczne i dynamiczne

Zmniejszenie ładunku pojazdu wpływa na jego masę resorowaną. Jednak nie bez znaczenia na stan techniczny elementów układów zawieszenia ma masa nieresorowana, do której należą takie elementy jak: koła, bębny hamulcowe, tarcze hamulcowe, półosie czy zwrotnice (Tomala i in., 2015). Podczas jazdy pojazdu po nierównościach dochodzi do przemieszczenia masy nieresorowanej, co powoduje ugięcie elementów zawieszenia, zwiększając przy tym napięcie elementów sprężystych. Sytuacja ta sprzyja powstawaniu mikroprzemieszczeń współpracujących ze sobą elementów resorowanej masy, które w konsekwencji ulegać będą przedwczesnemu zużyciu lub uszkodzeniu.

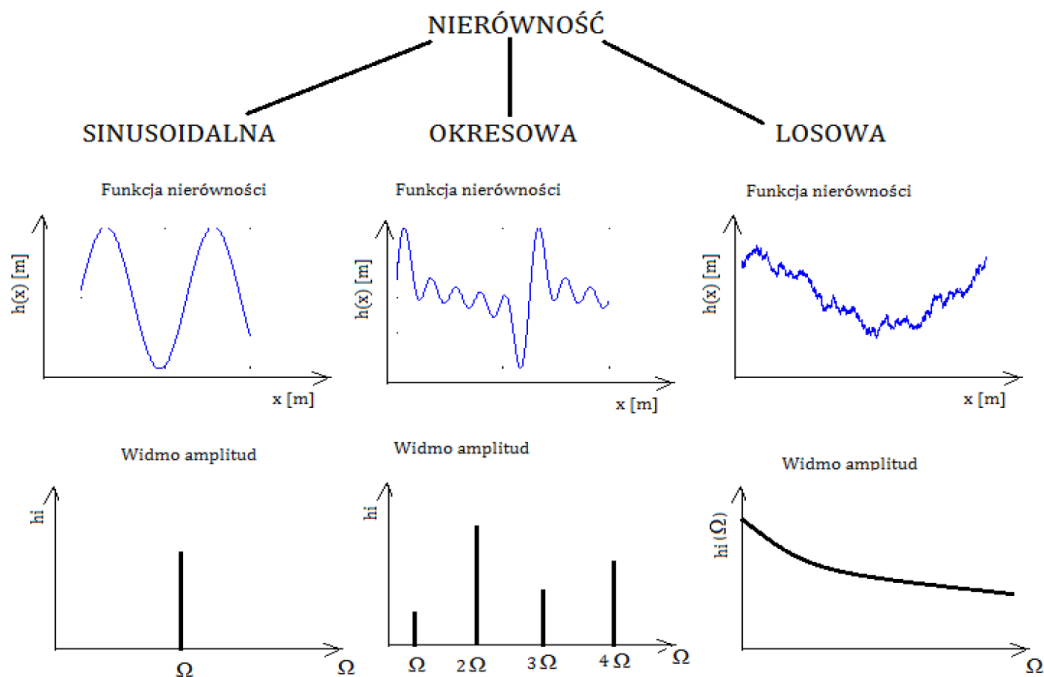
Wiodącym czynnikiem wpływającym na stan techniczny elementów układu zawieszenia jest stan nawierzchni drogi, a tym samym oddziaływanie dynamiczne na pojazd. Nierówności nawierzchni drogi mają charakter losowy i niemożliwe jest ich opisanie jedną funkcją. Przejazd pojazdu po nierównościach, ubytkach w nawierzchni drogi powoduje ugięcie zarówno mas nieresorowanych, jak i masy resorowanej. Wielkość tych przemieszczeń uzależniona jest od masy pojazdu i stanu nawierzchni drogi.

Wymuszenia kinematyczne pochodzące od drogi występują w zakresie drgań rezonansowych układu zawieszenia: częstotliwości drgań własnych kół, nadwozia i zakresu istotnego pod względem odczuć kierowcy pojazdu. W pojazdach drgania te występują w przedziale od 0,7 do 15 Hz (Dąbrowski, 2018).

W konstytuowaniu nawierzchni drogi najczęściej korzysta się z uproszczonych modeli, które zamiast modelowania trójwymiarowego nawierzchni są traktowane jako jednowymiarowe. Najbardziej znany opis jednowymiarowy drogi przedstawiony jest w normie ISO 8608:2016. Istnieją modele trójwymiarowe, które oprócz wysokości nierówności zawierają również lokalny współczynnik tarcia. Przydatne jest to w rozpatrywaniu przyczepności koła do nawierzchni, aspektów dynamiki poprzecznej i stateczności pojazdu. W modelowaniu na potrzeby dynamiki pionowej pomija się szerokość opony i nierówności drogi. Styk koła z nawierzchnią traktuje się punktowo lub liniowo (uwzględniając kilka następujących po sobie pomiarów nierówności drogi) (Ibidem).

Nierówności drogi opisane jednowymiarowo najczęściej są klasyfikowane w literaturze na 3 grupy (Ibidem, 2018; Wiśniewski, 2016). Pierwszą – i zarazem najprostszą – postacią jest opis profilu drogi za pomocą pojedynczej funkcji sinusoidalnej. Drugą, bardziej złożoną, jest funkcja okresowa będąca sumą kilkudziesięciu sinusoid o różnej częstotliwości. Trzeci rodzaj opisu nierówności to funkcja losowa nazywana też pseudoprzypadkową, jest ona najbardziej zbliżona do profilu rzeczywistego.

Na rysunku 3.2 przedstawiono widmo amplitud sygnału w zależności od częstotliwości wymuszenia. Dla funkcji sinusoidalnej występuje jeden prążek odpowiadający częstotliwości i amplitudzie, dla funkcji okresowej występuje liczba prążków równa liczbie sinusoid będących składową o amplitudach odpowiadających poszczególnym częstotliwościom, natomiast w losowej funkcji nierówności widmo przechodzi z dyskretnego w ciągłe przy dostatecznie dużej liczbie występujących częstotliwości (Ibidem).



Rysunek 3.2. Podział modeli nierówności drogi.

Źródło: *Algorytmizacja adaptacyjnego sterowania tłumieniem zawieszenia samochodu dla uwzględnienia zmienności warunków eksploatacji*, K. Dąbrowski, 2018, Poznań: Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska; *Modelowanie losowych wymuszeń kinematycznych drogi*, A. Wiśniewski, 2016, Poznań: Praca dyplomowa. Politechnika Poznańska

W rzeczywistej eksploatacji spotyka się niemal wyłącznie wymuszenia o charakterze nieregularnym, gdzie przebiegi sinusoidalne lub okresowe nierówności od drogi należą do rzadkości (droga płytowa). Model nawierzchni drogi zaproponowany w normie nie uwzględnia pojedynczych wymuszeń losowych, które dla oceny komfortu mają często duże znaczenie. Z tego powodu w tej dziedzinie wymagane są zarówno badania symulacyjne, jak i eksperymentalne, które w pełni uwzględnią losowy charakter wymuszeń od nawierzchni drogi (Ibidem).

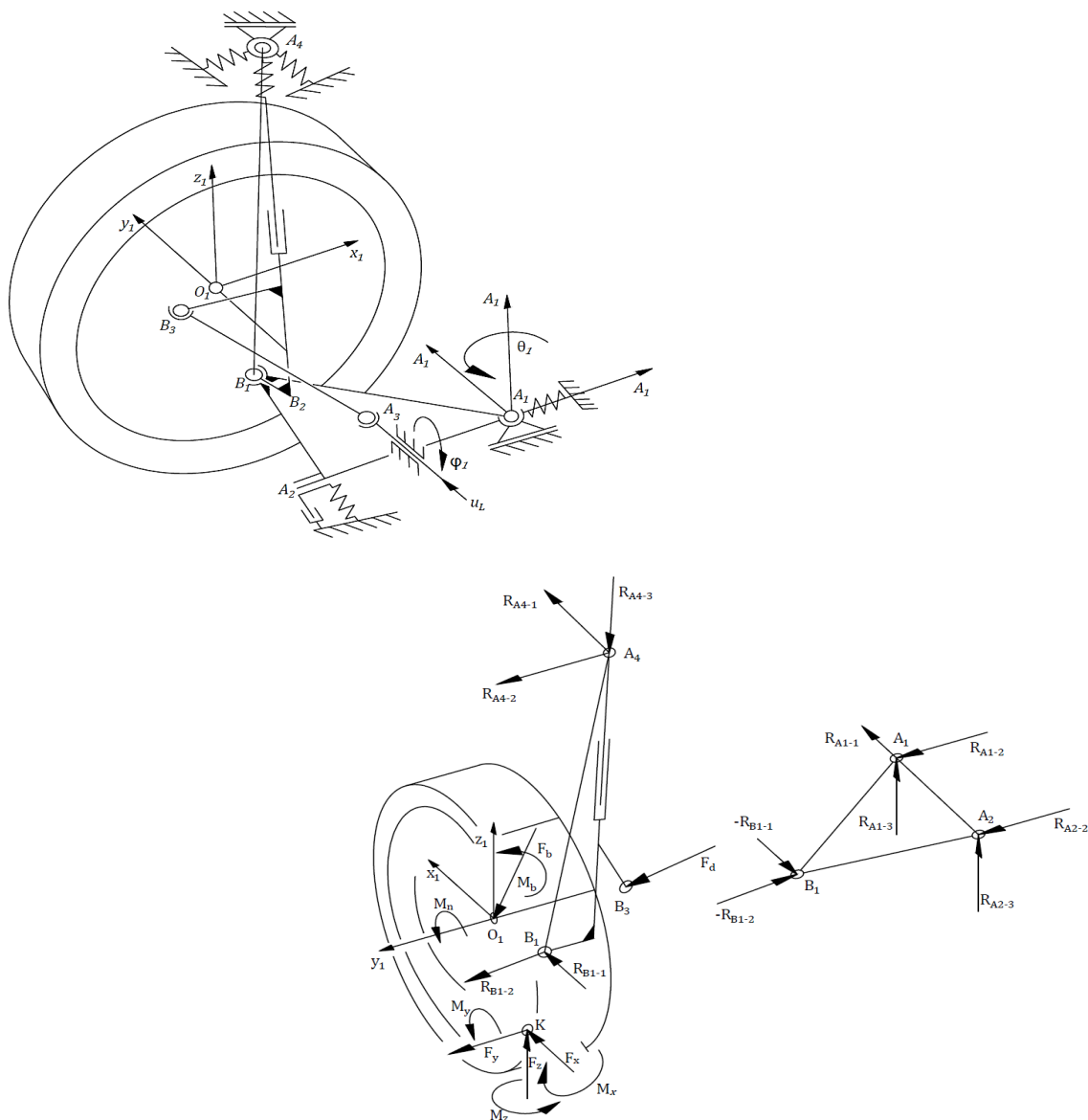
Podczas jazdy samochodem po drogach generowane są dynamiczne obciążenia kół, które przez elementy zawieszenia przenoszone są na nadwozie. Konfiguracja tych elementów w przestrzeni ruchów resorowania ulega ciągłej zmianie. Wyznaczenie dynamicznych obciążeń dla każdej możliwej konfiguracji w przestrzeni ruchów resorowania potrzebne jest do określenia stanów naprężeń w przekrojach elementów zawieszenia i układu kierowniczego (Walczak, 2003).

Obciążenia dynamiczne elementów zawieszenia samochodu można wyznaczyć (Walczak, 2004; 2006):

- bezpośrednio, na podstawie pomiarów w warunkach naturalnej eksploatacji lub podczas testowych badań drogowych;
- bezpośrednio, na podstawie pomiarów prowadzonych na specjalnych stanowiskach badawczych, tzw. symulatorach drogi;
- pośrednio, na podstawie badań symulacyjnych.

Bezpośrednie wyznaczanie obciążeń podczas badań drogowych jest bardzo kosztowne, czasochłonne i na szeroką skalę coraz rzadziej stosowane. Badania te służą głównie weryfikacji założeń przyjętych na etapie projektowania samochodu. Wyniki takich badań charakteryzują się małą powtarzalnością, mimo że prowadzone są prawie wyłącznie na specjalnych poligonach badawczych (Ibidem).

Do wyznaczenia dynamicznych obciążeń elementów zawieszenia przedniego przyjmuje się jego schemat kinematyczny, pokazany na rysunku 3.3.



Rysunek 3.3. Schemat zawieszenia z kolumną McPhersona i przekładnią zębatkową oraz układ sił działających na zawieszenie.

Źródło: Analiza dynamicznych obciążeń różnych typów niezależnego zawieszenia kół samochodu, S. Walczak, 2003, Praca doktorska. Kraków: Politechnika Krakowska.

Ponadto przyjmuje się następujące założenia upraszczające (Walczak, 2003):

- pomija się masę dolnego wahacza oraz drążka kierowniczego;
- nie uwzględnia się sił tarcia w połączeniach ruchomych;
- pomija się podatności wahaczy, drążka kierowniczego i wspornika z kołem.

Uwzględniając powyższe założenia, można w układzie związanym z nadwoziem zapisać równania równowagi dynamicznej sił działających na zwrotnicę z kołem i momentów sił względem punktu A_1 (rysunek 3.3.) (Walczak, 2003):

$$\begin{aligned} F_{op_i} + F_{d_i} + R_{A_{4i}} + R_{B_{1i}} + F_{b_i} &= 0 \\ r_{A_1 O_i} \cdot (F_{op_i} + F_{b_i}) + r_{A_1 B_{3i}} \cdot F_{d_i} + r_{A_1 A_{4i}} \cdot R_{A_{4i}} + r_{A_1 B_{1i}} \cdot R_{B_{1i}} + M_{op_i} + M_{m_i} + M_{n_i} \\ + M_{b_i} &= 0 \end{aligned}$$

Równania równowagi dynamicznej sił działających na dolny wahacz i momentów sił względem punktu A_1 można zapisać następująco (Ibidem):

$$\begin{aligned} -R_{B_{1i}} + R_{A_{1i}} + R_{A_{2i}} &= 0 \\ -r_{A_1 B_{1i}} \cdot R_{B_{1i}} + r_{A_1 A_{2i}} \cdot R_{A_{2i}} &= 0 \end{aligned}$$

gdzie:

F_{b_i}, M_{b_i} – siła i moment bezwładności według zależności:

$$F_{b_i} = m_i(g - a_{oi,N})$$

$$M_{b_i} = -(T_i \varepsilon_{oi,N} + \omega_{oi,N} \cdot T_i \omega_{oi,N}) - (\omega_{KZi,N} \cdot T_{K_i} \omega_{oi,N})$$

F_{op_i}, M_{op_i} – siły i momenty generowane przez opony,

M_{m_i} – momenty masowe,

m_i – masa i-tego ciała,

$\omega_{KZi,N}$ – prędkość kątowna koła ze zwrotnicą w układzie $\langle N \rangle$.

Prędkość pojazdów, podobnie jak równość nawierzchni, istotnie wpływa na oddziaływania dynamiczne i współczynnik obciążenia dynamicznego (DLC) oraz wskaźnik wpływu dynamicznego (DI) (Ryś, Judycki, Jaskuła, 2016).

Znając wielkości opisujące stan dynamiki zawieszenia, można zdefiniować ilościowe kryteria oceny pracy zawieszenia (Ślaski, Pikosz, 2010):

- do oceny izolacji pasażerów i ładunku służą kryteria oceny drgań; mogą to być analizowane w pasmach częstotliwościowych poziomy wartości skutecznych amplitud przyspieszeń pionowych masy resorowanej;
- dla oceny utrzymywania małej wartości obciążeń dynamicznych kół może to być maksymalna wartość tych obciążeń w najbardziej niekorzystnym paśmie częstości drgań lub też poziom tej wielkości odniesiony do obciążenia statycznego koła albo też minimalnego dynamicznego nacisku pionowego koła również odniesionego do nacisku statycznego;
- do oceny utrzymania ograniczonego skoku kół, czy też powiązanego z nim ugięcia zawieszenia, można wykorzystać różnicę przemieszczeń koła oraz nadwozia.

3.2. Czynniki środowiskowe i eksploatacyjne

Kolejnymi istotnymi czynnikami wpływającymi na pracę układów zawieszenia są warunki środowiskowe, do których należy zaliczyć: ilość i rodzaj opadów, temperaturę otoczenia, siłę oraz kierunek wiatru.

W zależności od rodzaju nawierzchni opady powodują zwiększenie oporów ruchu jazdy i zarazem zmniejszenie współczynnika przyczepności. W konsekwencji kierujący pojazdem zmuszony jest do częstszego hamowania i zmiany prędkości jazdy, przez co dochodzi do dodatkowych przemieszczeń elementów układu zawieszenia. Ponadto zalegająca na jezdni woda może przedostawać się do szczelin pomiędzy elementami układu zawieszenia, sprzyjając rozwojowi ognisk korozyjnych tych elementów.

Na układ zawieszenia pod względem trwałości jego elementów niekorzystnie wpływa jazda w okresie zimowym, szczególnie wtedy, gdy panują niskie temperatury powietrza lub występują opady śniegu i okresy jego topnienia. Prowadzone są wtedy prace zapobiegające występowaniu śliskości zimowej, a także jej likwidacji.

Prace zapobiegające śliskości zimowej polegają na uodpornieniu nawierzchni drogi na powstawanie na niej warstwy lodu lub zlodowaciałego śniegu. Wykorzystuje się do tego środki chemiczne, obniżające temperaturę zamarzania wody. Natomiast likwidacja śliskości zimowej polega na usunięciu z nawierzchni drogi lodu i ubitego śniegu przy użyciu środków: chemicznych, uszorstniających lub mechanicznie. W pracach tych często stosuje się połączenie wymienionych metod.

Środki stosowane do wymienionych prac mają charakteryzować się szybkością, skutecznością oraz trwałością w likwidowaniu śliskości zimowej. Powinny być także nieszkodliwe dla środowiska przyrodniczego oraz otoczenia, co oznacza, że nie mogą powodować korozji i uszkodzeń nawierzchni drogi, a także innych elementów infrastruktury oraz pojazdów.

W powszechnym użytku stosowane są następujące środki przeciwośliskościowe (Mazur, 2015; Czarna, 2015, 2013; Zarządzenie nr 7 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie wytycznych bieżącego utrzymania oraz prowadzenia czynności utrzymaniowych na drogach krajowych; Zarządzenie nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 5 września 2017 r. w sprawie wprowadzenia „Wytycznych zimowego utrzymania dróg”):

- niechemiczne – do których należy zaliczyć kruszywo naturalne lub sztuczne, łamane lub niełamane, drobne lub o ciągłym uziarnieniu do $D < 4$ mm według PN-EN 13043; zawartość ziaren poniżej 0,063 mm nie może przekraczać 15%, jednocześnie dopuszczalne jest do 15% ziaren powyżej 4 mm jednak nie większych niż 6,3 mm; można też stosować jednorodne mieszaniny kruszyw z solą o składzie wagowym od 95 do 97% kruszywa i od 5 do 3% soli;
- chemiczne – występujące w postaci stałej lub sypkiej; sól kamienna sucha (chlorek sodu NaCl), solanka – roztwór NaCl lub CaCl_2 o stężeniu 20-25%, sól zwilżona – 30% solanki (roztworu NaCl lub CaCl_2 o stężeniu 20-25%) + 70% suchej soli NaCl, chlorek wapnia techniczny (77-80% CaCl_2), chlorek magnezu MgCl_2 , mieszaniny NaCl z CaCl_2 lub z MgCl_2 w stosunku wagowym: 4:1-80% NaCl + 20% CaCl_2 , 3:1-75% NaCl + 25% CaCl_2 , 2:1-67% NaCl + 33% CaCl_2 .

Sól drogowa, głównie chlorek sodu (NaCl), jest środkiem powszechnie używanym do usuwania śniegu oraz lodu na drogach (Mazur, 2015). Wykorzystywanie soli do odladzania jezdni rozpoczęło się już w 1940 roku. Od tego czasu chlorek sodu jest szeroko stosowany w północno-wschodniej Europie i Ameryce Północnej (Mazur, 2015; Kelly i in., 2008). Chlorek wapnia i chlorek magnezu są wykorzystywane jako topnik, gdyż ulegają procesowi hydratacji, w wyniku którego wydzielą się ciepło (Czarna, 2013). Są związkami higroskopijnymi, działającymi skutecznie w niskich temperaturach, do -32°C (Mazur, 2015).

Eksploatacja samochodu po nawierzchni drogi, gdzie zastosowano chemiczne środki przeciwbłodzeniowe, naraża w szczególności układ zawieszenia na zaistnienie reakcji chemicznych z elementami jego konstrukcji (Rubach, Waluś, 2018), co może prowadzić do uszkodzenia powłoki zabezpieczającej, inicjując procesy korozyjne, a w konsekwencji rozwój zużycia zmęczeniowego.



Rysunek 3.4. Przykładowe uszkodzenie powłoki antykorozyjnej sprężyny kolumny McPhersona oraz widoczne zanieczyszczenia.

Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 3.4 przedstawiono przykład uszkodzenia powłoki antykorozyjnej sprężyny kolumny McPhersona. Co charakterystyczne – uszkodzenie rozpoznano na pierwszym zwoju sprężyny. Ta część osadzona jest najniżej, przez co zachodzi możliwość wpływu czynników środowiskowych, szczególnie związanych z usuwaniem oblodzenia drogi. Na amortyzatorze zauważono też zanieczyszczenia pochodzące od nawierzchni drogi, które w dalszej eksploatacji mogą skutkować rozwojem przedwczesnych uszkodzeń elementów zawieszenia.

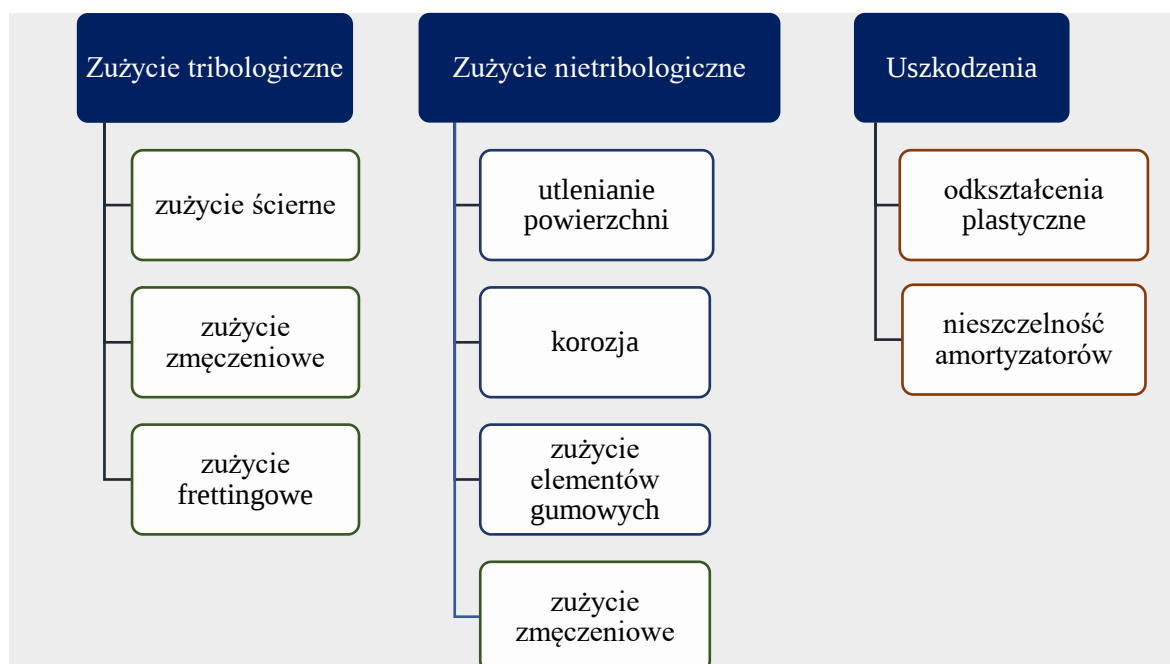
Analizując różne dane statystyczne dotyczące rodzajów dróg, można zauważyć, że duży odsetek stanowią drogi gruntowe (szutrowe). Cykliczna jazda po takich drogach, szczególnie przy zwiększonych prędkościach, powoduje, że luźno przemieszczający się żwir, kurz czy piasek przedostają się do przestrzeni pomiędzy elementami układu zawieszenia. Oscylacyjne przemieszczenia styczne współpracujących elementów układu zawieszenia wywołują przemieszczanie się tych zanieczyszczeń, powodując inicjację i rozwój zużycia ściernego. Zjawisko to będzie szczególnie widoczne przy nierównościach drogi, które wywołują zwiększoną pracę układu zawieszenia.

W ocenie warunków wpływających na stan techniczny elementów układu zawieszenia mają również znaczenie umiejętności kierowcy.

Jedną z zasadniczych reguł kierowania pojazdem jest zachowanie zasady jazdy rozważnej i ostrożnej. Wymaga ona od kierowcy bieżącej analizy stanu nawierzchni drogi oraz panujących warunków środowiska ruchu. Kierowca musi również mieć wiedzę na temat obciążenia pojazdu. Dobór prędkości, umiejętność pokonywania przeszkód itp. mają znaczący wpływ na pracę układu zawieszenia (Wicher, 2012). Kierujący pojazdem powinien odpowiednio wcześniej reagować na zmieniające się warunki drogowe, koleiny czy ubytki w nawierzchni. Brak reakcji ze strony kierowcy w postaci zmniejszenia prędkości jazdy oraz bezkrytyczne wjeżdżanie w ubytki nawierzchni drogi mają znaczny wpływ na powstawanie możliwych uszkodzeń elementów zawieszenia.

4. Formy zużycia i uszkodzenia elementów układów zawieszenia

Jak wynika z analizy treści zawartych w rozdziale 3, istnieje wiele czynników, które mają istotny wpływ na stan techniczny elementów układów zawieszenia. Czynniki te tworzą trudne warunki pracy układu zawieszenia, powodując, że elementy układu narażone są na rozwój zużycia bardziej niż inne układy pojazdu. Możliwe formy zużycia oraz uszkodzenia elementów układu zawieszenia zaprezentowano na rysunku 4.1.



Rysunek 4.1. Formy zużycia najczęściej spotykane w układzie zawieszenia.
Źródło: opracowanie własne.

Prowadząc obserwacje diagnostyczne układów zawieszenia samochodów dostawczych, zidentyfikowano zużycia, które można zakwalifikować do grupy zużyć tribologicznych, nietribologicznych oraz wynikających z uszkodzeń mechanicznych elementów układu.

Niekorzystny wpływ procesów zużywania na funkcjonowanie obiektów, w tym układu zawieszenia, można podzielić na następujące grupy (Niemczewska-Wójcik, 2018, 2022):

- wpływ na efektywność funkcjonowania obiektów technicznych, a więc na ich sprawność;
- wpływ na niezawodność działania obiektów technicznych, czyli prawdopodobieństwo działania zgodnie z założonymi parametrami pracy w danych warunkach oraz w określonym czasie;
- wpływ na trwałość obiektów technicznych, a więc założone parametry działania.

Projektowanie trwałych i sprawnych obiektów technicznych możliwe jest zatem przez zastosowanie wielokierunkowego podejścia eksperymentalnego pozwalającego poznać mechanizmy zużycia elementów współpracujących w funkcji wymuszeń eksploatacyjnych (Zwierzycki, Grądkowski, 2000).

Najczęściej spotykane uszkodzenia układu zawieszenia występujące na poszczególnych elementach zestawiono na rysunku 4.2.

Uszkodzenia i formy zużycia elementów układu zawieszenia			
belka	wahacz	drażek stabilizatora	uspężynowanie
uszkodzenia mechaniczne	uszkodzenia mechaniczne	uszkodzenia mechaniczne	pęknięcia piór
korozja	zużycie tulei metalowo-gumowej	korozja	pęknięcia sprężyn
pęknięcia zmęczeniowe	pęknięcia zmęczeniowe	zużycia elementów gumowych	korozja
	korozja		nieszczelność amortyzatora

Rysunek 4.2. Klasyfikacja zużyć i uszkodzeń elementów układu zawieszenia.

Źródło: opracowanie własne.

4.1. Zużycia tribologiczne

Zużycie tribologiczne jest wynikiem tarcia pomiędzy współpracującymi elementami, ma charakter mechaniczno-fizykochemiczny i występuje w warunkach tarcia suchego oraz mieszanego, a w ograniczonym zakresie również w warunkach tarcia płynnego (Lawrowski, 2009).

Zużycie tribologiczne prowadzi do utraty pierwotnych właściwości elementów znajdujących się w węźle tribologicznym, dlatego też powinno być analizowane pod względem zmian cech opisujących składowe węzła tarcia, do których należą (Szczerek, 1997; Niemczewska-Wójcik, 2018):

- cechy geometryczne: kształt i wymiary, stereometria powierzchni;
- cechy mechaniczne: moduł Younga, liczba Poissona, twardość, wytrzymałość, naprężenia własne;
- cechy fizykochemiczne: skład chemiczny, mikrostruktura, energia powierzchniowa, właściwości cieplne;
- cechy elektryczne: potencjał powierzchniowy, właściwości dielektryczne, właściwości elektrochemiczne i elektromagnetyczne.

Utrata pierwotnych właściwości elementów w przypadku układu zawieszenia samochodu może prowadzić do nieoczekiwanych sytuacji drogowych, dlatego też w dalszej części pracy dokonano analizy cech geometrycznych oraz wybranych cech fizykochemicznych elementów zajętych przez zużycia z grupy zużyć tribologicznych w celu rozpoznania m.in. charakteru i mechanizmu ich rozwoju.

Zużycie tribologiczne najczęściej występuje w miejscu połączeniu drążka stabilizatora z belką zawieszenia i dlatego jest trudne do rozpoznania podczas przeglądów diagnostycznych pojazdu. Aby można było zidentyfikować zużycie w tej części układu zawieszenia, należałoby zdemontować poszczególne jego elementy, co nie tylko jest czynnością pracochłonną, ale też nie należy do czynności standardowo wykonywanych podczas przeglądów diagnostycznych. Nierozpoznane na czas i rozwijające się zużycie w tej części połączenia może doprowadzić do inicjacji zużycia zmęczeniowego i w konsekwencji do pęknięcia. Na rysunku 4.3 przedstawiono przykład zużycia drążka stabilizatora.



Rysunek 4.3. Przykładowe zużycie drążka stabilizatora przedniego zawieszenia.

Źródło: opracowanie własne.

Drażek stabilizatora jest elementem poddanym obciążeniom na skręcanie, zamocowanym w układzie zawieszenia do ruchomych elementów prowadzących bezpośrednio koło lub za pomocą łączników (Kumar i in., 2021). Stąd też działają na niego obciążenia skręcające lub zginające, które mogą prowadzić do inicjacji zużycia zmęczeniowego. Ponadto drażek stabilizatora ulega rozwijającej się korozji, która jest efektem działania czynników zewnętrznych i drgań pochodzących od nierównego podłoża. Zjawisko korozji, które należy identyfikować najprawdopodobniej jako zużycie frettingowe, szczególnie widoczne jest w miejscu połączenia z belką. Zużyciu ulegają również tulejki gumowe, będące łącznikiem pomiędzy drażkiem stabilizatora a belką. Zużycia te noszą znamiona uszkodzeń typowych dla elementów gumowych, jak pęknięcia, starzenie się czy też ścieranie elementu gumowego przez obracający się w pewnym zakresie drażek stabilizatora.

Autorzy pracy *Stress analysis at the critical points of a stabilizer bar* (Andrade, Jesus, Vimiero, 2015) analizowali proces pęknięcia drażka stabilizatora. Analiza wykazała, że drażek stabilizatora wytrzymuje naprężenie 503,4 MPa przy przemieszczeniu 120 mm.

W rejonie pęknięcia drażka zaobserwowano propagację pęknięć promieniowych w punkcie koncentracji naprężeń w kierunku środka drażka. Analizując naprężenia strukturalne, autorzy zidentyfikowali potrzebę poprawy wytrzymałości zmęczeniowej materiału, gdyż dla przemieszczeń do 120 mm naprężenia, obliczone według kryterium zniszczenia von Misesa, mogą powodować gwałtowny rozwój zużycia zmęczeniowego drażka stabilizatora i w konsekwencji pęknięcie.

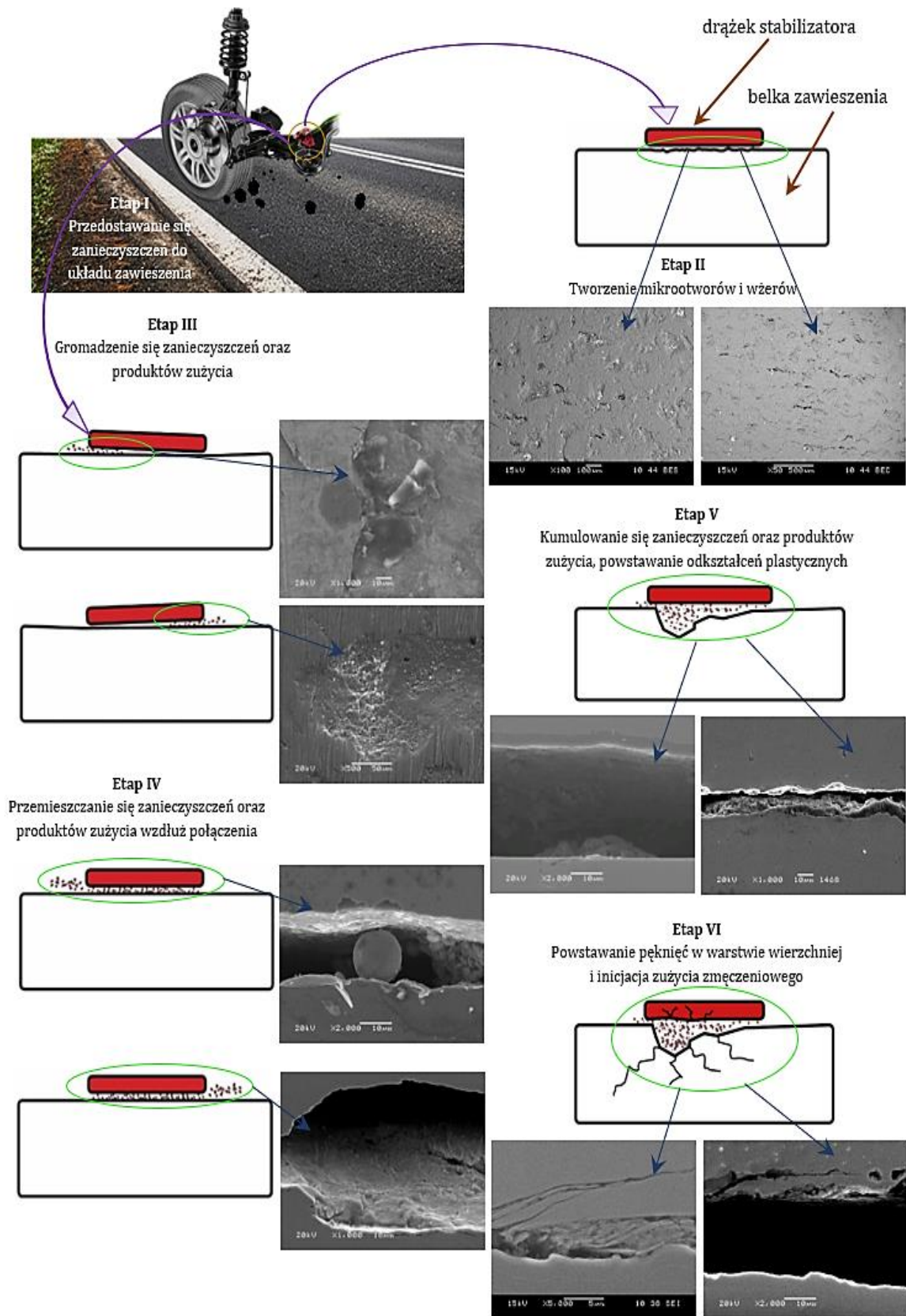
Mechanizm rozwoju zużycia tribologicznego w węźle tribologicznym belka zawieszenia – drażek stabilizatora, przedstawiono na rysunku 4.4. Na układ zawieszenia pojazdu będącego w ruchu działają czynniki pochodzące od obciążenia masą pojazdu i czynniki dynamiczne wywołane warunkami drogowymi. W wyniku cyklicznego działania tych czynników następowało będzie mikrougięcie współpracujących elementów i zarazem ich mikroprzemieszczanie styczne. Sytuacja ta sprzyja zmianie profilu powierzchni elementów. W wyniku tarcia tworzyć się będą mikrowyrwania powierzchni, mikrootwory i mikrowżery.

W czasie jazdy samochodem zanieczyszczenia znajdujące się na drodze, np. drobinki kurzu, ziarna piasku itp., przedostawać się będą do przestrzeni pomiędzy współpracującymi elementami poprzez wytworzoną w wyniku ugięcia tych elementów szparę. Tą samą drogą dostawać się będą również krople wody, środki uszorstniające nawierzchnię oraz sól drogowa.

Uwięzione zanieczyszczenia przemieszczać się będą wzdłuż połączenia, powodując degradację powierzchni elementów węzła tribologicznego w wyniku ścierania. Efektem tego działania będzie pogłębianie się mikrootworów i mikrowżerów oraz ślady wytarcia. W pogłębionych mikrootworach gromadzić się będą kolejne zanieczyszczenia oraz produkty ścierania powierzchni, prowadząc do odkształceń plastycznych warstwy wierzchniej elementów.

Dalsza eksploatacja pojazdu skutkować będzie powstawaniem pęknięć, które powiększać się będą w kierunku wnętrza warstwy wierzchniej elementu, powodując rozwój zużycia zmęczeniowego i pęknięcie elementu.

Sól drogowa i woda sprzyjać będą tworzeniu się ognisk korozyjnych, które będą dodatkowym obciążeniem dla węzła tribologicznego.



Rysunek 4.4. Mechanizm rozwoju zużycia w węźle tribologicznym belka zawieszenia – drążek stabilizatora.
Źródło: opracowanie własne.

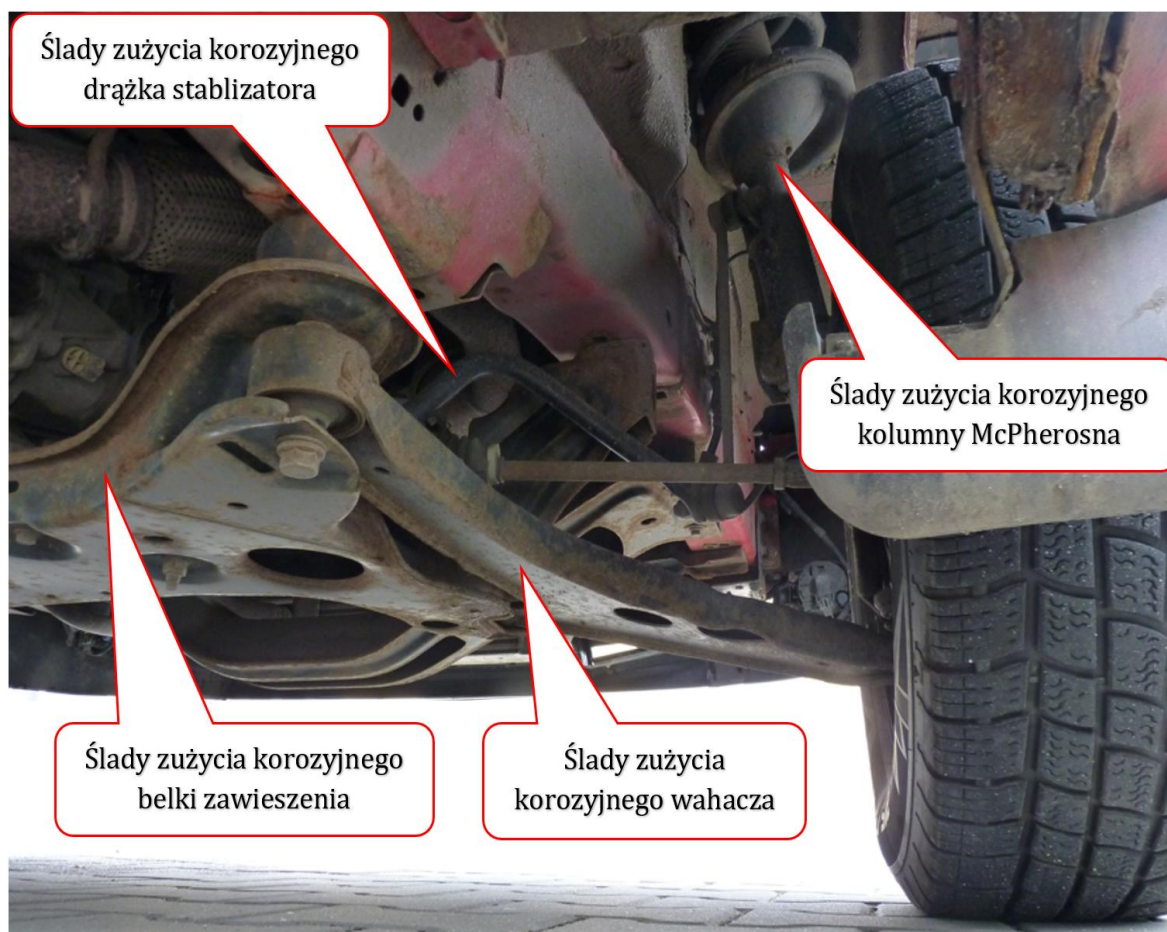
4.2. Zużycia nietribologiczne

Wśród zużyć obserwowanych na elementach układu zawieszenia odnotowano także te, które można zakwalifikować do grupy zużyć nietribologicznych. Zachodzą one poza obszarem tribologii (Niemczewska-Wójcik, 2018) i skutecznie obniżają trwałość układu.

Jednym z najczęstszych procesów niszczących układ zawieszenia pojazdów są ogniska korozji. Mają na to bezpośredni wpływ czynniki środowiskowe, takie jak średnie temperatury zimowe, względna wilgotność powietrza, obciążenie środowiska substancjami chemicznymi do zwalczania śliskości na drogach zimą (Liss, Żółtowski, 2014).

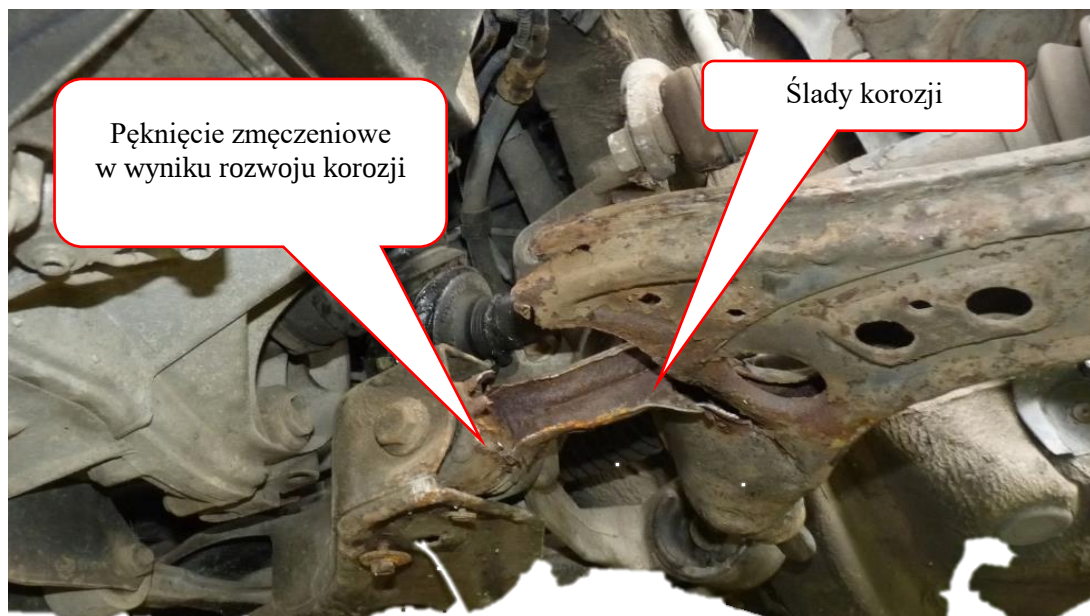
Konstrukcja pojazdu sprawia, że układ zawieszenia narażony jest bezpośrednio na działanie czynników zewnętrznych pochodzących z nawierzchni drogi, co ułatwia przepływ tych czynników pomiędzy jego elementami, tworząc odpowiednie środowisko do inicjacji i rozwoju zjawiska korozji i zużycia ściernego.

Korozja jest zjawiskiem mającym tendencję do stałego i regularnego rozwoju, szczególnie w wypadku, gdy nie zastosowano zabezpieczenia odpowiednimi środkami. W wyniku czynników mechanicznych może dojść do uszkodzenia zabezpieczenia antykorozyjnego elementów układu zawieszenia, przez co będą one bardziej podatne na zniszczenia. Na rysunku 4.5 zaprezentowano przykładowy układ zawieszenia samochodu dostawczego, w którym widoczne są ogniska korozji.



Rysunek 4.5. Ślady korozji na elementach układu zawieszenia przedniego.
Źródło: opracowanie własne.

Na rysunkach 4.6 i 4.7 zaprezentowano przykład wahacza oraz belki zawieszenia ze śladami korozji. Intensywność korozji wahacza była na tyle duża, że doprowadziła do rozwoju zużycia zmęczeniowego, co skutkowało jego pęknięciem.



Rysunek 4.6. Ślady korozji i pęknięcie zmęczeniowe wahacza przedniego zawieszenia.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 4.7. Ślady korozji belki przedniego zawieszenia.
Źródło: opracowanie własne.

Jazda po nierównej nawierzchni generuje drgania oraz przemieszczenia się elementów układu zawieszenia, a także powstawanie mikroszczelin, do których podczas jazdy przedostają się (i pozostają w nich) czynniki środowiska ruchu, powodując nasilenie zjawiska korozji. Cykliczna praca elementów układu zawieszenia wraz z czynnikami zewnętrznymi w konsekwencji prowadzi do powstawania naprężeń zmęczeniowych, które spowodują pęknięcie elementu.

Elementem wahacza często narażonym na uszkodzenia jest tuleja metalowo-gumowa. Jest to związane z działaniem sił skrętnych oraz liniowych, zarówno poprzecznych, jak też wzdłużnych.

Zadaniem tulei metalowo-gumowych zawieszenia pojazdu jest tłumienie drgań występujących podczas jazdy i naprężeń w elementach układu zawieszenia. Uszkodzeniu ulegać mogą zarówno części metalowe, jak i wypełnienie (gumowe lub w postaci oleju silikonowego). Przedstawione warunki pracy mogą prowadzić do rozrywania połączeń bądź też pękania części gumowej. Zjawisko to najczęściej obserwuje się w wahaczach przedniego zawieszenia. W przypadku łączników wypełnionych olejem silikonowym do uszkodzeń można zakwalifikować wycieki oleju. W wyniku eksploatacji i kontaktu z czynnikami środowiskowymi zachodzi proces utleniania gumy, który prowadzi do utraty elastyczności, kruchości i ostatecznie do pojawienia się sieci pęknięć na powierzchni starzejącej się gumy. Procesem przyspieszającym degradację gumy będzie eksploataowanie pojazdu w warunkach zimowych, w szczególności po drogach posypanych solą drogową.

Na rysunku 4.8 przedstawiono przykładowe zużycie tulei metalowo-gumowej w postaci popękanej części gumowej z widocznym procesem starzenia i skorodowanym metalowym pierścieniem zewnętrznym oraz deformacją plastyczną tulejki wewnętrznej. Warto wspomnieć, że tulejki wewnętrzne często wykonane są ze stopów aluminium, co przy zrobionej ze stali śrubie powoduje szybsze powstawanie korozji na styku tuleja – śruba. Skutkuje to dużym problemem przy wymianie takiej pary elementów, a w przypadku elementów, gdzie występują śruby regulujące zbieżność, brak możliwości jej ustawienia.



Rysunek 4.8. Przykładowe zużycie tulei metalowo-gumowej.
Źródło: opracowanie własne.

Elementy sprężyste zawieszenia przenoszą na nadwozie samochodu siły powodowane nierównościami nawierzchni, lecz same ulegają przy tym odkształceniom, gromadząc energię, która oddawana jest następnie w fazie rozprężania się sprężyn. W ten sposób każde ugięcie zawieszenia skutkuje całą serią pionowych wahań nadwozia, wygasających stopniowo z powodu tarcia występującego we wszystkich wzajemnie przemieszczających się elementach (Wittek i in., 2016). Sytuacja ta powoduje, że elementy sprężyste, w tym amortyzator, ulegają powolnemu, lecz ciągłemu zużyciu. Wzrost zużycia następuje na skutek zwiększonego obciążenia, którego przyczyną jest jazda po wybojach, zdeformowanej nawierzchni drogi lub po drodze nieutwardzonej. Sytuacja ta nasila się w przypadku pełnego obciążenia pojazdu.

Do typowych uszkodzeń eksploatacyjnych elementów sprężystych układu zawieszenia należy zaliczyć: rozwój zjawiska korozji, pęknięcia resorów, pęknięcia sprężyn oraz nieszczelność amortyzatorów.

Mechanizm pęknięć zmęczeniowych sprężyn może być następujący: na skutek odłamków wyrzucanych spod kół dochodzi do uszkodzenia powłoki ochronnej, co sprzyja inicjacji i rozwojowi zjawiska korozji. Gromadzące się w talerzach oporowych sprężyny pyły i inne zanieczyszczenia wchodzą w reakcję z wodą, tworząc związki o silnych właściwościach ściernych, które podczas eksploatacji przemieszczają się i powodują uszkodzenie powierzchni sprężyny. Zmienne warunki drogowe oraz środowiskowe w połączeniu z obciążeniami zewnętrznymi będą prowadziły do powstawania mikropęknięć, które z czasem przekształcą się w rozwój zużycia zmęczeniowego i pęknięcie sprężyny.

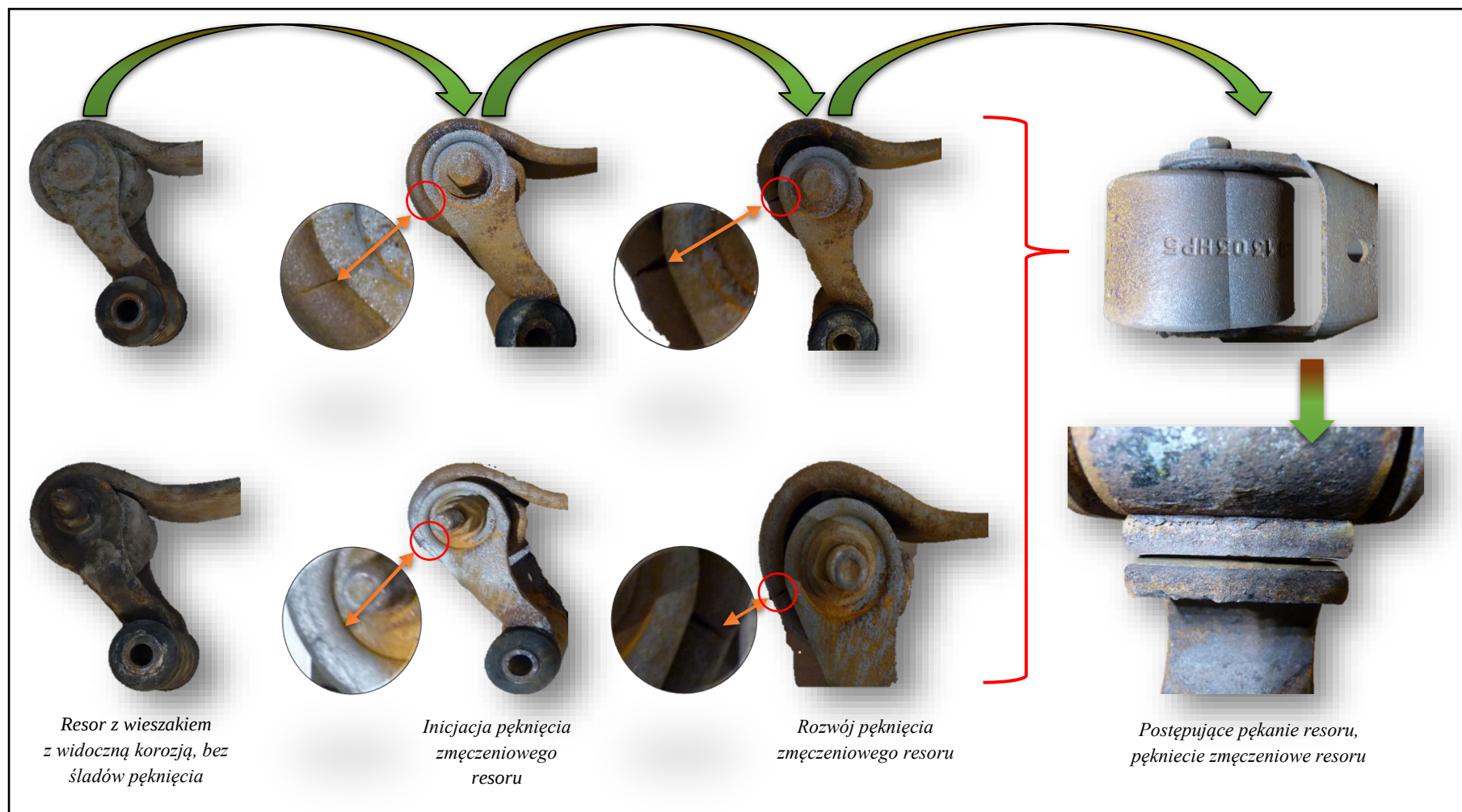
Na rysunku 4.9 przedstawiono mechanizm pęknięcia zmęczeniowego resoru jednego z samochodów dostawczych poddanych w niniejszej pracy analizie eksploatacyjnej. Wyraźnie widać wpływ czynników sprzyjających rozwojowi zużycia. Na resor działają czynniki pochodzące ze środowiska ruchu, przede wszystkim woda, środki uszorstniające, sól drogowa, które sprzyjają inicjacji zjawiska korozji. Ta z czasem, w połączeniu z drganiami występującymi pomiędzy piórami resoru, spowodowanymi stanem nawierzchni drogi, przyczynia się do inicjacji zużycia zmęczeniowego. W trakcie dalszej eksploatacji pojazdu w tych trudnych warunkach drogowych następuje rozwój zużycia zmęczeniowego i pojawiają się pierwsze mikropęknięcia w warstwie wierzchniej resoru, które są trudno zauważalne gołym okiem podczas przeglądu diagnostycznego. W dalszym okresie eksploatacji pojazdu następuje pogłębianie się pęknięć zmęczeniowych, które w konsekwencji doprowadzają do pęknięcia zmęczeniowego resoru. W zaprezentowanym przykładzie spiętrzenie naprężeń oraz rozwój zużycia zmęczeniowego, skutkującego pęknięciem, nastąpiły w pierwszym piórze w okolicy ucha. Szczegółowa analiza nie wykazała żadnych wtrąceń w strukturze warstwy wierzchniej. Jediną przyczyną pęknięcia zmęczeniowego resoru były warunki środowiskowe i drogowe panujące w czasie eksploatacji pojazdu.

Występowanie pęknięć na rozciąganej podczas eksploatacji (wewnętrznej) powierzchni pióra może być spowodowane również zbyt małą wartością naprężeń własnych w warstwie wierzchniej materiału. Naprężenia te powstają w wyniku prowadzonych podczas procesu technologicznego wytwarzania piór zabiegów kulowania lub śrutowania (Drozd, 2003).

Duży udział w uszkodzeniach resorów mają naprężenia pochodzące od pionowych przeciążeń resorów na zboczach, przy skrętach, nieumiejętnym lub niedbałym kierowaniu samochodem. Naprężenia takie wraz z naprężeniami pochodzącymi od momentów lub od sił bocznych mogą przekraczać granicę wytrzymałości (szczególnie w piórach głównych resorów obok zamocowania). W zwykłych warunkach eksploatacji trwałość resorów wiąże się z obciążeniem wynikającym z sił pionowych (Kułakowska, Patyk, 2011).

Autorzy pracy *Calculations of springs fatigue wear resistance using in McPherson's column* (Ibidem) prowadzili obliczenia odporności na zużycie zmęczeniowe sprężyn stosowanych w kolumnach McPhersona. Z przeprowadzonych przez nich analiz numerycznych procesu wynika, że badana sprężyna zawieszenia typu McPherson wytrzymuje obciążenia statyczne, ponieważ maksymalne naprężenia zredukowane wywołane oddziaływaniami zewnętrznymi wynoszą $\sigma_{zmax} \approx 416 \text{ [MPa]} < \sigma_{zdop}$.

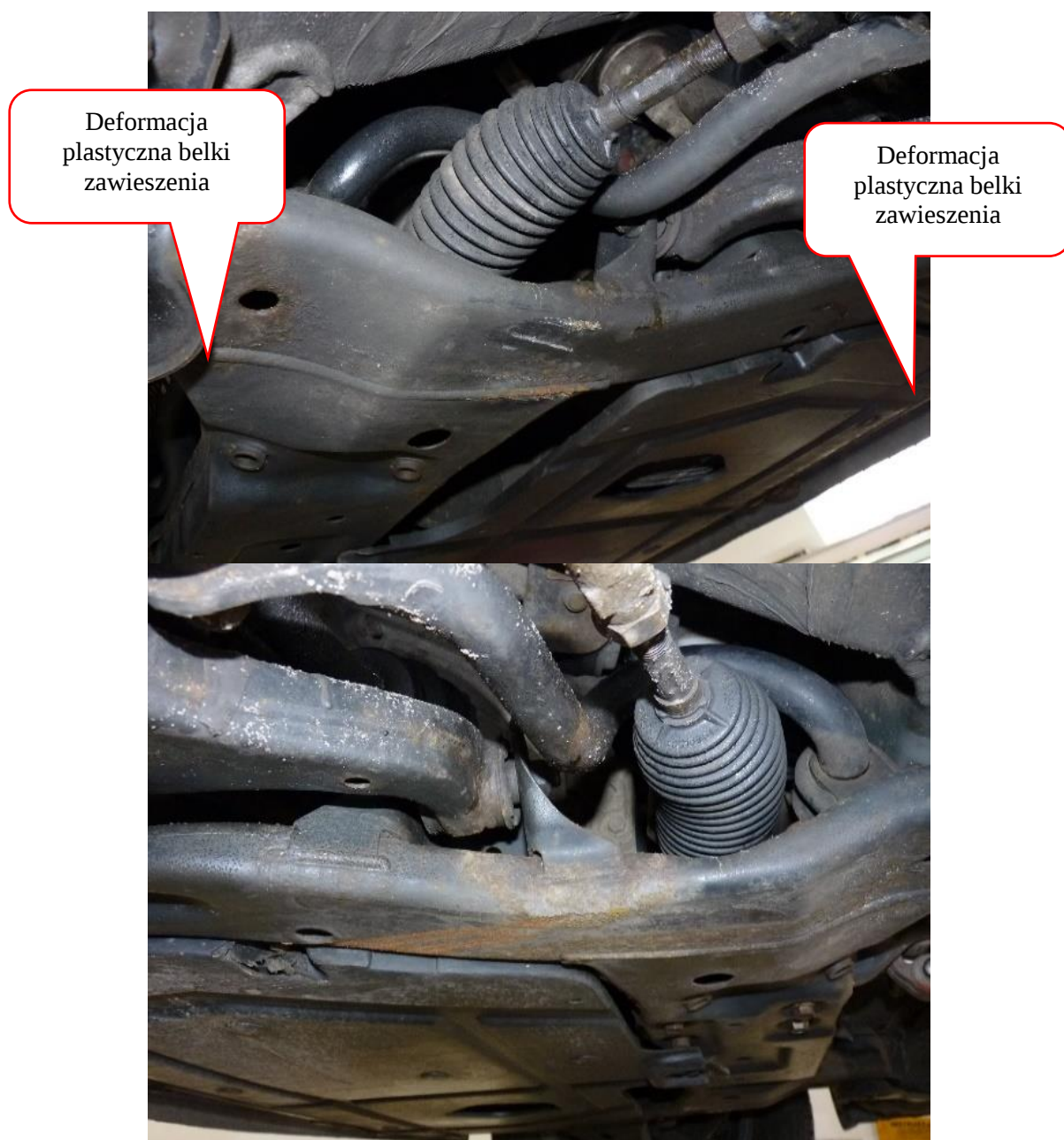
Autorzy pracy *Automotive suspension component behaviors driven on flat and rough* (Putra, Husaini, Ikbāl, 2021) badali trwałość zmęczeniową sprężyny śrubowej podczas jazdy po nierównej drodze. Okazało się, że przy częstej jeździe po takich nawierzchniach żywotność sprężyny pojazdów była czternastokrotnie mniejsza niż w wypadku pojazdów poruszających się po drodze bez nierówności. Badacze wskazali, że w takich warunkach kontur nawierzchni drogi zapewnia pionowe obciążenie, bezpośrednio działając na sprężynę śrubową, która zmniejsza obciążenie w pionie, gdy jej dolne ramię utrzymuje ładunek podczas skręcania.



Rysunek 4.9. Mechanizm pęknięcia zmęczeniowego resoru samochodu dostawczego.
Źródło: opracowanie własne.

4.3. Zużycia mechaniczne i pozostałe

Uszkodzenia mechaniczne elementów układu zawieszenia są najczęściej spotkanymi uszkodzeniami. Spowodowane są one działaniem impulsu uderzenia przez przedmioty znajdujące się na drodze. Może zaistnieć również bezpośrednie zahaczenie o elementy budowy drogi, jak krawężniki, separatory drogowe bądź też pozostałości po zużytych elementach infrastruktury drogowej i błędy w manewrowaniu pojazdem na parkingu (Kupiec, Kupiec, Jęsień, 2018). Przykładowe uszkodzenia spowodowane w powyższych okolicznościach przedstawiono na rysunku 4.10. Takie uszkodzenia mogą prowadzić do deformacji plastycznej zmieniającej geometrię zawieszenia.



Rysunek 4.10. Przykładowe uszkodzenia spowodowane najechaniem na przeszkodę drogową.
Źródło: opracowanie własne.

Użytkowanie pojazdu z tego typu uszkodzeniami sprzyja niesymetrycznemu rozkładowi sił dynamicznych, co w długotrwałej eksploatacji prowadzić będzie do rozwoju zużycia zmęczeniowego pozostałych elementów pojazdów. Ponadto zmiany takie mają wpływ na bezpieczeństwo jazdy (Woropay, Bojar, 2007; Kuranc, 2009), kierowność pojazdem, kinematykę (Pawłowski, 2018) oraz przedwczesne zużycie ogumienia. Uszkodzenia mechaniczne prowadzące do deformacji plastycznych, których wielkość jest na wczesnym etapie wzrokowo niedostrzegalna, w trakcie eksploatacji będą z czasem powodować pogłębianie się tych deformacji, co pogorszy wskaźniki geometrii pojazdu. Powyższa sytuacja będzie miała wpływ na zwiększenie kosztów eksploatacyjnych (Niewczas, Iganciuk, Dmowski, 2016), w skład których wchodzi m.in. koszty naprawy lub wymiany części (Michalski, Wojewoda, 2015) i koszty dodatkowych badań oraz przeglądów.

4.4. Analiza danych statystycznych odnośnie badań diagnostycznych

Współpracujące ze sobą części zawieszenia samochodu podlegają przyspieszonemu zużyciu na skutek działania sił tarcia. W wyniku zarówno długotrwałej współpracy, jak również zewnętrznych oddziaływań, w efekcie zużycia powstaje luz, który w trakcie eksploatacji powiększa się, mając bezpośrednie przełożenie na stan techniczny współpracujących elementów (Żebrowski-Koziół, Tarnowski, 2009). Wspomniane luzy są zjawiskiem naturalnym, których postęp rozwoju uzależniony jest od kilku czynników. Podstawowym czynnikiem jest sposób użytkowania pojazdu w ruchu drogowym i stan dróg, po których się porusza (Szutarski, 2006). Oceniając stan techniczny układu zawieszenia, należy (Diagnozowanie układu zawieszenia pojazdu samochodowego [cz. 3]):

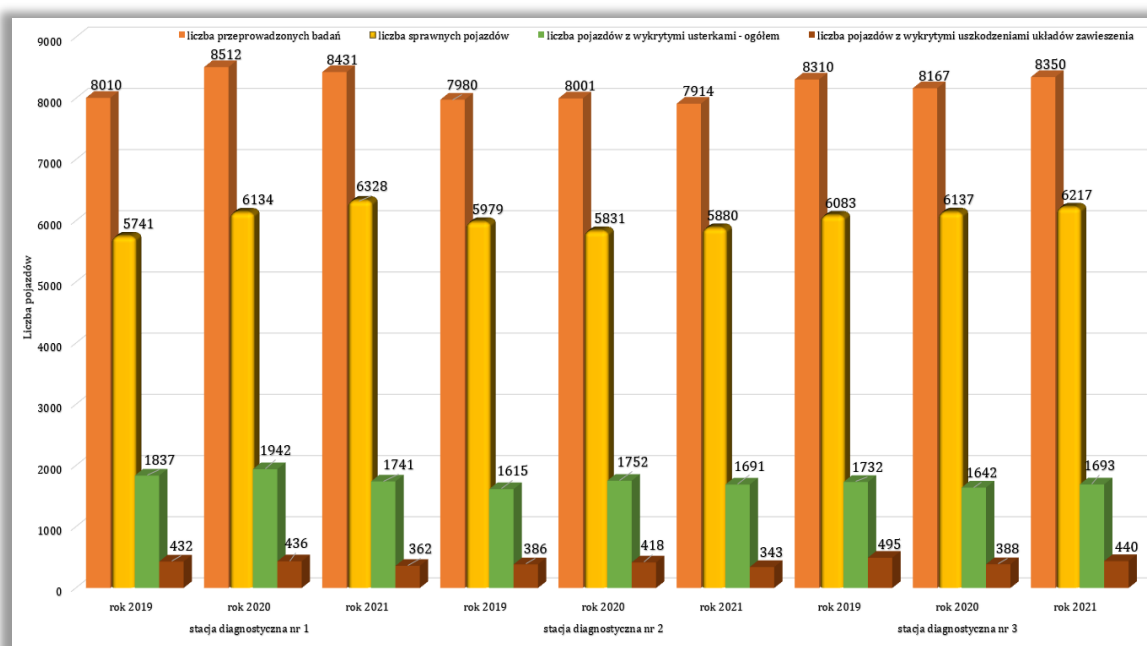
- zwrócić uwagę, na luzy w połączeniach (przeguby, sworznie, łożyskowanie);
- ocenić stan i sztywność elementów sprężystych;
- sprawdzić stan i stopień tłumienia elementów tłumiących (amortyzatorów);
- ocenić opory tarcia związane z ruchem zawieszenia.

Warto w tym miejscu jeszcze raz podkreślić, że układ zawieszenia jest ważny z punktu widzenia bezpieczeństwa eksploatacji pojazdu, gdyż jakiegokolwiek uszkodzenia jego elementów mogą skutkować poważnymi konsekwencjami. Najgroźniejszym skutkiem gwałtownego uszkodzenia układu zawieszenia w trakcie jazdy może być zdarzenie drogowe (Burdzik, Sobczak, 2008).

Układ zawieszenia zapewnia właściwy kontakt kół z podłożem przez skuteczne tłumienie drgań pochodzących od nierówności i zapewnia prawidłową przyczepność do podłoża. W szczególności jego zadaniem jest wyeliminowanie momentów oderwania się kół wskutek uskoków lub przechyłów. Ponadto układ zawieszenia musi zapewniać odpowiednie ustawienie kół oraz kinetykę całego pojazdu, rozumianą jako ograniczenie przechyłu podczas skręcania, gwałtownego hamowania bądź też dynamicznego przyspieszania. Przywołane zadania układ zawieszenia musi spełniać możliwie w identyczny sposób niezależnie od warunków obciążenia pojazdu, prędkości jazdy i środowiska ruchu. Dlatego też konstruktorzy współcześnie produkowanych pojazdów dążą do zastosowania coraz to nowszych materiałów, odpornych na różnego rodzaju czynniki zewnętrzne. Wykorzystuje się też nowoczesną, wysoko precyzyjną technologię produkcji elementów, a także stosuje się różne techniki zabezpieczenia

elementów przed zużyciem. Dzięki wysoko zaawansowanej technologii produkcji układy zawieszenia charakteryzują się dużą sprawnością. Jednakże wieloletnie użytkowanie pojazdów w wymienionych wcześniej warunkach może doprowadzać do szybszego zużywania się poszczególnych elementów (Gardulski, Warczek, 2003). Potwierdzeniem powyższej tezy może być analiza danych dotyczących liczby pojazdów z wykrytymi uszkodzeniami układu zawieszenia.

Bazując na danych z lat 2019, 2020, 2021 uzyskanych z 3 stacji diagnostycznych, które w ciągu roku obsługują po ok. 8 000 pojazdów, na rysunku 4.11 zaprezentowano zestawienie liczby badań diagnostycznych pojazdów wykonanych w danej stacji z liczbą pojazdów sprawnych, liczbą pojazdów z wykrytymi usterkami ogółem oraz liczbą pojazdów z wykrytymi uszkodzeniami układów zawieszenia.



Rysunek 4.11. Liczba badań diagnostycznych pojazdów wykonanych w danej stacji, liczba pojazdów sprawnych, liczba pojazdów z wykrytymi usterkami ogółem, liczba pojazdów z wykrytymi uszkodzeniami układów zawieszenia.

Źródło: opracowanie własne.

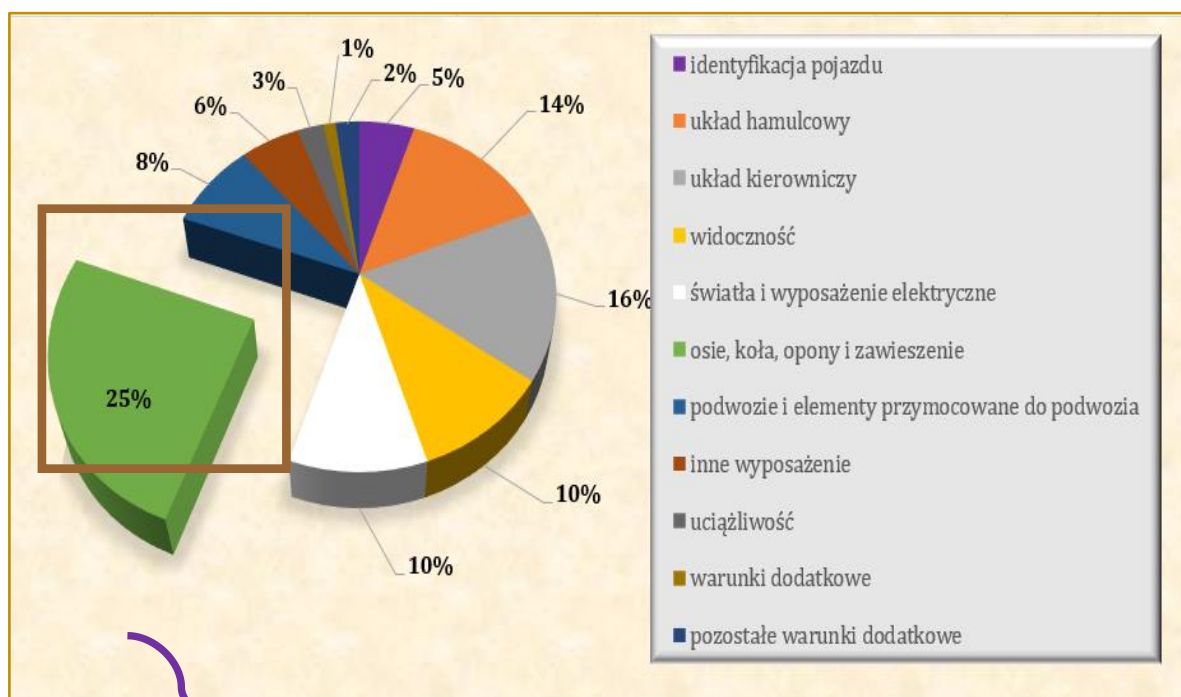
Dla porównania w tabeli 4.1 zestawiono ogólnopolskie dane dotyczące liczby badań diagnostycznych i liczbę wyników negatywnych tych badań. Dane pochodzą z bazy Centralnej Ewidencji Pojazdów i Kierowców.

Tabela 4.1

Zestawienie danych dotyczących liczby badań diagnostycznych i liczby wyników negatywnych tych badań

Rok	Liczba badań diagnostycznych	Liczba wyników negatywnych
2019	18 583 828	546 635
2020	18 936 426	464 931
2021	18 208 873	437 080

Źródło: opracowanie własne.

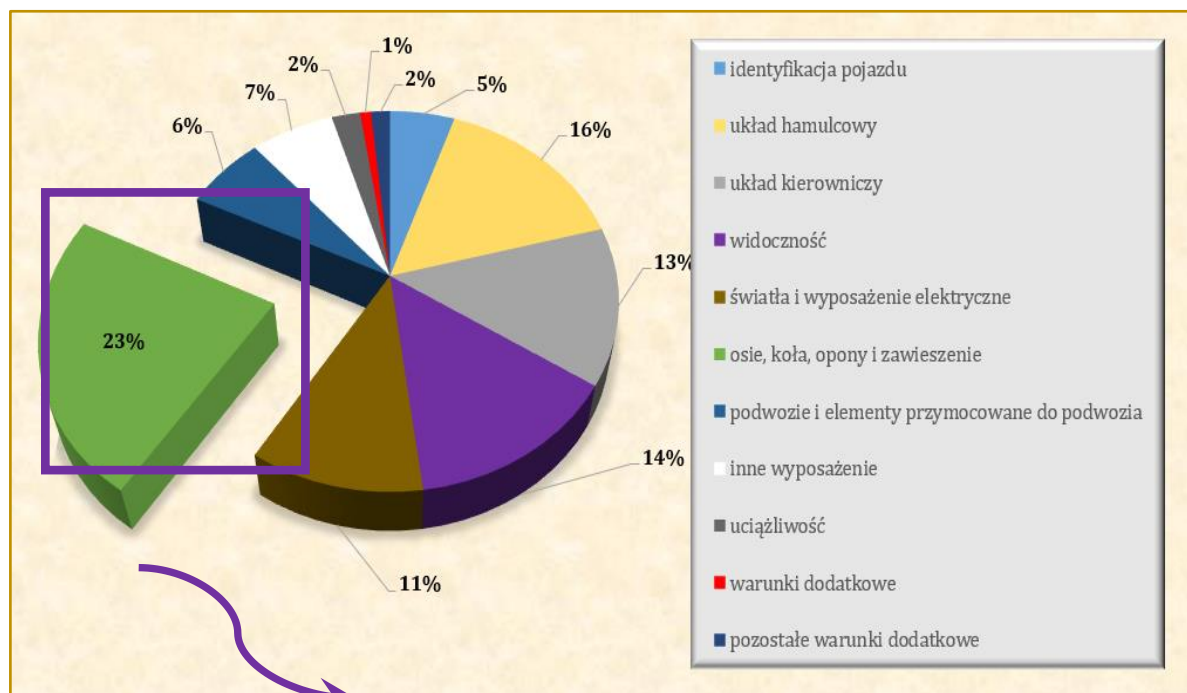


Nazwa usterki skutkującej uznaniem stanu technicznego za niezadowalający	2019 rok		
	Stacja 1	Stacja 2	Stacja 3
Pęknięcie lub odkształcenie osi. Niepewne mocowanie do pojazdu. Pogorszona stabilność toru jazdy, negatywny wpływ na działanie; nadmierny ruch względem mocowań. Niebezpieczna przeróbka (<i>oznacza przeróbkę mającą niekorzystny wpływ na bezpieczeństwo pojazdu na drodze lub mającą nieproporcjonalnie niekorzystny wpływ na środowisko</i>). Wpływ na stabilność toru jazdy, nieprawidłowe działanie, za mała odległość od innych części pojazdu lub podłoża.	14	12	16
Nadmierne zużycie sworznia zwrotnicy lub łożyska sworznia. Prawdopodobieństwo obluźowania; pogorszenie stabilności toru jazdy.	44	40	52
Zbyt duży luz na łożysku koła. Pogorszenie stabilności toru jazdy; niebezpieczeństwo zniszczenia. Głośna praca łożyska.	25	21	33
Brakujące lub obluźowane śruby lub nakrętki mocujące koła. Brak elementów mocujących koła lub obluźowanie w takim stopniu, że ma bardzo poważny wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego. Zużycie lub uszkodzenie piasty. Zużycie lub uszkodzenie mające wpływ na bezpieczne mocowanie kół.	10	11	9

Rozmiar, kompletaacja, kompatybilność lub typ koła niezgodny ze świadectwem homologacji typu WE pojazdu/typu UE pojazdu lub wymaganiami określonymi w rozporządzeniu o warunkach technicznych – w sposób mający wpływ na bezpieczeństwo jazdy.	14	11	16
Pęknięcia lub odkształcenia osi (belki zawieszenia).	24	17	24
Pęknięcia lub widoczne odkształcenie zwrotnic lub wahaczy.	31	25	45
Nadmierny luz: na sworzniu zwrotnicy, na sworzniach wahaczy, w łożyskach kół.	39	32	38
Naprawy osi zwrotnic lub wahaczy wykonane techniką spawania lub zgrzewania.	7	4	8
Niepewne mocowanie resorów do podwozia lub osi. Widoczne względne przemieszczenie się. Mocowania bardzo poważnie obluzowane.	17	15	19
Uszkodzenie lub pęknięcie części resoru. Bardzo poważny wpływ na działanie głównego pióra resoru lub piór dodatkowych.	18	19	16
Amortyzator jest uszkodzony i wykazuje duże wycieki lub niewłaściwe działanie.	43	38	52
Niepewne mocowanie części do podwozia lub osi. Prawdopodobieństwo obluzowania; pogorszenie stabilności toru jazdy.	25	19	21
Uszkodzenie, pęknięcie lub nadmierna korozja elementu. Wpływ na stabilność elementu lub jego pęknięcie.	39	33	51
Niebezpieczna przeróbka. Niewystarczający odstęp od innych części pojazdu; układ nie działa.	10	13	8
Nadmierne zużycie sworznia lub łożysk sworznia, lub sworzni wahaczy. Prawdopodobieństwo obluzowania; pogorszenie stabilności toru jazdy.	29	25	28
Poważne zużycie osłony gumowej. Brak lub pęknięcie osłony gumowej.	22	26	33
Uszkodzenie, przeróbka lub zużycie dowolnego elementu w stopniu mogącym mieć niekorzystny wpływ na działanie układu. Słyszalny wypływ powietrza z układu.	21	25	26
	432	386	495

Rysunek 4.12. Procentowy udział usterek pojazdu oraz liczba uszkodzeń układu zawieszenia w 2019 roku.

Źródło: opracowanie własne.

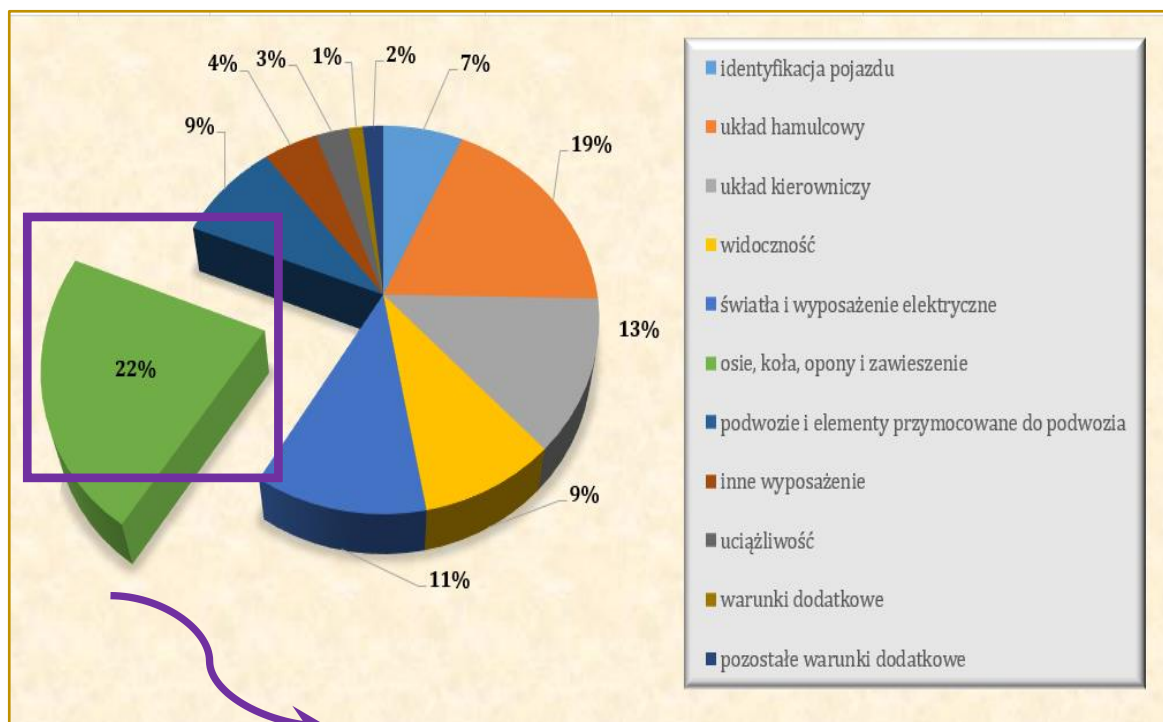


Nazwa usterki skutkującej uznaniem stanu technicznego za niezadowalający	2020 rok		
	Stacja 1	Stacja 2	Stacja 3
Pęknięcie lub odkształcenie osi. Niepewne mocowanie do pojazdu. Pogorszona stabilność toru jazdy, negatywny wpływ na działanie; nadmierny ruch względem mocowań. Niebezpieczna przeróbka (oznacza przeróbkę mającą niekorzystny wpływ na bezpieczeństwo pojazdu na drodze lub mającą nieproporcjonalnie niekorzystny wpływ na środowisko). Wpływ na stabilność toru jazdy, nieprawidłowe działanie, za mała odległość od innych części pojazdu lub podłoża.	19	21	19
Nadmierne zużycie sworznia zwrotnicy lub łożyska sworznia. Prawdopodobieństwo obluźwienia; pogorszenie stabilności toru jazdy.	29	27	22
Zbyt duży luz na łożysku koła. Pogorszenie stabilności toru jazdy; niebezpieczeństwo zniszczenia. Głośna praca łożyska.	29	30	26
Brakujące lub obluźwane śruby lub nakrętki mocujące koła. Brak elementów mocujących koła lub obluźwienie w takim stopniu, że ma bardzo poważny wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego. Zużycie lub uszkodzenie piasty. Zużycie lub uszkodzenie mające wpływ na bezpieczne mocowanie kół.	28	25	19

Rozmiar, kompletacja, kompatybilność lub typ koła niezgodny ze świadectwem homologacji typu WE pojazdu/typu UE pojazdu lub wymaganiami określonymi w rozporządzeniu o warunkach technicznych – w sposób mający wpływ na bezpieczeństwo jazdy.	26	23	21
Pęknięcia lub odkształcenia osi (belki zawieszenia).	25	26	21
Pęknięcia lub widoczne odkształcenie zwrotnic lub wahaczy.	32	27	23
Nadmierny luz: na sworzniu zwrotnicy, na sworzniach wahaczy, w łożyskach kół.	31	29	26
Naprawy osi zwrotnic lub wahaczy wykonane techniką spawania lub zgrzewania.	12	8	11
Niepewne mocowanie resorów do podwozia lub osi. Widoczne względne przemieszczenie się. Mocowania bardzo poważnie obluzowane.	23	19	21
Uszkodzenie lub pęknięcie części resoru. Bardzo poważny wpływ na działanie głównego pióra resoru lub piór dodatkowych.	17	14	15
Amortyzator jest uszkodzony i wykazuje duże wycieki lub niewłaściwe działanie.	32	29	24
Niepewne mocowanie części do podwozia lub osi. Prawdopodobieństwo obluzowania; pogorszenie stabilności toru jazdy.	24	22	21
Uszkodzenie, pęknięcie lub nadmierna korozja elementu. Wpływ na stabilność elementu lub jego pęknięcie.	34	39	42
Niebezpieczna przeróbka. Niewystarczający odstęp od innych części pojazdu; układ nie działa.	11	9	11
Nadmierne zużycie sworznia lub łożysk sworznia, lub sworzni wahaczy. Prawdopodobieństwo obluzowania; pogorszenie stabilności toru jazdy.	19	16	17
Poważne zużycie osłony gumowej. Brak lub pęknięcie osłony gumowej.	23	28	25
Uszkodzenie, przeróbka lub zużycie dowolnego elementu w stopniu mogącym mieć niekorzystny wpływ na działanie układu. Słyszalny wypływ powietrza z układu.	22	26	24
	436	418	388

Rysunek 4.13. Procentowy udział usterek pojazdu oraz liczba uszkodzeń układu zawieszenia w roku.

Źródło: opracowanie własne.



Nazwa usterki skutkującej uznaniem stanu technicznego za niezadowalający	2021 rok		
	Stacja 1	Stacja 2	Stacja 3
Pęknięcie lub odkształcenie osi. Niepewne mocowanie do pojazdu. Pogorszona stabilność toru jazdy, negatywny wpływ na działanie; nadmierny ruch względem mocowań. Niebezpieczna przeróbka (oznacza przeróbkę mającą niekorzystny wpływ na bezpieczeństwo pojazdu na drodze lub mającą nieproporcjonalnie niekorzystny wpływ na środowisko). Wpływ na stabilność toru jazdy, nieprawidłowe działanie, za mała odległość od innych części pojazdu lub podłoża.	20	21	24
Nadmierne zużycie sworznia zwrotnicy lub łożyska sworznia. Prawdopodobieństwo obluzowania; pogorszenie stabilności toru jazdy.	24	28	26
Zbyt duży luz na łożysku koła. Pogorszenie stabilności toru jazdy; niebezpieczeństwo zniszczenia. Głośna praca łożyska.	21	16	23
Brakujące lub obluzowane śruby lub nakrętki mocujące koła. Brak elementów mocujących koła lub obluzowanie w takim stopniu, że ma bardzo poważny wpływ na bezpieczeństwo ruchu drogowego. Zużycie lub uszkodzenie piasty. Zużycie lub uszkodzenie mające wpływ na bezpieczne mocowanie kół.	13	6	12

Rozmiar, kompletacja, kompatybilność lub typ koła niezgodny ze świadectwem homologacji typu WE pojazdu/typu UE pojazdu lub wymaganiami określonymi w rozporządzeniu o warunkach technicznych – w sposób mający wpływ na bezpieczeństwo jazdy.	12	8	19
Pęknięcia lub odkształcenia osi (belki zawieszenia).	21	19	23
Pęknięcia lub widoczne odkształcenie zwrotnic lub wahaczy.	29	23	37
Nadmierny luz: na sworzniu zwrotnicy, na sworzniach wahaczy, w łożyskach kół.	23	29	36
Naprawy osi zwrotnic lub wahaczy wykonane techniką spawania lub zgrzewania.	9	7	6
Niepewne mocowanie resorów do podwozia lub osi. Widoczne względne przemieszczenie się. Mocowania bardzo poważnie obluźowane.	14	15	25
Uszkodzenie lub pęknięcie części resoru. Bardzo poważny wpływ na działanie głównego pióra resoru lub piór dodatkowych.	13	9	17
Amortyzator jest uszkodzony i wykazuje duże wycieki lub niewłaściwe działanie.	31	28	39
Niepewne mocowanie części do podwozia lub osi. Prawdopodobieństwo obluźowania; pogorszenie stabilności toru jazdy.	19	22	23
Uszkodzenie, pęknięcie lub nadmierna korozja elementu. Wpływ na stabilność elementu lub jego pęknięcie.	36	41	39
Niebezpieczna przeróbka. Niewystarczający odstęp od innych części pojazdu; układ nie działa.	15	15	14
Nadmierne zużycie sworznia lub łożysk sworznia, lub sworzni wahaczy. Prawdopodobieństwo obluźowania; pogorszenie stabilności toru jazdy.	17	19	25
Poważne zużycie osłony gumowej. Brak lub pęknięcie osłony gumowej.	24	18	26
Uszkodzenie, przeróbka lub zużycie dowolnego elementu w stopniu mogącym mieć niekorzystny wpływ na działanie układu. Słyszalny wypływ powietrza z układu.	21	19	26
	362	343	440

Rysunek 4.14. Procentowy udział usterek pojazdu oraz liczba uszkodzeń układu zawieszenia w 2021 roku.

Źródło: opracowanie własne.

Na rysunkach 4.12-4.14 zaprezentowano procentowy udział usterek pojazdu i liczbę uszkodzeń układu zawieszenia w poszczególnych latach 2019-2021, łącznie dla 3 stacji diagnostycznych, z których pozyskano analizowane dane. Przedstawione dane dotyczące przedmiotu i zakresu badania oraz usterki skutkujące uznaniem stanu technicznego za niezadawalający zaczerpnięto z rozporządzenia (Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania badań technicznych pojazdów oraz wzorów dokumentów stosowanych przy tych badaniach, 26.06.2012).

Załącznik do tego rozporządzenia (Ibidem) stwierdzone podczas badania technicznego usterki dzieli na 3 grupy, tj.:

- usterki drobne (UD) – usterki niemające istotnego wpływu na bezpieczeństwo ruchu drogowego i ochrony środowiska, które nie powodują ograniczenia w dalszym używaniu pojazdu;
- usterki poważne (UP) – usterki mogące zagrażać bezpieczeństwu ruchu drogowego lub naruszać wymagania ochrony środowiska albo inne istotne nieprawidłowości, które dają podstawę do ograniczenia dalszego używania pojazdu oraz określenia warunków tego używania;
- usterki niebezpieczne (UN) – usterki powodujące bezpośrednie zagrożenie dla bezpieczeństwa ruchu drogowego lub naruszające wymagania ochrony środowiska, w stopniu uniemożliwiającym używanie pojazdu w ruchu drogowym, które powodują niedopuszczenie do dalszego używania pojazdu.

Przedstawione dane dotyczące poszczególnych usterek układu zawieszenia stanowią sumę wszystkich trzech wymienionych kwalifikacji.

Z przytoczonych danych wynika, że w każdym analizowanym roku najczęstszymi usterekami pojazdu wykrywanymi przez diagnostę podczas przeglądów diagnostycznych były uszkodzenia układu zawieszenia. Mieszczą się one w przedziale 22-25% wszystkich wykrywanych usterek.

Przeprowadzone badania i analiza wyników pozwalają przedstawić wniosek, że warunki eksploatacji wpływają znacząco na stan techniczny układu zawieszenia i rozwijające się w nim uszkodzenia oraz zużycia. Stopień zużycia i rodzaj uszkodzeń poszczególnych elementów zależy od stanu nawierzchni drogi oraz intensywności panujących warunków środowiskowych.

Ze względu na warunki drogowe i usytuowanie układu zawieszenia w pojeździe jego elementy narażone są w głównej mierze na występowanie ognisk korozyjnych. Takie uszkodzenia są stosunkowo łatwe do zdiagnozowania i wyeliminowania. W układzie zawieszenia jednak obserwowane są innego rodzaju zużycia, które trudno zaobserwować podczas przeglądów diagnostycznych, a ich rozwój przyczynia się do pęknięcia elementu. Dlatego należy rozpoznać te zużycia oraz poznać mechanizm ich rozwoju i zaproponować odpowiednie środki zapobiegawcze zmniejszające lub niwelujące te zużycia.

5. Cel i zakres pracy

Układ zawieszenia pełni w pojeździe ważną rolę, ponieważ odpowiada za bezpieczeństwo jazdy, a także komfort podróży. Warunki jego pracy, które uzależnione są w dużej mierze od czynników związanych ze strukturą powierzchni dróg i warunków środowiskowych, mogą jednak prowadzić do przedwczesnego niszczenia elementów układu. Niezauważone podczas codziennej obsługi i w trakcie przeglądów technicznych mikrouszkodzenia rozwijają się, doprowadzając do rozwoju zużycia zmęczeniowego, którego efektem końcowym jest pęknięcie elementu.

Mając na względzie rolę, jaką pełni układ zawieszenia w pojeździe, wyznaczono cel niniejszej pracy, którym jest ocena wpływu warunków eksploatacji pojazdu na zaistnienie uszkodzeń oraz inicjację i rozwój zużycia elementów układu zawieszenia. Na podstawie uzyskanych wyników badań postawione zostaną wnioski poznawcze, utylitarne i odnoszące się do propozycji dalszych badań naukowych nad układem zawieszenia.

Cel pracy osiągnięto przez obserwacje stanu technicznego układu zawieszenia 5 samochodów dostawczych, pracujących w firmie kurierskiej i poruszających się po drogach o zróżnicowanych warunkach terenowych i środowiskowych. Założono, że samochody nowe fabrycznie pracować będą przez 100 tys. km, przewożąc ładunki o zróżnicowanym ciężarze. Po tym czasie zdemontowany zostanie układ zawieszenia z pojazdu i rozpoczną się badania laboratoryjne pod kątem analizy uszkodzeń i form zużycia poszczególnych elementów. W przypadku zauważenia przedwczesnych uszkodzeń elementów układu zawieszenia, dyskwalifikujących pojazd z dalszej eksploatacji, części będą demontowane i poddawane badaniom laboratoryjnym w celu oceny wielkości zużycia.

Niniejszą pracę podzielono na 9 rozdziałów. W rozdziale 1. podano powody podjęcia tematu pracy i omówiono m.in. skutki uszkodzeń eksploatacyjnych układu zawieszenia i ich następstwa w powiązaniu ze zdarzeniami drogowymi.

W rozdziale 2. umieszczono informacje dotyczące obecnego stanu wiedzy w zakresie układów zawieszenia. Rozdział ten rozpoczął rysem historycznym rozwoju technicznego samochodów, skupiając się na elementach układu zawieszenia. Proces ewolucji postępu konstrukcyjnego przedstawiono za pomocą osi czasu. W dalszej części rozdziału dokonano podziału układów zawieszenia oraz scharakteryzowano ich budowę. Ostatnia część rozdziału zawiera przegląd literatury odnoszącej się do badań innych autorów w temacie zużycia elementów zawieszenia, propozycji modyfikacji i nowych rozwiązań konstrukcyjnych, a także stanowisk badawczych.

W rozdziale 3. scharakteryzowano warunki pracy układów zawieszenia. Uwzględniono podział czynników wpływających na stan techniczny układów zawieszenia ze względu na obciążenia statyczne oraz dynamiczne, a także warunki klimatyczne i środowiska ruchu. Wspomniano również o roli kierowcy pojazdu, jako osoby mającej istotny wpływ na sposób jazdy i w konsekwencji na stan techniczny układu zawieszenia.

Rozdział 4. zawiera charakterystykę zużyć i uszkodzeń układów zawieszenia. Omówiono typowe uszkodzenia elementów układu. Zaznaczono wpływ warunków jazdy na powstanie uszkodzeń oraz omówiono mechanizm ich rozwoju. Przywołane uszkodzenia zobrazowano przykładową dokumentacją fotograficzną.

W rozdziale 5. zdefiniowano cel pracy, którego założeniem jest ocena wpływu warunków eksploatacji pojazdu na zaistnienie uszkodzeń, a także inicjację i rozwój zużycia elementów układu zawieszenia. Dokonano również krótkiej charakterystyki poszczególnych rozdziałów znajdujących się w pracy.

W rozdziale 6. omówiono metodykę badań. W ramach badań przeprowadzono obserwacje makroskopowe elementów układu zawieszenia w celu oceny ich stanu technicznego. Następnie wybrane elementy poddano szczegółowym badaniom laboratoryjnym. W tym zakresie wykonano obserwacje mikroskopowe oraz analizę składu chemicznego produktów zużycia, wykonano pomiar chropowatości i twardości powierzchni, a także wyznaczono charakterystykę tulei wahacza. Przeprowadzono też pomiar nawierzchni wybranych odcinków drogi, po której poruszały się monitorowane w pracy pojazdy.

Rozdział 7. zawiera wyniki przeprowadzonych badań oraz obserwacji. Szczegółowym badaniom laboratoryjnym poddano takie elementy, jak np.: belka zawieszenia, drążek stabilizatora, wahacz oraz tuleja metalowo-gumowa.

Uzupełnieniem pracy jest rozdział 8., w którym dokonano szacowania wskaźników niezawodności układu zawieszenia dla pojazdów analizowanych w niniejszej pracy. W tym celu wyznaczono 4 podstawowe charakterystyki niezawodnościowe z wykorzystaniem rozkładu Weibulla.

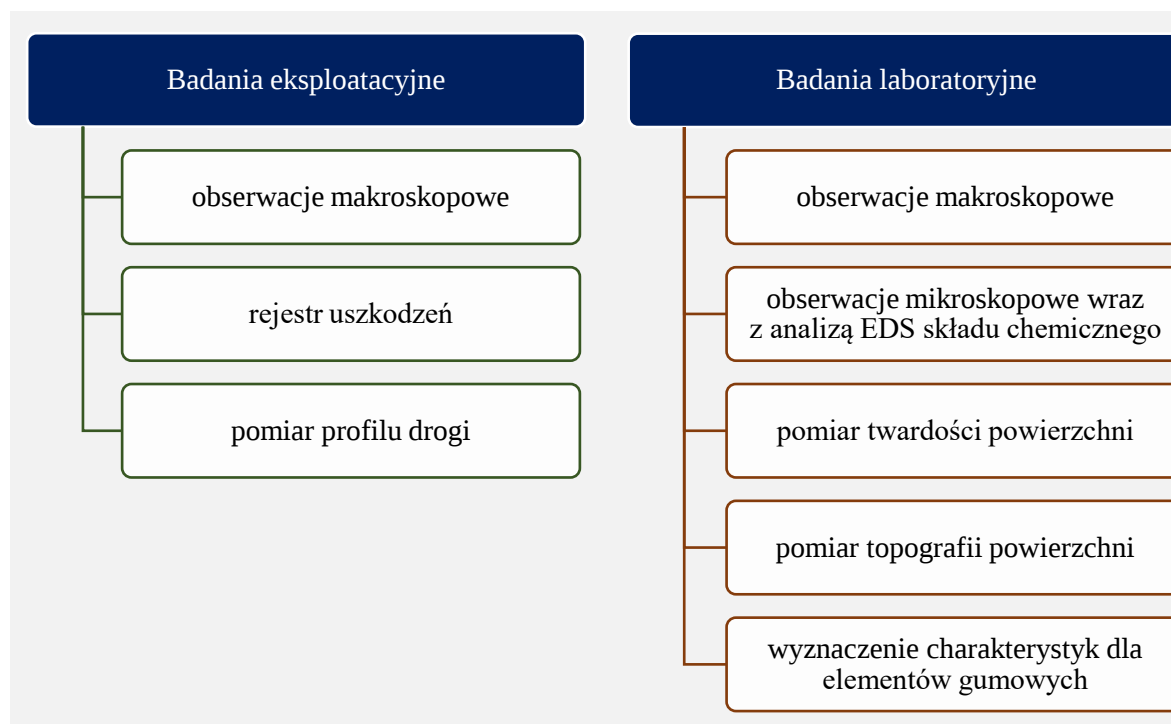
W rozdziale 9. przedstawiono wnioski i nakreślono kierunki dalszych badań zmierzających do poprawy właściwości użytkowych elementów układu zawieszenia.

6. Metodyka badań

Z eksploatacją pojazdów dostawczych wiąże się wiele złożonych problemów dotyczących stanu technicznego układu zawieszenia, których do dnia dzisiejszego nie udało się rozwiązać. Najważniejszym z nich są uszkodzenia i zużycie elementów układu zawieszenia wynikające z ich warunków pracy. Poznanie mechanizmów zużycia pozwoli w przyszłości projektować układy zawieszenia bardziej niezawodne.

Obserwacja procesów zużycia, szczególnie w strefie węzła tribologicznego, podczas eksploatacji jest trudna z uwagi na brak dostępu do tej strefy. Z tego też względu pełną możliwość poznania charakteru i zakresu zużycia, a także uszkodzeń układu zawieszenia uzyskać można poprzez prowadzenie badań laboratoryjnych.

Program badań dla zdefiniowanego w niniejszej pracy celu został podzielony na 2 części (rysunek 6.1). Pierwsza część dotyczyła badań eksploatacyjnych pojazdu i rejestracji uszkodzeń układu zawieszenia, a druga polegała na prowadzeniu badań laboratoryjnych, umożliwiających określenie stanu technicznego powierzchni i warstwy wierzchniej elementów układu zawieszenia, a także stanu powierzchni między łączonymi elementami. W ramach tych badań uzyskano m.in. informacje o charakterze zużycia występujących w strefie węzła tribologicznego: belka zawieszenia – drążek stabilizatora. Wyznaczono też charakterystyki elementów gumowych wahacza.



Rysunek 6.1. Badania pozwalające zrealizować cel pracy.

Źródło: opracowanie własne.

Badania eksploatacyjne polegały na obserwacji i rejestracji uszkodzeń elementów zawieszenia, wykrytych podczas przeglądów codziennych zgłaszanych przez kierowców i na stacjach diagnostycznych. Na podstawie uzyskanych danych dokonano szacowania wskaźników niezawodnościowych według rozkładu Weibulla.

W ramach badań eksploatacyjnych przeprowadzono również pomiar równości nawierzchni wybranego odcinka drogi, po którym najczęściej poruszały się monitorowane pojazdy.

Badania laboratoryjne prowadzono po wcześniejszym przygotowaniu próbek do badań. Pozwoliły one poznać stan techniczny elementów układu zawieszenia po przebytej liczbie kilometrów, określonej scenariuszem badań. Szczegółowy plan badań i obserwacji zamieszczono w dalszej części rozdziału. Przygotowanie materiału badawczego, przeznaczonego do badań laboratoryjnych, polegało na wykonaniu następujących kroków:

- demontaż elementów układu zawieszenia z pojazdu;
- wstępna ocena stanu technicznego zdemontowanych części;
- zabezpieczenie miejsc uszkodzonych lub zużytych;
- dekompozycja elementów (w razie konieczności);
- czyszczenie poszczególnych elementów z zastosowaniem technologii piaskowania (po wcześniejszym zabezpieczeniu miejsc zajętych przez uszkodzenia lub zużycia);
- wycięcie próbek i poddanie ich obserwacjom laboratoryjnym.

Badania stanowiskowe tulei gumowych i metalowo-gumowych posłużyły do określenia ich charakterystyki promieniowej i osiowej. Pozwoliły one poznać różnice w charakterystykach elementów gumowych i metalowo-gumowych nowych fabrycznie oraz po liczbie kilometrów określonej w scenariuszu badań.

Obserwacje makroskopowe umożliwiły określenie wielkości i zasięgów śladów zużycia oraz ich umiejscowienia, a także udokumentowanie uszkodzeń spowodowanych m.in. działaniem zanieczyszczeń znajdujących się na jezdni czy brakiem umiejętności kierowania pojazdem.

Obserwacje mikroskopowe pozwoliły na ocenę produktów zużycia znajdujących się w węźle tribologicznym i określenie ich składu chemicznego oraz pochodzenia.

Badanie topografii powierzchni elementów stanowiło podstawę do porównania jej stanu w strefie zużycia ze strefą niezajętą przez zużycie.

Celem pomiaru mikrotwardości powierzchni belki była ocena wpływu zaobserwowanych zużyć na zmianę twardości powierzchni i poprawności wykonania oraz trwałości złączy spawanych.

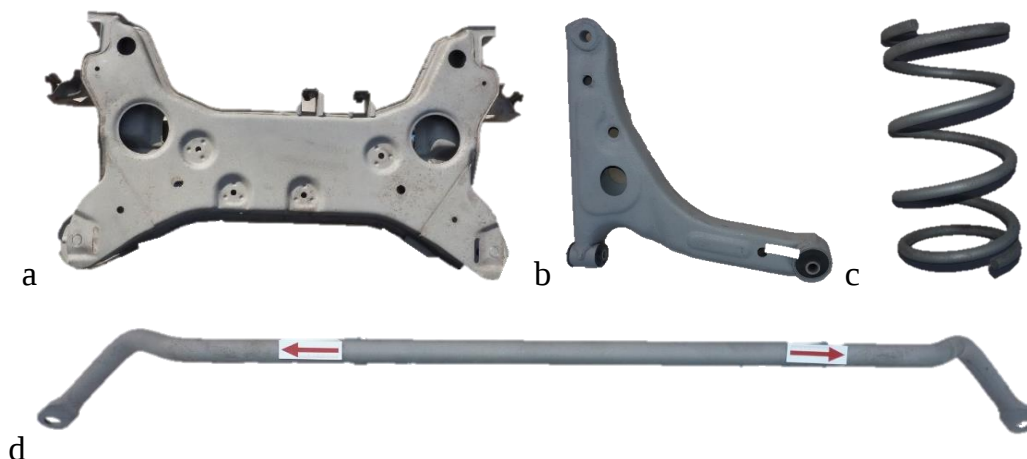
6.1. Przedmiot badań

Przedmiotem badań niniejszej pracy były elementy układu zawieszenia samochodu dostawczego, którego całkowita masa dopuszczalna wynosi 3 500 kg.

Badaniom podlegały elementy układu zawieszenia 5 nowych fabrycznie samochodów dostawczych, które przebyły taką samą liczbę kilometrów w warunkach porównywalnych. Głównym celem była ocena wpływu warunków pracy na stan techniczny elementów układu zawieszenia pojazdu po przebyciu założonej liczby kilometrów, jednak w przypadku wcześniejszego zauważenia uszkodzeń elementów dyskwalifikujących pojazd z dalszej eksploatacji, elementy demontowano i poddawano badaniom laboratoryjnym w celu oceny zużycia.

Ze wstępnej oceny stanu technicznego wynika, że należy przeprowadzić szczegółową analizę laboratoryjną dla następujących elementów: belka zawieszenia (rysunek 6.2.a), wahacz, a głównie elementy gumowe i metalowo-gumowe (rysunek 6.2.b), sprężyna kolumny McPhersona (rysunek 6.2.c) i drążek stabilizatora (rysunek 6.2.d).

W przypadku drążków stabilizatora wykazano jedynie zmiany w strukturze powierzchni w miejscu łączenia z belką, dlatego uznano za stosowne przeprowadzenie tylko oceny stanu technicznego na podstawie obserwacji makrograficznych i pomiaru parametrów chropowatości powierzchni w miejscu zużycia, w miejscu przejścia ze strefy zużycia do strefy bez zużycia i w strefie bez zużycia. W pracy nie prowadzono szczegółowych badań amortyzatorów, ponieważ – jak wynika z przeglądu literatury – zostały one dość szczegółowo zbadane pod różnym kątem.



Rysunek 6.2. Elementy zawieszenia przedniego poddane badaniom laboratoryjnym: a) belka zawieszenia, b) wahacz z tulejami metalowo-gumowymi, c) sprężyna kolumny McPhersona, d) drążek stabilizatora.

Źródło: opracowanie własne.

Belka zawieszenia wykonana została w postaci stalowych wytłoczek łączonych metodą spawania, których skład chemiczny podano w tabeli 6.1. Wytłoczki te zostały zespolone ze sobą metodą zgrzewania. Jej kształt i proces technologiczny wytwarzania gwarantują odpowiednio wytrzymały profil przestrzenny przykręcony do nadwozia, zespalaający ze sobą elementy zawieszenia.

Tabela 6.1

Skład chemiczny stali belki zawieszenia [% wag.]

C	Fe	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
0,074	98,65	0,095	0,744	<0,005	<0,005	0,014	<0,001	0,024	<0,005	0,042

Źródło: opracowanie własne.

Wahacze są elementami sztywnymi o stałej konstrukcji. Wykonane zostały w postaci stalowych wytłoczek, których skład chemiczny podano w tabeli 6.2. Wytłoczki zespolono metodą zgrzewania. W końcowym kształcie są zamkniętym profilem przestrzennym gwarantującym odpowiednią wytrzymałość.

Tabela 6.2

Skład chemiczny stali dla analizowanej belki zawieszenia [% wag.]

C	Fe	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	Al
0,076	98,58	0,090	0,700	<0,005	<0,005	0,018	<0,001	0,031	<0,005	0,039

Źródło: opracowanie własne.

Na końcu ramion wahaczy wyprofilowano uszy, w które wciśnięte zostały tuleje metalowo-gumowe, zwane silentblockami. Są to stalowe tuleje zwulkanizowane z elementami gumowymi, będące łącznikiem elastycznym miejsca mocowania wahacza. Zadaniem tulei metalowo-gumowych jest tłumienie drgań wywołanych głównie nierównościami czy pofalowaniami na nawierzchniach dróg, minimalizując stopień ich przenoszenia na nadwozie pojazdu.

W takim modelu niezależnego zawieszenia elementami prowadzącymi koła są dolne wahacze w kształcie litery „L” o trzypunktowym mocowaniu. Z jednej strony są one połączone ze zwrotnicą za pomocą przegubu kulowego, a z drugiej mocowane są do przedniej belki poprzecznej. Belka ta jest przykręcana do nadwozia poprzez tuleje metalowo-gumowe.

Dodatkowym elementem poddanym szczegółowej analizie jest sprężyna kolumny McPhersona. Sprężyna wykonana została ze stali sprężynowej, której skład chemiczny zestawiono w tabeli 6.3. Wybrano sprężyny do analizy, gdyż zauważono pęknięcia eksploatacyjne, które w konsekwencji prowadziły do przełomów. Celem badania była ocena występującego pęknięcia zmęczeniowego i określenie jego przyczyny.

Tabela 6.3

Skład chemiczny stali dla sprężyny kolumny McPhersona [% wag.]

C	Fe	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu	V
0,49	97,26	0,25	0,700	<0,003	<0,003	1,0	–	0,31	<0,025	0,18

Źródło: opracowanie własne.

6.2. Warunki pracy

Monitorowane pojazdy pracowały w firmie kurierskiej, gdzie przewoziły przesyłki o zróżnicowanym ciężarze.

Tabela 6.4

Przebieg pojazdu odniesiony do obciążenia

Wartość procentowa obciążenia pojazdu ładunkiem	Masa pojazdu z ładunkiem	liczba przebytych kilometrów
[%]	[kg]	[tys. km]
0	2100	16
25	2450	20
50	2800	29
75	3150	23
100	3500	12

Źródło: opracowanie własne.

Każdy z pojazdów przejechał porównywalną trasę o całkowitym przebiegu ok. 100 tys. km, ze zbliżonym obciążeniem (tabela 6.4). Przywołany przebieg pojazdy osiągnęły po 2 latach pracy. Pojazdy poruszały się po różnych trasach i drogach, obsługując tereny miejskie oraz wiejskie. Prowadzono szczegółową bazę danych, zawierającą informacje o rodzaju i stanie dróg, po których poruszały się, a także warunkami środowiskowymi. W tabeli 6.5 przedstawiono wyciąg z przedmiotowej bazy danych. Należy podkreślić, że każdy z pojazdów przebył porównywalny odcinek drogi dla danych warunków. Założono, że kierujący pojazdami są kierowcami zawodowymi, posiadającymi odpowiednie umiejętności kierowania pojazdami. Pojazdy jeździły przez cały rok, więc warunki temperaturowe wahały się w granicach od -15 do 30°C.

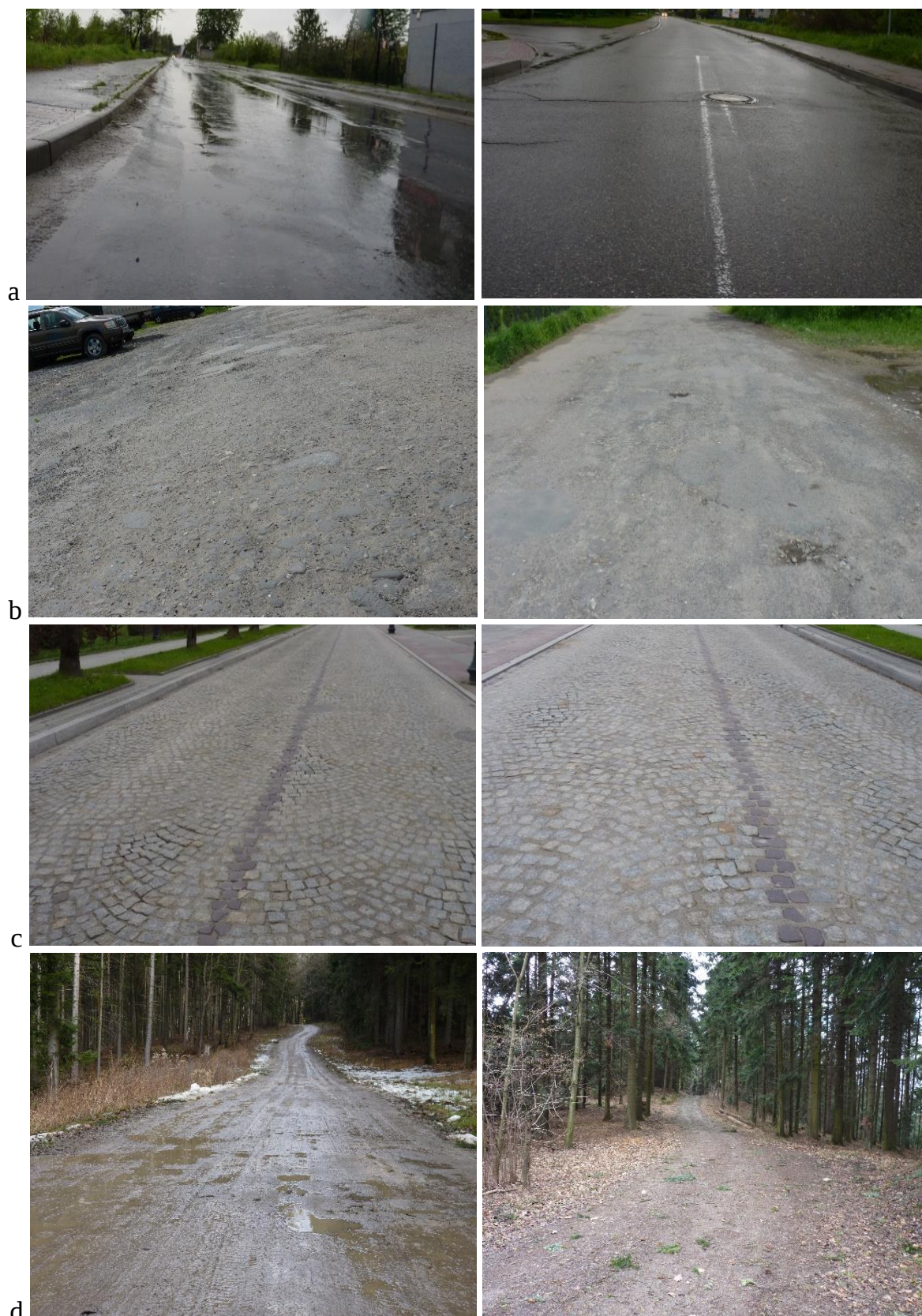
Tabela 6.5

Historia jazdy pojazdów dla różnych środowisk ruchu

Rodzaj nawierzchni	Stan nawierzchni	Warunki środowiskowe	Łączna liczba kilometrów
Asfaltowa	Bez kolein	Droga sucha z zanieczyszczeniami w postaci pyłu i kurzu	21 000
		Opady atmosferyczne	20 000
		Błoto pośniegowe zawierające środki uszorstniające drogę oraz sól drogową	9 000
	Z koleinami	Droga sucha z zanieczyszczeniami w postaci pyłu i kurzu	9 000
		Opady atmosferyczne	5 100
		Błoto pośniegowe zawierające środki uszorstniające drogę oraz sól drogową	4 000
Utwardzona	Bez kolein	Droga sucha z zanieczyszczeniami w postaci pyłu i kurzu	7 000
		Opady atmosferyczne	6 000
		Błoto pośniegowe zawierające środki uszorstniające drogę oraz sól drogową	3 100
	Z koleinami	Droga sucha z zanieczyszczeniami w postaci pyłu i kurzu	1 900
		Opady atmosferyczne	1 800
		Błoto pośniegowe zawierające środki uszorstniające drogę oraz sól drogową	900
Brukowana	Bez uszkodzeń kostki	Błoto pośniegowe zawierające środki uszorstniające drogę oraz sól drogową	4 000
		Opady atmosferyczne	3 000
	Z uszkodzeniami kostki	Opady atmosferyczne	500
		Błoto pośniegowe zawierające środki uszorstniające drogę oraz sól drogową	400
Żwirowa	Bez kolein	Droga sucha	1 300
	Z koleinami wypełnionymi wodą	Opady atmosferyczne	900
Piaszczysta	—	Droga sucha	600
		Opady atmosferyczne	500

Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 6.3 przedstawiono przykładowe nawierzchnie dróg, po których poruszały się monitorowane pojazdy. Większość dróg miało niski standard, co mogło znacząco wpłynąć na stan techniczny elementów układu zawieszenia.



Rysunek 6.3. Rodzaj nawierzchni dróg: a) asfaltowa, b) utwardzona, c) brukowana, d) żwirowa.
Źródło: opracowanie własne.

6.3. Urządzenia laboratoryjne i pomiarowe oraz metodyka badań

W podrozdziale tym zaprezentowano stanowiska i urządzenia pomiarowe wykorzystane do badań i obserwacji zużyć oraz uszkodzeń elementów zawieszenia. Dodatkowo przedstawiono metodykę pomiaru równości nawierzchni wybranych odcinków drogi, po której poruszały się badane pojazdy.

6.3.1. Pomiar nawierzchni drogi

Celem wykonania diagnostyki stanu nawierzchni, czyli pomiarów cech techniczno-eksploatacyjnych nawierzchni, było pozyskanie danych umożliwiających dokonanie oceny stanu nawierzchni. Ocena ta pozwoliła określić stan nawierzchni, po których poruszały się analizowane pojazdy. Badania te są bardzo istotne ze względu na fakt, że jakość nawierzchni drogi ma znaczący wpływ na stan techniczny układów zawieszenia samochodów.

Zgodnie z Zarządzeniem nr 21 z dnia 17 czerwca 2019 r. Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad, podobne pomiary wykonuje się każdego roku, w celu monitorowania stanu dróg krajowych oraz archiwizuje się w Systemie Oceny Stanu Nawierzchni (SOSN). Pozwalają one ocenić parametry techniczno-eksploatacyjne, takie jak: stan spękań, równość podłużna, koleiny, stan powierzchni i właściwości przeciwpoślizgowe.

Badania wykonano zgodnie z normą BN-68/8931-04, przy użyciu planografu PD01 firmy Omega. Na rysunku 6.4 zaprezentowano pomiar równości nawierzchni na przykładowym odcinku drogi.



Rysunek 6.4. Pomiar równości nawierzchni wybranego odcinka drogi.

Źródło: opracowanie własne.

Wózek planografu wyposażony jest w: 14 kół jezdnych o średnicy 200 mm, koło pomiarowe o średnicy 150/160 mm, 2 koła pomocnicze oraz koło asekurujące i manewrowe. Podstawowym elementem konstrukcyjnym urządzenia jest belka nośna o długości 4460 mm, dzielona przegubowo w stosunku 2200:2260 mm, do której

mocowane są koła jezdne. W połowie długości belki znajduje się podatne koło pomiarowe, sprzężone z czujnikiem przemieszczeń, precyzyjnie mierzącym odkształcenie drogi i czujnikiem przebytej drogi. Planograf podczas pomiaru jest ciągnięty przez samochód. Urządzenie wykonuje pomiary nierówności z dokładnością 0,1 mm, a próbkowanie nierówności odbywa się z częstotliwością 0,1 ms (10 tys. próbek na sekundę).

W ramach badań wykonano pomiar równości nawierzchni drogi dla wybranych odcinków, a w pracy zamieszczono wyniki jednego pomiaru. Po badanym na potrzeby niniejszej pracy odcinku drogi każdy z pojazdów przejechał ok. 15 tys. km.

Mierzono odcinek drogi klasy L. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury z dnia 1 sierpnia 2019 r. zmieniającym rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie (Dz.U. z 2019 r., poz. 1643), do oceny równości podłużnej takiej drogi należy stosować metodę pomiaru ciągłego równoważną użyciu łąty i klina, np. z wykorzystaniem planografu umożliwiającego wyznaczanie odchyłeń równości podłużnej, jako największej odległości (prześwitu) pomiędzy teoretyczną linią łączącą spody kółek jezdnych urządzenia a mierzoną powierzchnią warstwy [mm].

W przypadku drogi należącej do klasy L wartość dopuszczalna odchyłeń równości podłużnej przy odbiorze warstwy planografem (łątą i klinem) wynosi 9 mm. Na potrzeby pracy naukowej ustawiono planograf do rejestracji maksymalnych odchyłeń większych niż 4 mm, co powoduje dyskomfort dla użytkowników drogi, ponieważ pojazd z oprzyrządowaniem poruszał się z prędkością 5 km/h.

Przed pomiarem określono przybliżoną długość badanego odcinka 1 równego 500 mb, a odcinka 2 na 350 mb. Takie też wartości zostały wpisane do programu urządzenia przed rozpoczęciem badania. Dokładne pomiary planografem wykazały jednak, że odcinek 1 wynosi 451 mb, a odcinek 2 – 351 mb. Lokalizacja punktów nierówności nie jest istotna z punktu widzenia potrzeb tej pracy naukowej; skupiono się w głównej mierze na interesującej wielkości oraz ilości nierówności.

6.3.2. Obserwacje makrograficzne

Obserwując powierzchnie elementów układu zawieszenia, zidentyfikowano miejsca, które wykazywały uszkodzenia eksploatacyjne w zakresie wymagającym, zdaniem autora, dalszej analizy. W ocenie tej uwzględniano możliwość ich wpływu na obniżenie sprawności technicznej układu zawieszenia, prowadzącej do zmniejszenia bezpieczeństwa jazdy.

Ocena makrograficzna uszkodzeń eksploatacyjnych została wykonana z użyciem aparatu fotograficznego NIKON COOLPIX P900 o maksymalnym powiększeniu 83x (rysunek 6.5).



Rysunek 6.5. Aparat fotograficzny NIKON COOLPIX P900.
Źródło: opracowanie własne.

6.3.3. Badania mikrograficzne z analizą EDS

Zaobserwowane miejsca uszkodzeń poddano obserwacji mikroskopowej z wykorzystaniem skaningowego mikroskopu elektronowego JEOL JSM-5510LV (rysunek 6.6), będącego na wyposażeniu Katedry Inżynierii Materiałowej Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej.

Badania metodą skaningowej mikroskopii elektronowej prowadzono w trybie elektronów wstecznie rozproszonych – BEC, BES, a także elektronów wtórnych – SEI, przy napięciu przyspieszającym wiązkę elektronową równym 20 kV.

Mikroanaliza jakościowa i ilościowa składu chemicznego na uszkodzonych powierzchniach wykonana została przy użyciu mikroskopu elektronowego wyposażonego w spektrometr typu EDS INCA x-act Energy 350.



Rysunek 6.6. Stanowisko badawcze wyposażone w skaningowy mikroskop elektronowy JEOL JSM-5510LV.

Źródło: opracowanie własne.

Obserwacjom mikroskopowym i analizie składu chemicznego poddano fragmenty belki zajęte przez zużycie oraz losowo wybrane złącze spawane belki.

6.3.4. Pomiar topografii powierzchni

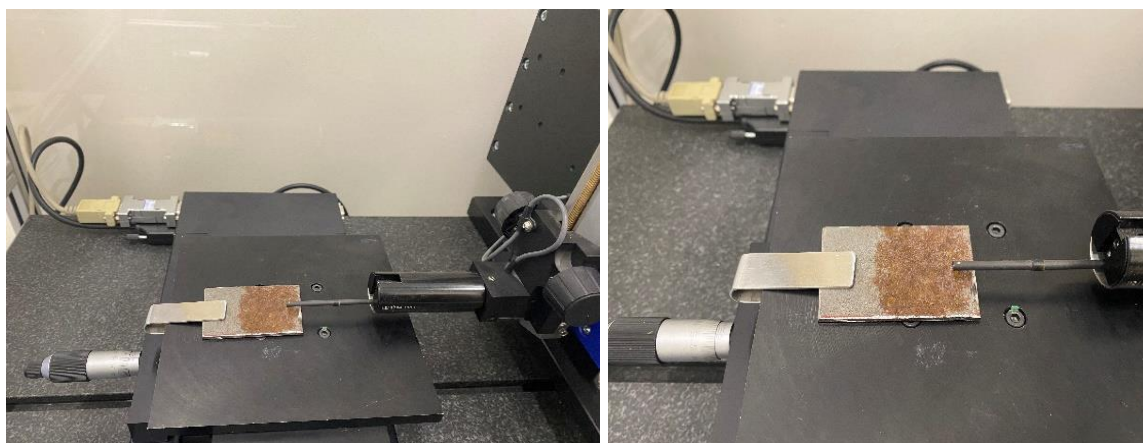
W pracy podjęto się pomiaru chropowatości powierzchni elementów układu zawieszenia zajętych przez zużycie, gdyż struktura geometryczna powierzchni (SGP) jest jednym z ważniejszych czynników decydujących o jakości danej powierzchni i mechanizmach zużycia elementów trących. Jakość powierzchni materiału ma duży wpływ na własności eksploatacyjne elementów maszyn, które wyrażają się m.in. przez: naprężenia stykowe, warunki tarcia na powierzchniach stykowych, wytrzymałość zmęczeniową, szczelność połączeń, odporność na korozję, powierzchniowe promieniowanie cieplne czy własności magnetyczne. Nieodpowiednie przygotowanie powierzchni może prowadzić w czasie eksploatacji do takich uszkodzeń, jak: pęknięcia zmęczeniowe, pęknięcia wywołane naprężeniami spowodowanymi korozją, zużycie ścierno-korozyjne, zużycie ściernie, korozja czy erozja, dlatego konieczne jest porównanie profilu powierzchni belki w miejscu zaobserwowanego zużycia z profilem powierzchni niezajętej przez zużycie. Badania obejmowały swym zakresem pomiar chropowatości powierzchni belki i drążka stabilizatora w miejscu ich łączenia.

Do badań wykorzystano urządzenie Form Talysurf Intra firmy Taylor Hobson. Na rysunku 6.7 zaprezentowano przykładowy pomiar chropowatości powierzchni próbki wyciętej z belki podwozia. Uzyskane dane posłużyły do określenia parametrów chropowatości i ich graficznego przedstawienia z wykorzystaniem oprogramowania TalyMap Platinum 5.1. Badania topografii powierzchni zostały wykonane w warunkach określonych w tabeli 6.6.

Tabela 6.6

Warunki pomiaru topografii powierzchni

Parametr	Wartość
Długość odcinka elementarnego	0,8 [mm]
Liczba odcinków	5
Krok próbkowania Δx	1 [μm]
Długość odwzorowania	4 [mm]
Liczba rejestrowanych punktów	1000
Prędkość przemieszczenia końcówki pomiarowej	1 [mm/s]
Promień zaokrąglenia końcówki pomiarowej	2 [μm]
Odstęp pomiarów chropowatości	0,1 [mm]
Liczba przekrojów	100



Rysunek 6.7. Przykładowy pomiar chropowatości powierzchni z wykorzystaniem urządzenia Form Talysurf Intra.

Źródło: opracowanie własne.

Analizę ukształtowania badanych powierzchni belki oraz drążka stabilizatora przeprowadzono w oparciu o analizę jakościową i ilościową. Pierwsza polega na analizie obrazów powierzchni badanych elementów. W ramach analizy jakościowej w pracy zaprezentowano mapy warstwiczne i konturowe, graficzne przedstawienie krzywej Abbotta-Firestone'a, wykres parametrów S_k i wykres stopnia izotropowości powierzchni w postaci róży morfologicznej. W celu dokonania prawidłowej oceny powierzchni analizę jakościową uzupełniono analizą ilościową, która wymaga określenia wielkości opisujących ukształtowanie powierzchni badanych elementów. W niniejszej pracy analizowano parametry dwuwymiarowe 2D i trójwymiarowe 3D powierzchni. Wykaz parametrów 2D oraz 3D zestawiono w tabelach 6.7 i 6.8.

Tabela 6.7

Zestawienie parametrów chropowatości 2D powierzchni

Symbol	Nazwa parametru
Ra	Średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości
Rz	Wysokość chropowatości według 10 punktów
Rp	Maksymalna wysokość wzniesienia profilu chropowatości
Rv	Maksymalna głębokość wgłębienia profilu chropowatości
Rc	Średnia wysokość chropowatości
Rt	Całkowita wysokość profilu (między szczytem najwyższego wierzchołka a najniższym zagłębieniem)
Rq	Średnie kwadratowe odchylenie profilu chropowatości

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 6.8

Zestawienie parametrów chropowatości 3D powierzchni

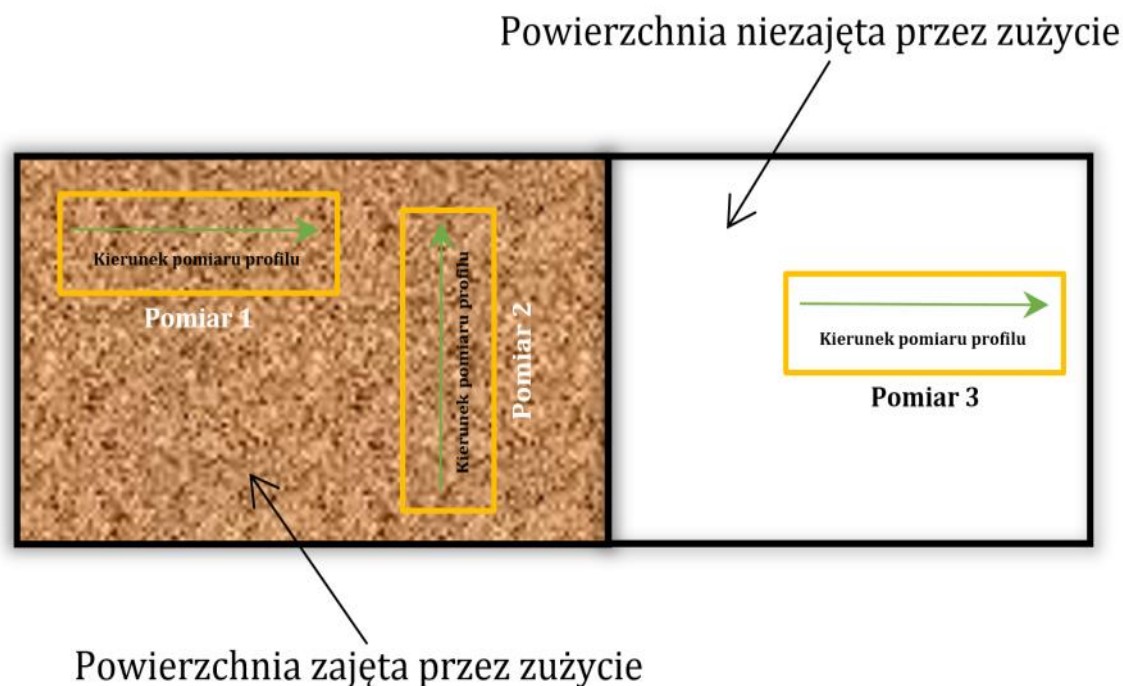
Grupa	Symbol	Nazwa
Parametry amplitudowe	Sa	Średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni
	Sq	Średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni
	Sp	Maksymalna wysokość wzniesienia
	Sv	Maksymalna głębokość wgłębienia
	Ssk	Współczynnik asymetrii (skośność) powierzchni
	Sku	Współczynnik skupienia (kurioza) powierzchni
Parametry przestrzenne	Sz	Maksymalna wysokość powierzchni
	Str	Wskaźnik tekstury powierzchni
	Std	Odchylenie głównego kierunku tekstury powierzchni od osi 90° prostopadłej do kierunku zbierania danych
Parametry hybrydowe	Sal	Długość odcinka najszybszego zanikania funkcji autokorelacji
	Sdq	Średnie kwadratowe nachylenie powierzchni
	Sds	Liczba wierzchołków na jednostkę powierzchni
	Ssc	Średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołków nierówności powierzchni
	Sdr	Rozwinięcie powierzchni
	Sfd	Wymiar fraktalny
Parametry funkcyjne	Sbi	Wskaźnik powierzchni nośnej
	Sci	Wskaźnik zatrzymania cieczy przez rdzeń
	Svi	Wskaźnik utrzymania środka smarnego przez wgłębienia położone poniżej rdzenia
Parametry Sk	Sk	Głębokość chropowatości rdzenia
	Spk	Zredukowana wysokość wierzchołka

Źródło: opracowanie własne.

Parametry chropowatości mierzono na małym obszarze, zatem należy mieć na uwadze, że mogą one przyjmować różne wartości. Przyczyny takiej sytuacji związane są z jednej strony z technologią kształtowania i charakterem ukształtowania powierzchni warstwy wierzchniej, a z drugiej strony z metodą pomiaru i przetwarzaniem danych pomiarowych. Nie bez znaczenia pozostają również kwestie związane z eksploatacją elementu (Wieczorowski, 2009).

Mając na uwadze powyższe stwierdzenia, wykonano każdy pomiar trzykrotnie, a uśrednione wyniki zaprezentowano w niniejszej pracy. Strategia badań zakładała też wykonanie pomiarów w 3 miejscach każdego obszaru próbki oraz 2 pomiary w strefie przejścia z obszaru zajętego przez zużycie do obszaru nieobjętego zużyciem.

Na rysunku 6.8 zaprezentowano sposób pomiaru parametrów chropowatości powierzchni belki zawieszenia przedniego. Próbka przeznaczona do badań została wycięta z belki w taki sposób, aby była możliwość wykonania pomiaru w obszarze zajęтым przez zużycie i niezajętym przez zużycie. W tabeli 6.9 zestawiono informacje dotyczące badanych powierzchni belki zawieszenia przedniego.



Rysunek 6.8. Strategia pomiaru chropowatości powierzchni belki.
Źródło: opracowanie własne.

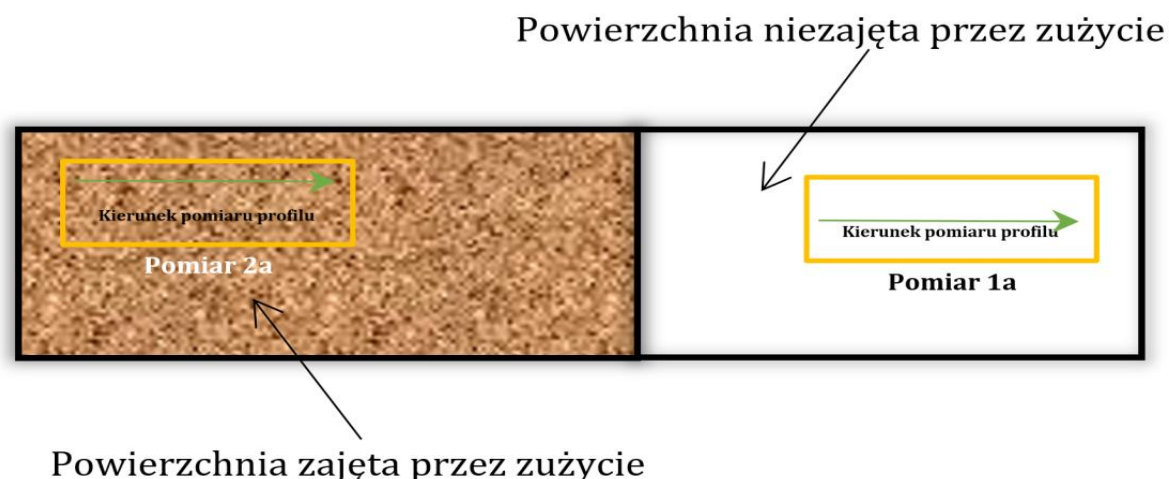
Tabela 6.9

Informacje dotyczące badanej powierzchni belki zawieszenia

Numer pomiaru	Powierzchnia	Wielkość mierzonego obszaru [mm]
Pomiar 1	Zajęta przez zużycie	1x1
Pomiar 2	Zajęta przez zużycie	1x1
Pomiar 3	Niezajęta przez zużycie	1x1

Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 6.9 zaprezentowano sposób pomiaru parametrów chropowatości powierzchni drążka stabilizatora. Podobnie jak w poprzednim przypadku, próbka przeznaczona do badań została wycięta z drążka stabilizatora w taki sposób, aby była możliwość wykonania pomiaru w obszarze zajęтым przez zużycie i niezajętym przez zużycie. W tabeli 6.10 zestawiono informacje dotyczące badanych powierzchni drążka stabilizatora.



Rysunek. 6.9. Strategia pomiaru chropowatości powierzchni drążka stabilizatora.
Źródło: opracowanie własne.

Drążek stabilizatora posiada powierzchnię walcową, dlatego pierwszym etapem analizy chropowatości powierzchni musi być odfiltrowanie składowej kształtu, którą wykonuje się przez rozwinięcie zmierzonej powierzchni z wykorzystaniem równań matematycznych n -tego rzędu, sfery lub cylindra. Zadanie to umożliwia opcja programu „Usuwanie kształtu”, pozwalająca doprowadzić pomierzony kształt do powierzchni płaskiej na założonym pomierzonym obszarze (Chmielik, Czarnecki, 2015; Pawlus, 2006).

Tabela 6.10

Informacje dotyczące badanej powierzchni drążka stabilizatora

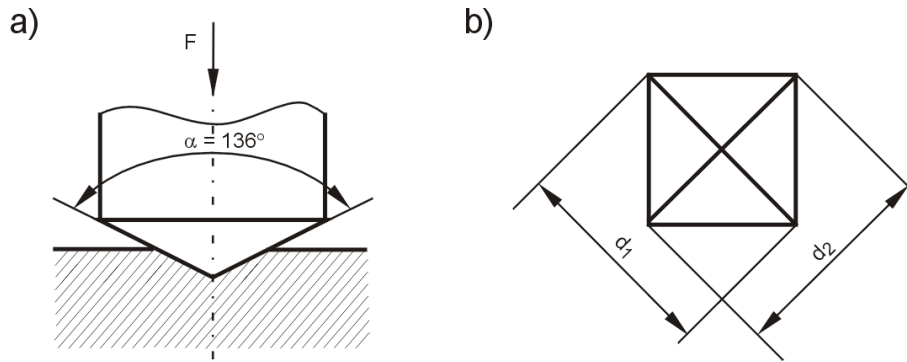
Numer pomiaru	Powierzchnia	Wielkość mierzonego obszaru [mm]
Pomiar 1a	Zajęta przez zużycie	1x1
Pomiar 2a	Niezajęta przez zużycie	1x1

Źródło: opracowanie własne.

6.3.5. Pomiar twardości powierzchni belki i złącza spawanego

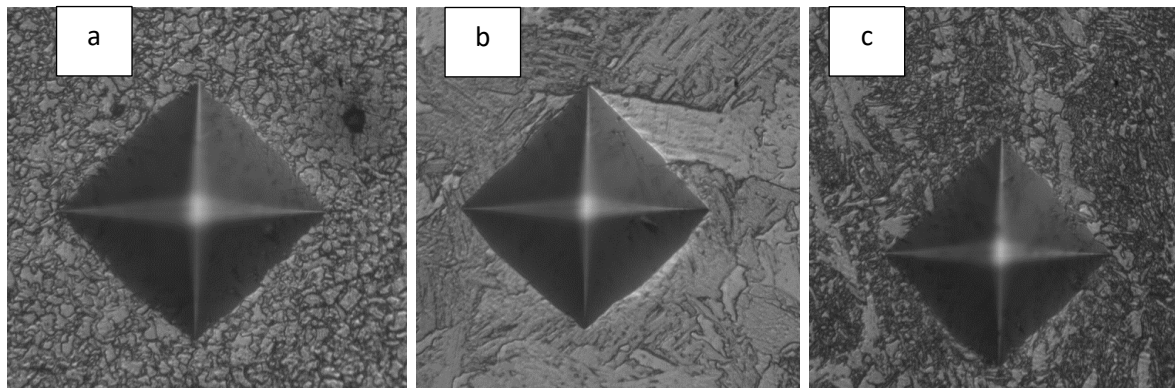
Prawidłowa wartość twardości powierzchni, konstrukcyjnie założona, gwarantuje odpowiednią wytrzymałość elementu. Dlatego też celem było porównanie wartości twardości powierzchni belki w części objętej zużyciem z belką bez widocznych śladów zużycia. Ponadto wykonano pomiar twardości jednej ze spoin łączących poszczególne człony belki.

Pomiar twardości belki i złącza spawanego przeprowadzono metodą Vickersa według normy PN-EN ISO 6507-1:2018. W przypadku belki zastosowano siłę obciążającą równą 19,6N (HV2), a złącze spawane obciążano siłą równą 5N (HV0,5). W metodzie tej wykorzystuje się diamentowy wgłębnik o kształcie ostrosłupa prawidłowego o podstawie kwadratowej oraz kącie wierzchołkowym pomiędzy przeciwległymi powierzchniami bocznymi równym 136° . Wgłębnik wciskany jest w powierzchnię badanej próbki, a następnie mierzone są długości przekątnych odcisku powstałego na powierzchni po usunięciu siły obciążającej F . Zasadę pomiaru twardości tą metodą pokazano na rysunku 6.10, a na rysunku 6.11 zaprezentowano obrazy mikroskopowe śladów odcisniętych na próbce w wybranych miejscach.



Rysunek 6.10. Zasada pomiaru twardości sposobem Vickersa.

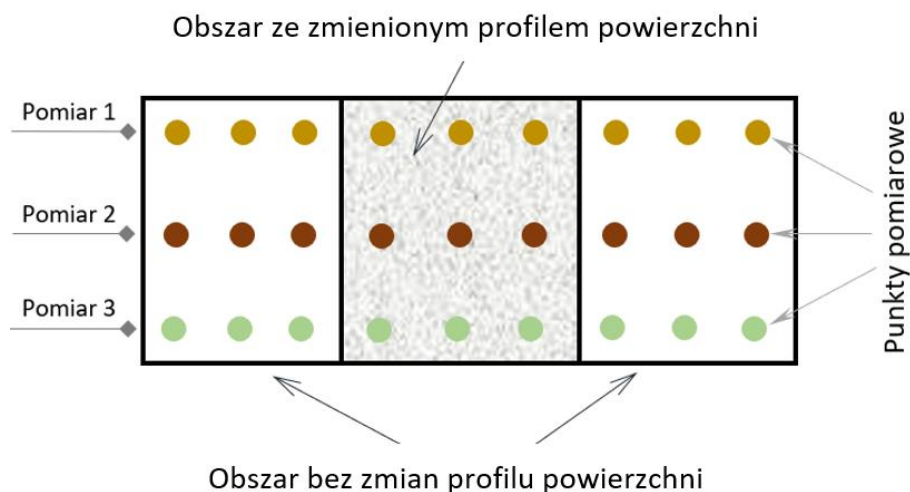
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 6.11. Odcisk znacznika dla różnych lokalizacji: a) w miejscu rodzimym, b) w miejscu wpływu ciepła, c) w miejscu złącza spawanego.

Źródło: opracowanie własne.

Pomiar twardości belki wykonano w miejscach z widocznymi zmianami na powierzchni i w obszarze bez widocznych zmian. Na rysunku 6.12 przedstawiono plan badania twardości powierzchni belki. Plan badań zakładał wykonanie 3 prób pomiarowych. W ramach każdej próby przewidziano pomiar twardości w 27 punktach pomiarowych (3 w obszarze zajęтым przez zużycie i 6 w obszarze niezajętym przez zużycie).

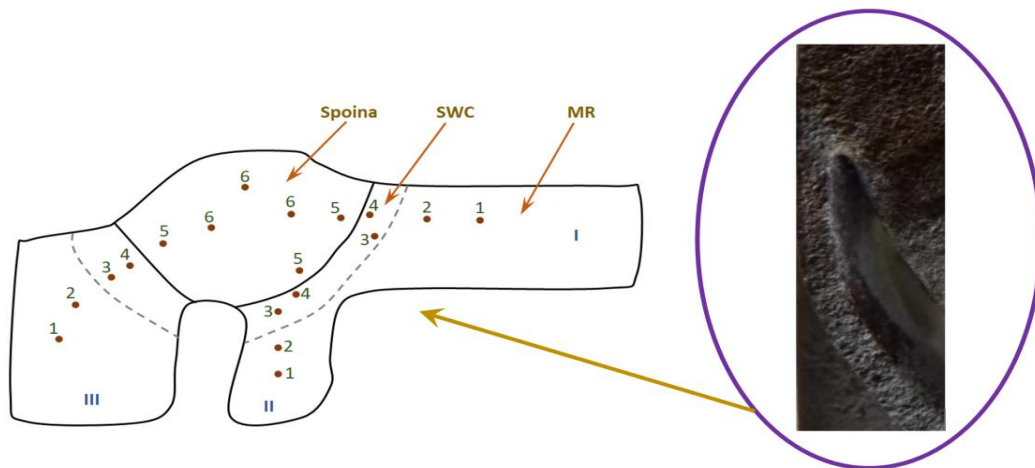


Rysunek 6.12. Scenariusz pomiarów twardości powierzchni belki.

Źródło: opracowanie własne.

Badania twardości spoiny wykonano według planu ukazanego na rysunku 6.13. Plan ten zakładał przeprowadzenie 3 testów pomiarowych. Łącznie twardość zbadano w 18 punktach. Badania wykonano w strefie materiału rodzimego (MR), strefie wpływu ciepła (SWC) i strefie spoiny.

Podczas pomiaru czas obciążenia wynosił 12 sekund. Odległość między środkiem odcisku a krawędzią próbki była 2,5 razy większa od średnicy przekątnej odcisku, zaś odległość między środkami 2 sąsiednich odcisków była 3 razy większa od średnicy przekątnej odcisku.



Rysunek 6.13. Plan badania mikrotwardości złącza spawanego.

Oznaczenia na rysunku:

I – pomiar pierwszy; II – pomiar drugi, III – pomiar trzeci,

1, 2 – obszar materiału rodzimego MR,

3 – obszar strefy wpływu ciepła SWC (od strony MR),

4 – obszar strefy wpływu ciepła SWC (od strony spoiny),

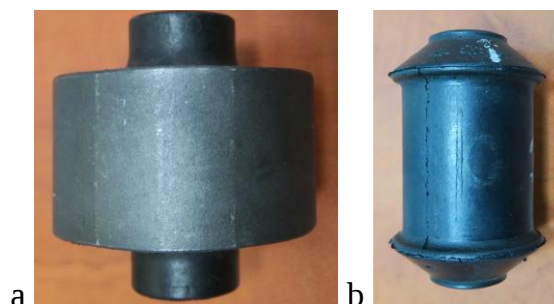
5 – obszar spoiny (od strony SWC),

6 – obszar spoiny (centrum).

Źródło: opracowanie własne.

6.3.6. Wyznaczenie charakterystyk tulei wahacza

Celem badania było wyznaczenie charakterystyki promieniowej i osiowej, a także dodatkowo pomiar siły potrzebnej do wypchania tulei z wahacza. Dla porównania wyników badania przeprowadzono na fabrycznie nowych, kompletnych wahaczach i zdemontowanych z pojazdu po przejechaniu 100 tys. km. Na rysunku 6.14 ukazano przykładowe zdjęcia tulei poddanych badaniom, a w tabeli 6.11 dane szczegółowe odnoszące się do oznaczenia rodzaju tulei.



Rysunek 6.14. Tuleje poddane badaniom: a) tuleja typu A, b) tuleja typu B.

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 6.11

Oznaczenie rodzaju tulei poddanych badaniom

Typ tulei	Stan	Oznakowanie
Typ A (przednia)	Nowa – lewa	A-N-L
	Nowa – prawa	A-N-P
	Eksploatowana – lewa	A-E-L
	Eksploatowana – prawa	A-E-L
Typ B (przednia)	Nowa – lewa	B-N-L
	Nowa – prawa	B-N-P
	Eksploatowana – lewa	B-E-L
	Eksploatowana – prawa	B-E-P

Źródło: opracowanie własne.

Badane tuleje typu A montowano do specjalnie zaprojektowanej na potrzeby testów obudowy i obciążano na maszynie wytrzymałościowej (rysunek 6.15). Parametry testu zostały zamieszczone w tabeli 6.12.



a



b

Rysunek 6.15. Widok maszyny wytrzymałościowej: a) ustawienie stanowiska przy pomiarze charakterystyki promieniowej tulejek typu A, b) ustawienie stanowiska przy pomiarze charakterystyki osiowej tulejek typu A.

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 6.12

Parametry testu tulei typu A oraz tulei typu B

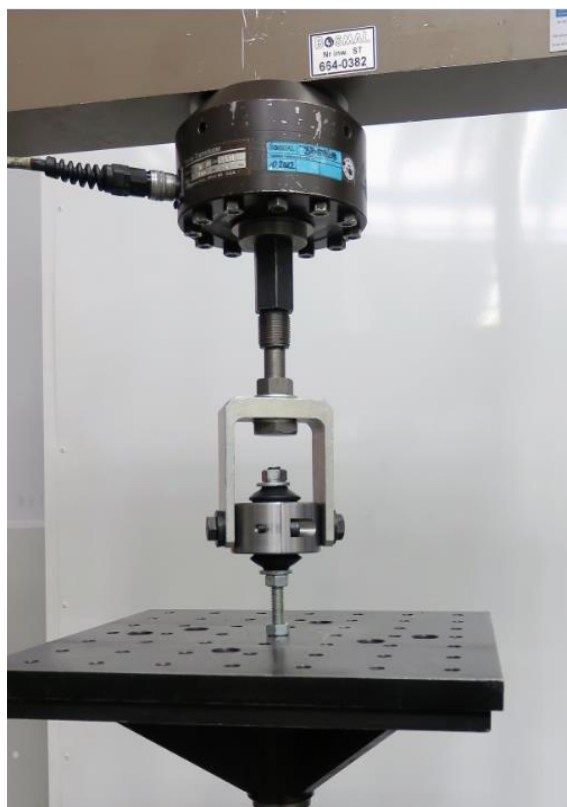
Charakterystyka	Zakres sił w cyklu pomiarowym	Prędkość obciążenia próbki
Promieniowa	± 5000 N	500 N/s
Osiowa	± 3000 N	

Źródło: opracowanie własne.

Podobnie badane tuleje typu B montowano do specjalnie zaprojektowanej na potrzeby testów obudowy i obciążano na maszynie wytrzymałościowej (rysunek 6.16). Parametry testu zostały zamieszczone w tabeli 6.12.



a



b

Rysunek 6.16. Widok maszyny wytrzymałościowej: a) ustawienie stanowiska przy pomiarze charakterystyki promieniowej tulejek typu B, b) ustawienie stanowiska przy pomiarze charakterystyki osiowej tulejek typu B.

Źródło: opracowanie własne.

W skład stanowiska badawczo-pomiarowego wchodziła wytrzymałościowa maszyna typu MTS810 (X/0590/BSD), wyposażona w:

- X/0865/BSD – sterownik FT SE;
- D/0179/BSD – czujnik siły;
- A/0063/BSD – czujnik przemieszczenia.

7. Analiza wyników badań laboratoryjnych

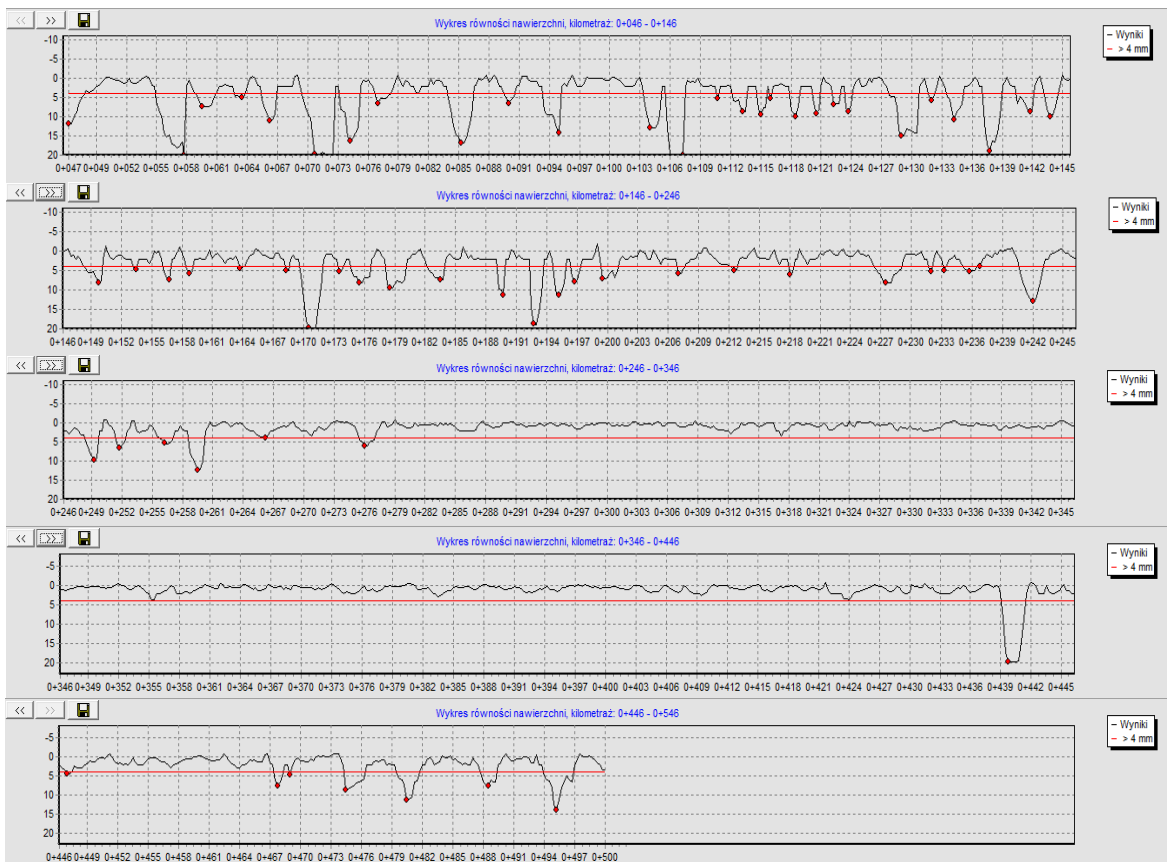
Wyniki badań i obserwacji zamieszczone w niniejszym rozdziale mają na celu wskazanie elementów, miejsc oraz złączy, w których ujawniono ślady zużycia, a także uszkodzenia odbiegające od stanu kwalifikowanego jako dopuszczalny, niezagrożający bezpieczeństwu jazdy.

W pierwszej kolejności dokonano obserwacji makrograficznych, które pozwoliły ocenić stan warstwy wierzchniej elementów zawieszenia. Miejsca zajęte przez zużycie poddano analizie mikroskopowej. Badania te miały na celu rozpoznanie rodzajów zużycia wpływających na proces degradacji elementów układu zawieszenia.

Uzupełnieniem obserwacji makro- i mikroskopowych są pomiary twardości oraz chropowatości powierzchni przedmiotowych elementów. Wyniki tych badań pozwolą ocenić zmianę właściwości elementów po określonym czasie eksploatacji. Wykreślono też charakterystykę tulei metalowo-gumowych wahacza. Jednak w pierwszej kolejności zaprezentowano wyniki pomiaru równości nawierzchni na wybranych odcinkach drogi.

7.1. Pomiar równości nawierzchni drogi

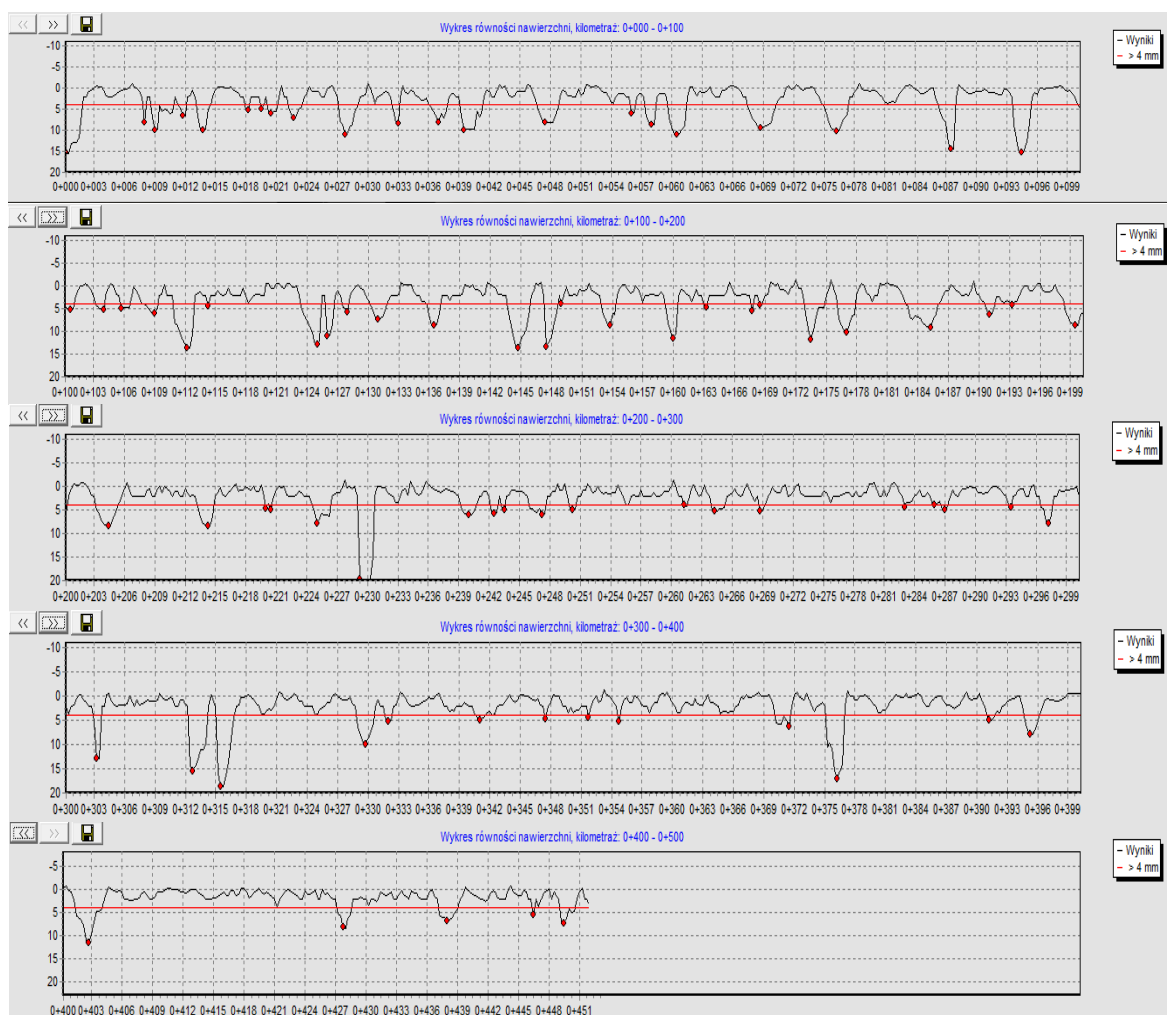
W wyniku wizualnej oceny stanu nawierzchni stwierdzono liczne uszkodzenia warstwy ścieralnej, m.in. deformacje trwałe – koleiny, spękania zmęczeniowe być może spowodowane ruchem pojazdów o dużym obciążeniu.



Rysunek 7.1. Wykres pomiaru równości nawierzchni dla odcinka 1, strona lewa.

Źródło: opracowanie własne.

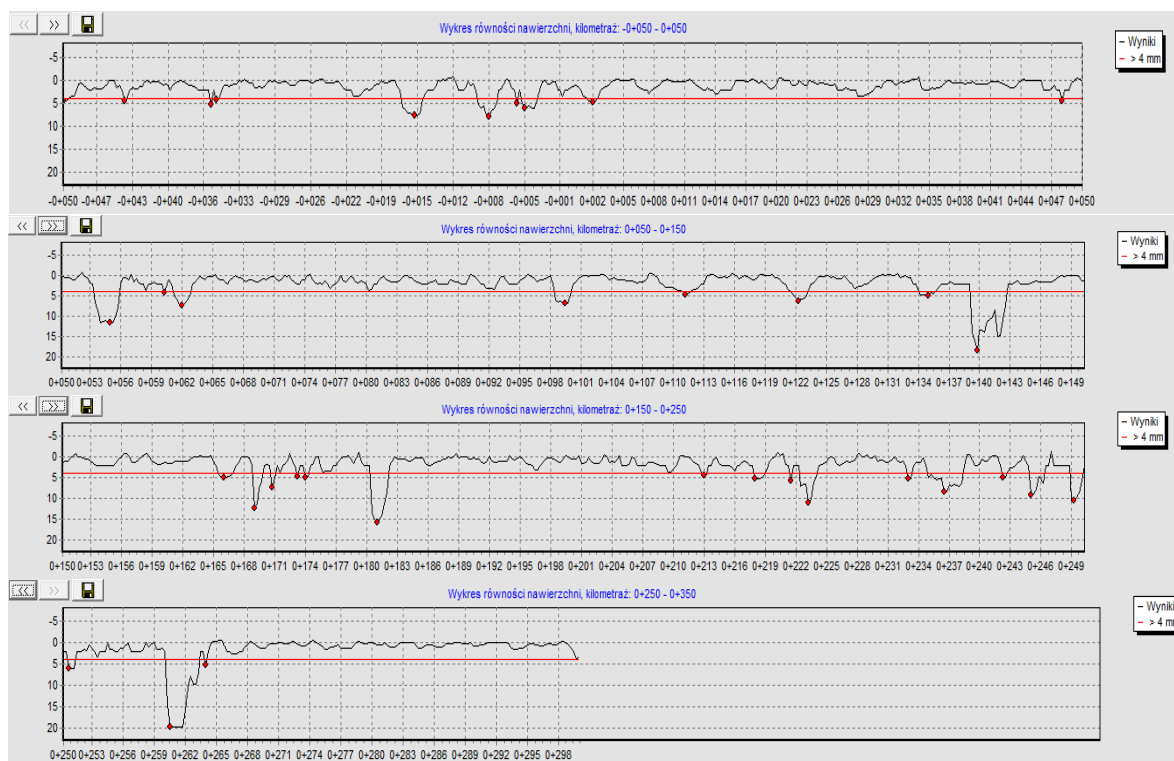
Na rysunku 7.1 przedstawiono wyniki badań równości nawierzchni drogi dla odcinka 1 po stronie lewej, a na rysunku 7.2 wyniki badań równości nawierzchni drogi dla odcinka 1 po stronie prawej.



Rysunek 7.2. Wykres pomiaru równości nawierzchni dla odcinka 1, strona prawa.

Źródło: opracowanie własne.

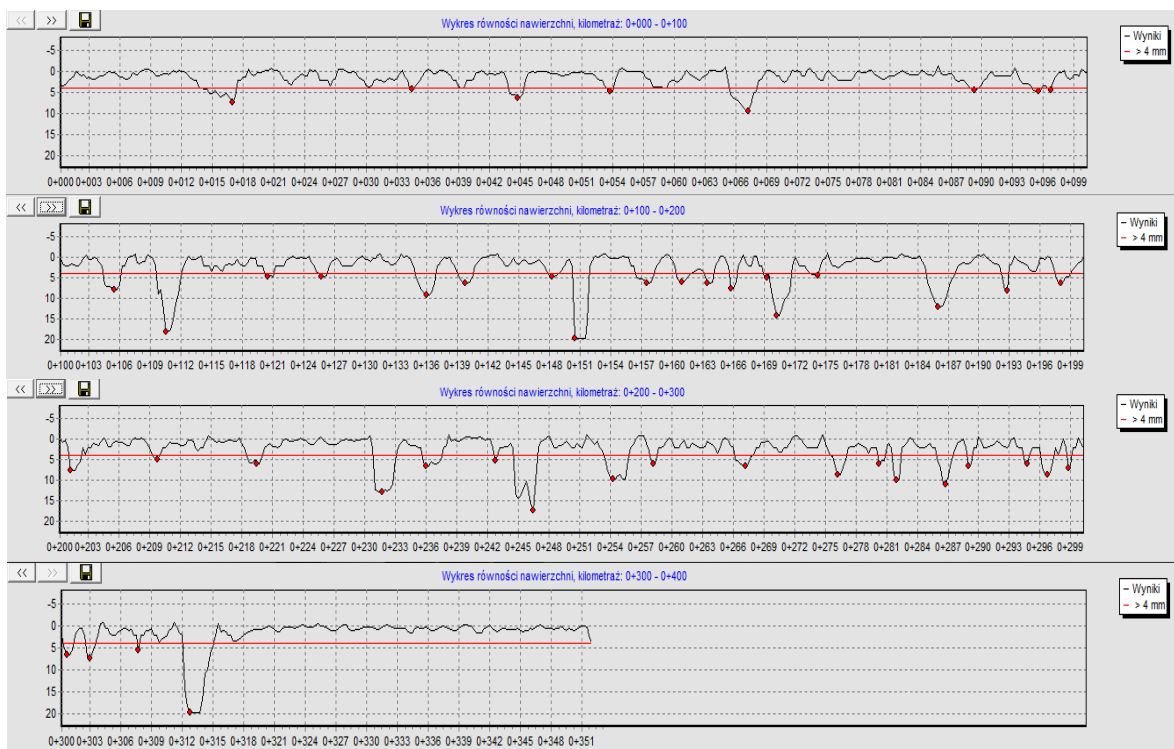
Pomiar przeprowadzony na odcinku 1 po stronie lewej jezdni wykazał 66 miejsc nierówności powyżej 4 mm o zakresie nierówności 5,4-19,9 mm, a na stronie prawej jezdni 83 miejsca nierówności powyżej 4 mm o zakresie nierówności 4,9-15,4 mm. Przy ustawieniu maksymalnego odchylenia na 9 mm na stronie lewej jest 27 nierówności, a na prawej 26. Są to już znaczne odchylenia.



Rysunek 7.3. Wykres pomiaru równości nawierzchni dla odcinka 2, strona prawa.

Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 7.3 przedstawiono wyniki badań równości nawierzchni drogi dla odcinka 2 po stronie prawej. Na rysunku 7.4 ukazano wyniki badań równości nawierzchni drogi dla odcinka 2 po stronie lewej.



Rysunek 7.4. Wykres pomiaru równości nawierzchni dla odcinka 2, strona lewa.

Źródło: opracowanie własne.

Pomiar przeprowadzony na odcinku 2 na stronie lewej jezdni wykazał 28 miejsc nierówności powyżej 4 mm o zakresie nierówności 4,1-19,7 mm, a na prawej 44 miejsca nierówności powyżej 4 mm o zakresie nierówności 4,1-19,7 mm.

Przy ustawieniu maksymalnego odchylenia na 9 mm na stronie lewej jest 12 nierówności, a na prawej 9. Są to już znaczne odchylenia, które mogą powodować przedwczesne uszkodzenia elementów układu zawieszenia.

Na podstawie obserwacji wizualnej badanego odcinka drogi oraz uzyskanych wyników badań można wyciągnąć następujące wnioski:

- stan istniejącej nawierzchni na badanym odcinku wskazuje na konieczność kompletnego remontu, a nawet przebudowy; w ocenie wizualnej stwierdzono liczne deformacje trwałe – koleiny, przełomy, pęknięcia zmęczeniowe, pęknięcia odbite, wykruszenia nawierzchni, wyboje i utratę szorstkości;
- na istniejącej nawierzchni stwierdzono dużą liczbę łat o dużej powierzchni oraz pęknięć siatkowych, które świadczą o utracie nośności konstrukcji i zaleganiu wody w głębszych warstwach, a pomiar planografem wykazał znaczne nierówności mające wpływ na komfort jazdy i pracę podzespołów pojazdów oraz zwiększony hałas;
- uszkodzenia nawierzchni asfaltowych spowodowane są różnymi czynnikami, do których należą m.in.:
 - ruch pojazdów, czyli nadmierne obciążenia od kół, które przyczynia się do powstawania kolein,
 - ruch pojazdów przeciążonych, o zbyt wysokim nacisku na oś, a w efekcie na nawierzchnię (również przyczynia się do powstawania kolein),
 - brak szczepności międzywarstwowej powoduje spękania i odkształcenia,
 - różnice temperatur otoczenia lato-zima, tzw. przejście przez 0°C, co powoduje pęknięcia nawierzchni oraz osłabienie podłoża przy nieodpowiednim odwodnieniu, w wyniku czego powrastają wysadziny i przełomy,
 - utrata nośności podłoża z przyczyn nieprzewidzianych w trakcie projektowania przyczynia się do inicjacji i rozwoju pęknięć siatkowych,
 - zbyt sztywna podbudowa przyczynia się do powstawania pęknięć odbitych,
 - wykonanie nawierzchni z mieszanki mineralno-asfaltowej o nieodpowiednich właściwościach lub błędy przy wbudowaniu powodują wykruszenia i wybije,
 - wbudowanie nieodpowiedniej mieszanki mineralno-asfaltowej w stosunku do obciążenia ruchem i utrata nośności niższych warstw konstrukcji nawierzchni – powstają deformacje trwałe i koleiny,
 - starzenie materiałów, z których wykonana jest nawierzchnia,
 - działanie czynników chemicznych i atmosferycznych np. sól drogowa.

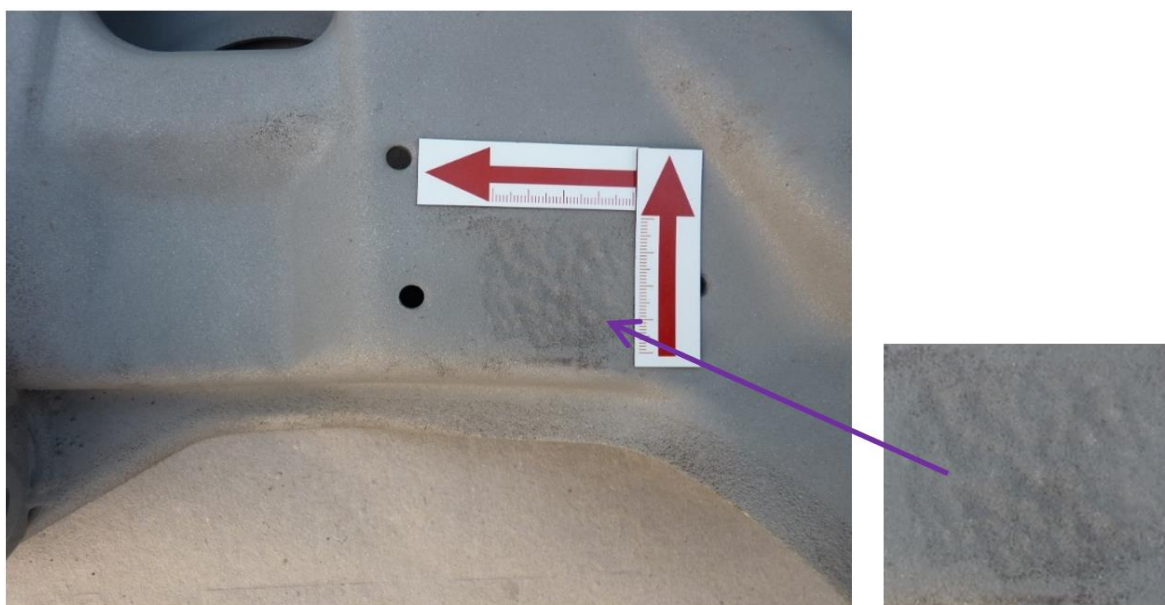
Aby dokładnie poznać przyczyny oraz rodzaj uszkodzeń, należałoby wykonać szereg badań laboratoryjnych, oceniających nośność, ugięcia, szorstkość itp. Na potrzeby tej pracy wykonano badanie równości, które pokazało znaczne odchylenia od wymagań. Takie nierówności i uszkodzenia nawierzchni mają ogromny wpływ na komfort jazdy, bezpieczeństwo użytkowników drogi, stan pojazdów itp.

7.2. Belka zawieszenia

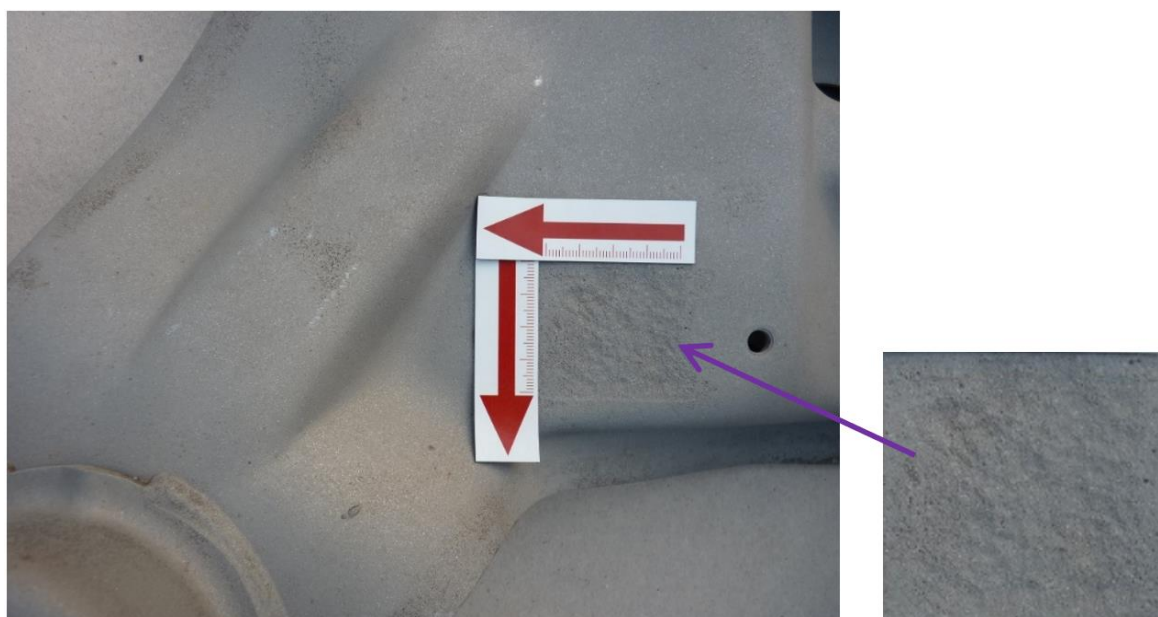
Obserwacje makrograficzne belki przedniego zawieszenia wykazały liczne uszkodzenia i zużycia. W zdecydowanej większości uszkodzenia te wynikały z procesu eksploatacji, jednak zdarzały się też uszkodzenia losowe, wynikające m.in. z uderzenia kamieniem.

7.2.1. Obserwacje makrograficzne

Na powierzchni belki przedniego zawieszenia widoczne były charakterystyczne zmiany profilu powierzchni w miejscu współpracy z drążkiem stabilizatora. Rysunki 7.5 i 7.6 obrazują przykładowe miejsca zaobserwowanych zmian.



Rysunek 7.5. Fragment belki zawieszenia przedniego z widocznymi zmianami profilu powierzchni.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.6. Fragment belki zawieszenia przedniego z widocznymi zmianami profilu powierzchni.
Źródło: opracowanie własne.

Widoczne ślady zużycia zajmują powierzchnię kwadratu o wielkości 16 cm² i zlokalizowane są na poszyciu belki, gdzie mocowany jest drążek stabilizatora.

Zużycie cechuje się charakterystycznymi zagłębieniami rozmieszczonymi równomiernie w opisanej powierzchni belki, co wskazuje na zmianę struktury jej warstwy wierzchniej w tych miejscach. Szczegółowe wyniki pomiaru profilu powierzchni zamieszczono w rozdziale 7.2.2.

Podobne uszkodzenia, polegające na zmianie profilu powierzchni, zaobserwowano na tylnej belce w miejscu mocowania resoru do belki. Przykładowe miejsca zajęte przez uszkodzenia przedstawiono na rysunku 7.7.



Rysunek 7.7. Przykładowy obraz makrograficzny tylnej belki zawieszenia ze zmienionym profilem powierzchni.

Źródło: opracowanie własne.

Na płaszczyźnie podpory, do której przylega resor mocowany śrubami, widoczne są wżery korozyjne o zróżnicowanej wielkości.

Oceniając stan warstwy wierzchniej belki zawieszenia, należy wziąć pod uwagę warunki jej pracy i wynikający z tego mechanizm powstawania i rozwoju uszkodzeń oraz zużycia.

W czasie pracy pojazdu uginające się resory przenoszą maksymalne obciążenia w miejscu mocowania resoru do belki. Ponadto podczas ugięcia pojawia się szczelina pomiędzy piórem resoru a podporą belki, którą dostaje się powietrze atmosferyczne oraz różnego rodzaju zanieczyszczenia w postaci pyłu, kurzu drobin piasku czy kropel wody, co sprzyja rozwojowi zużycia korozyjnego. Zaobserwowane zróżnicowanie wielkości oraz umiejscowienia uszkodzeń wskazuje, że występujące tarcie pomiędzy powierzchniami powodowało przemieszczanie tych zanieczyszczeń, tworząc środowisko sprzyjające rozwojowi zużycia frettingowego.

Jak wynika z definicji przytaczanych przez różnych naukowców (Kong, Bennett, Hyde, 2022; Nagentrau i in., 2021; Shen, Ke, Zhou, 2021; Kowalski, 2021), aby mogło zaistnieć zjawisko frettingu, potrzebne są 2 czynniki:

- styk 2 powierzchni ciał – warunek ten jest spełniony, ponieważ belka przez elementy gumowe współpracuje z drążkiem stabilizatora, czyli w miejscu, gdzie zaobserwowano wspomniane wcześniej uszkodzenia;
- oscylacyjne przemieszczenia styczne powierzchni ciał o niewielkiej amplitudzie w wyniku działania zmiennej siły normalnej lub stycznej do powierzchni styku. Również i ten warunek został spełniony, gdyż pojazd poruszający się po drodze o różnych profilach nawierzchni narażony jest na oddziaływania dynamiczne. W takiej sytuacji dochodzi również do oscylacyjnych mikroprzemieszczeń stycznych pomiędzy belką zawieszenia a drążkiem stabilizatora.

Ze względu na różnorodność mechanizmu rozwoju zużycia wynikającego z wielu czynników, zależnych m.in. od warunków otoczenia, właściwości materiału czy warunków przemieszczeń stycznych, nie zdefiniowano jednoznacznie zużycia frettingowego. Podano jedynie warunki konieczne zaistnienia zjawiska zużycia, które wymieniono powyżej, oraz zakres amplitudy przemieszczeń względnych, który waha się w granicy 0,02-150 μm .

R.B. Waterhouse (1972; 1981) wyróżnia 3 rodzaje zużycia frettingowego:

- *fretting fatigue* – jako połączenie zjawiska frettingu i zmęzeniowych naprężeń, w wyniku którego następuje rozwój mikropęknięć w głąb materiału;
- *fretting wear* – ubytek masy warstwy wierzchniej oraz powstawanie zużyc na jej powierzchni;
- *fretting corrosion* – odmiana zużycia frettingowego, kiedy powstające produkty zużycia są wynikiem reakcji chemicznych stykających się powierzchni z otoczeniem.

Obrazem zużycia frettingowego mogą być ślady korozji na powierzchni elementów, wzrost chropowatości powierzchni, mikropęknięcia w warstwie wierzchniej, wżery, a w konsekwencji rozwój pęknięć zmęzeniowych.

Na zużycie frettingowe ma wpływ wiele czynników. Trudność w określeniu dokładnej ich liczby wynika m.in. ze złożonego i nie do końca zbadanego mechanizmu zużycia. Najogólniej czynniki te można pogrupować na 3 kategorie:

- czynniki związane z warunkami otoczenia, do których można zaliczyć: wilgotność, temperaturę, zanieczyszczenia, smarowanie;
- własności materiałowe, takie jak np. twardość, podatność na korozję, granica plastyczności, wytrzymałość na rozciąganie i zmęczeniowa;
- warunki przemieszczeń względnych, to jest: amplituda, obciążenie, częstotliwość, czas trwania, geometria powierzchni.

Przedstawiony podział został zaproponowany przez R.C. Bill. Inny naukowiec wykazał w pracy *Fretting w elementach maszyn* (Neyman, 2003), że największy wpływ na proces frettingu wywiera struktura węzła styku, jako systemu tribologicznego, a także otoczenie węzła. W warunkach frettingu węzeł poddany jest działaniu wymuszeń, do których należą: ruch o określonej amplitudzie, częstotliwości i obciążenie. Do oddziaływania otoczenia badacz zalicza wpływ temperatury, wilgotności i dostęp tlenu. Struktura węzła styku to stykające się warstwy wierzchnie, produkty zużycia, właściwości mechaniczne i tribologiczne elementów struktury i relacje pomiędzy nimi.

Analizowany węzeł tribologiczny, na który składa się połączenie: belka zawieszenia – drążek stabilizatora (poprzez tuleje gumowe), poddany jest działaniu czynników związanych z warunkami otoczenia i przemieszczeń względnych.

Pojazdy, które poddane zostały badaniom w niniejszej pracy, poruszały się po drodze o zróżnicowanym stanie technicznym. Niejednokrotnie występowały zniszczenia nawierzchni w postaci kolein, zafałdowania asfaltu, wyrw sięgających podbudowy żwirowej, co potwierdzają wyniki badań nawierzchni drogi zamieszczone w rozdziale. Cykliczna jazda po takich odcinkach drogi wywołuje oscylacyjne przemieszczenia pomiędzy współpracującymi elementami układu zawieszenia, inicjując tym samym rozwój zużycia frettingowego w analizowanym węźle tribologicznym.

Pojazdy eksploatowane były w różnych warunkach środowiskowych. Jeździły codziennie przez cały rok, co powodowało narażenie układu zawieszenia na działanie niekorzystnych czynników związanych z warunkami otoczenia, do których można zaliczyć opady deszczu, obecność środka uszarniającego nawierzchnię jezdni (sól drogowa) i innych środków zwiększających przyczepność na drodze (piasek). Ponadto pojazdy eksploatowane były na drogach gruntowych, szutrowych i piaszczystych. Jazda po zniszczonej nawierzchni drogi umożliwiała przedostawanie się tych czynników do węzła tribologicznego belka zawieszenia – drążek stabilizatora, powodując warunki sprzyjające rozwojowi zużycia frettingowego.

Nie bez znaczenia na rozwój zużycia frettingowego pozostają czynniki związane z właściwościami materiału. W pracy analizowano twardość powierzchni belki zawieszenia. Wyniki badań pokazały, że w miejscu zaobserwowanych zmian zużyciowych następuje spadek twardości powierzchni o 2-3%, a parametry chropowatość warstwy wierzchniej znacząco zwiększają się. Wszystkie wymienione czynniki tworzą środowisko mocno korozyjne, na działanie którego narażona jest zarówno belka zawieszenia, jak i drążek stabilizatora. Dlatego na elementach tych podczas obserwacji makroskopowych ujawniono ślady zużycia korozyjnego.

W świetle powyższych stwierdzeń i oceny makroskopowej powierzchni belki i analizy literatury dotyczącej zużycia frettingowego należy z dużym prawdopodobieństwem założyć, że jednym z uszkodzeń powodujących degradację warstwy wierzchniej elementów układu zawieszenia jest właśnie zużycie frettingowe.

Obserwacje mikroskopowe z użyciem mikroskopu skaningowego potwierdziły obecność produktów zużycia, charakterystycznych dla zjawiska frettingu. Wyniki tych obserwacji zamieszczono w dalszej części niniejszej pracy.

Aby potwierdzić tezę o możliwości występowania zjawiska frettingowego na powierzchni belki układu zawieszenia, konieczne jest przeprowadzenie szczegółowych badań stanowiących odrębny problem naukowy, którego wyniki badań zostaną zamieszczone w kolejnych publikacjach.

Zużycie frettingowe jest zjawiskiem powszechnie występującym w elementach węzła tribologicznego, w którym występują oscylacyjne przemieszczenia styczne między tymi elementami, dlatego też obserwowane jest praktycznie we wszystkich dziedzinach życia i nauki. Potwierdzeniem tego faktu jest krótki przegląd literatury, w którym można zauważyć, że zużycie frettingowe występuje w elementach samolotów, pojazdów samochodowych i szynowych. Ponadto spotykane jest w połączeniach wciskowych wał – tuleja, urządzeniach siłowni nuklearnych, linach, stykach elektrycznych, a także elementach ortopedycznych łączących złamane kości i implantach.

Mechanizm inicjacji i rozwoju zużycia frettingowego jest trudny do opisanie, m.in. ze względu na nieokreśloną liczbę czynników i dużą liczbę procesów zużyciowych towarzyszących zjawiskowi frettingu, do których należy zaliczyć: adhezję, zjawiska zmęczeniowe, mikroskrawanie, korozję, odkształcenia plastyczne itp.

Autorzy pracy *The mechanism of fretting* (Feng, Rightmire, 1953) stwierdzili, że w procesie zużycia dominują czynniki mechaniczne i wyróżnili 4 etapy zużycia frettingowego:

- adhezyjne uszkodzenie powierzchni i powstawanie pęknięć zmęczeniowych;
- powstawanie cząstek zużycia i ich utlenianie;
- powiększenie się ilości produktów zużycia, ich rozdrabnianie i utlenianie;
- oddzielenie powierzchni grubą warstwą cząstek tlenowych, co prowadzi do ustabilizowania procesu zużycia.

Autorzy pracy *The fretting corrosion of mild steel* (Holliday, Hirst, 1956) stwierdzili, że fretting składa się z wielu procesów zużyciowych. W początkowym okresie deformacja plastyczna warstwy wierzchniej prowadzi do uszkodzenia warstwy tlenków na powierzchni metalu, a po odkryciu czystego metalu do powstawania lokalnych szczepień adhezyjnych. W kolejnym etapie następuje rozerwanie szczepień i tworzenie się swobodnych metalicznych cząstek oraz mikrowżerów i ostrych występow w warstwie wierzchniej skojarzonych powierzchni. Kolejny etap to szybkie utlenianie stale tworzących się cząstek metalicznych, które gromadząc się w strefie tarcia, spełniają rolę ścierniwa.

Autor pracy *Fretting fatigue* (Waterhouse, 1981) przypuszcza z kolei, że istnieją 3 podstawowe grupy procesów mających wpływ na rozwój zużycia frettingowego, tj.: oddziaływania mechaniczne, które niszczą warstewkę tlenkową na powierzchni; usunięcie produktów zużycia z powierzchni styku w postaci rozdrobnionych cząstek metalicznych; uszkodzenia powierzchni utlenionymi produktami zużycia. Z tego też względu proponuje następujący mechanizm zużycia frettingowego:

- nagromadzenie produktów zużycia między nierównościami powierzchni;
- łączenie mniejszych obszarów w większe;
- przenoszenie produktów zużycia z jednej powierzchni na drugą;
- oddzielanie powierzchni współpracujących w wyniku powstającego złoza produktów zużycia podczas intensywnego ścierania.

Autorzy pracy *Fretting fatigue and fretting wear* (Berthier, Vincent, Godet, 1989) podają 2 typy kontaktu, w których mechanizm zużycia może się różnić. Typ pierwszy cechuje się grubą warstwą ciała trzeciego (tlenków), które oddziela ciało pierwsze oraz przenosi obciążenia normalne i siły styczne. W typie drugim, gdzie brak ciała trzeciego, występuje lokalny styk ciał pierwszych, zachodzą procesy adhezji i zmęczenia oraz zapoczątkowane zostają pęknięcia zmęczeniowe w warstwie wierzchniej obu elementów.

W pracy *Fretting w elementach maszyn* (Neyman, 2003) badacz zaproponował następujący mechanizm rozwoju zużycia frettingowego:

- starcie warstewek naturalnych zanieczyszczeń (para wodna, cząstki gazów, cząstki tłuszczów) i spowodowany tym wzrost wartości sił adhezji na powierzchni styku;
- uszkodzanie i zużywanie adhezyjne, przenoszenie fragmentów warstwy wierzchniej z jednej powierzchni na drugą, „rozsmarowywanie” bardziej miękkiego materiału na twardszym, tworzenie adhezyjnych cząstek zużycia;

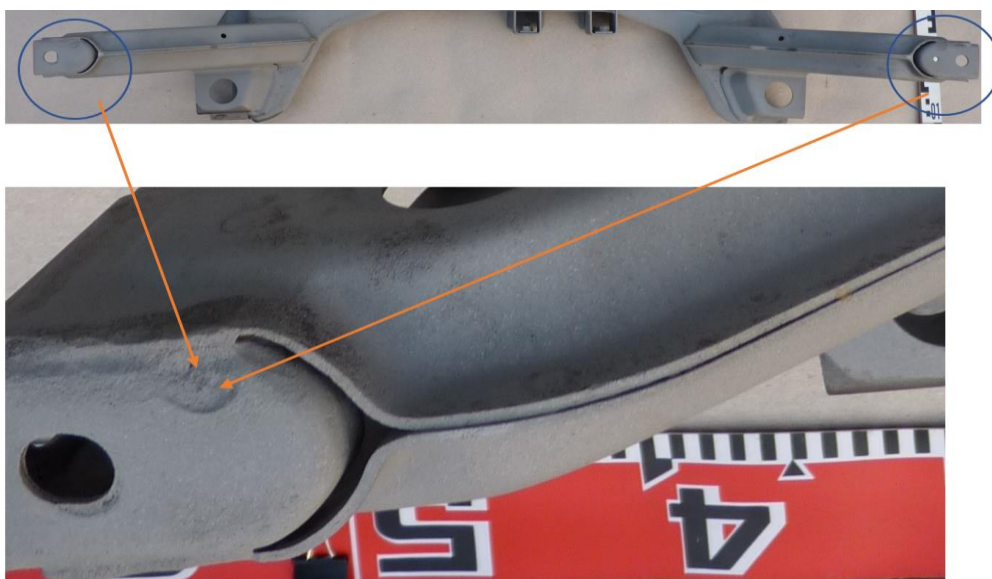
- powstawanie powierzchniowych pęknięć zmęczeniowych, głównie na granicy obszaru poślizgowego i bezpoślizgowego oraz podpowierzchniowych, głównie w miejscach występowania karbów spowodowanych defektami struktury warstwy wierzchniej;
- zużywanie utleniające (tworzenie warstewek tlenkowych i ich zrywanie);
- zużywanie ściernie wierzchołkami nierówności, łączące się ściśle ze zużywaniem utleniającym;
- gromadzenie się produktów zużycia, które oddzielają współpracujące stopniowo powierzchnie, w obszarze styku złożem o rosnącej grubości;
- zużywanie ściernie produktami zużycia;
- wydostawanie się produktów zużycia z obszarów styku, łączenie się mniejszych obszarów w większe.

Przedstawione powyżej mechanizmy zużycia frettingowego dotyczyły głównie elementów dociskanych do siebie siłą normalną, przy różnych rodzajach styku.

Zużycie frettingowe jest procesem złożonym, na które składa się kilka rodzajów zużycia. Uszkodzenia powierzchni w postaci narostów i wżerów mogą być wynikiem zjawiska adhezji, natomiast wytarcia powierzchni powstawać w efekcie procesów mikroskrawania (Kowalski, 2021).

Charakterystyczną cechą uszkodzeń frettingowych jest kolor brunatnoczarny obserwowany na powierzchniach elementów w miejscach uszkodzeń frettingowych. Obraz ten jest wynikiem powstawania uszkodzeń adhezyjnych i deformacji plastycznych ulegających utlenianiu. Zużycie frettingowe występuje w wielu dziedzinach nauki i techniki, m.in. w środkach transportu szynowego (Zou i in., 2020; Balasubramaniam, Mahapatara, Dwivedi, 2009), samolotach (Curà, Mura, 2017; Xiao i in., 2022), implantach ortopedycznych (Thesleff, Ortiz-Catalan, Brånemark, 2022; Nagentrau i in., 2021).

Na zewnętrznych płaszczyznach podpór belki, tj. miejscach, gdzie jest ona mocowana do podłużnic, zarówno z prawej, jak i lewej strony, rozpoznano nalot rdzy, a w miejscach technologicznego łączenia konstrukcji metodą spawania zauważono wżery korozyjne o średnicy ok. $\varnothing$ 10 mm (rysunek 7.8).



Rysunek 7.8. Uszkodzenie podpory belki w postaci wżeru korozyjnego.

Źródło: opracowanie własne.

Uszkodzenie po stronie prawej było głębsze, a na jego obszarze ujawnił się mikrootwór. Zbieżność usytuowania opisanych uszkodzeń w tych miejscach wskazuje na brak pełnego przylegania płaszczyzn podpór do podłużnic. Taki stan powodował zwiększenie działania na te miejsca czynników sprzyjających procesowi korozji, tj. kontakt z wodą i materiałami stosowanymi do uszorstniania jezdni w okresach zimowych. Brak pełnego zespolenia na połączeniu płaszczyzny podłużnicy i wspornika belki powodował powstanie szczeliny, gdzie przywołane składniki miały podatne środowisko do miejscowego, zwiększonego procesu korozyjnego. Powierzchnia poddana korozji ulega trwałemu uszkodzeniu i finalnie w ostatniej fazie rozpada się. Oceniając zaawansowanie procesu zniszczenia podpór, można wnioskować o postępującej zmianie parametrów osadzenia belki do nadwozia, zmieniającej parametry kierowności pojazdu.

Na poszyciu belki przedniej też ujawniono 2 ślady odkształceń plastycznych o charakterystycznym łukowym kształcie (rysunek 7.9). Zakres tych odkształceń był niewielki i nie wpływał na zmianę pierwotnego kształtu budowy belki. Rozpoznano również liniowe zarysowania poszycia, gdzie ujawniony ślad wywołał powstanie rysy o minimalnym zagłębieniu w poszyciu belki. Przyczyny takich uszkodzeń upatruję w kontakcie tego elementu podwozia z elementami zanieczyszczającymi drogę, tj. bryłami, kamieniami itp., które mogły upaść z pojazdów przewożących kruszywa. Takie przedmioty mogły być również wwieszone na drogę przez pojazdy włączające się do ruchu z terenu budów czy punktów pozyskiwania kruszyw. Tego typu elementy leżące na drodze po najechnaniu koła samochodu mogą zostać wciśnięte między przestrzenie bieżnika kół, a uwolnić się dopiero wskutek zwiększenia prędkości jazdy samochodu po równej nawierzchni. Nie można też pomijać przypadku, w którym kierowca pojazdu, poruszając się drogami o znacznej, zmiennej poprzecznej konfiguracji, jedzie torami po obniżonym terenie, a część drogi między torami kół jest usytuowana wyżej. Błędna ocena przez kierującego pojazdem takich sytuacji może doprowadzać w skrajnym przypadku do zablokowania podwozia na nierówności drogi, a kontakt uderzeniowy o podłoże drogi wywołać powstanie śladów uszkodzeń o opisanym, rozpoznanym charakterze.



Rysunek 7.9. Obraz makrograficzny miejsc z widocznym odkształceniem plastycznym.
Źródło: opracowanie własne.

Opisane uszkodzenia występowały na belkach 4 pojazdów. Uszkodzenia były zlokalizowane na dolnym poszyciu belki, gdzie zachodzą możliwości kontaktu otarciowego lub uderzeniowego z przeszkodami znajdującymi się na drodze.

7.2.2. Ocena topografii powierzchni

Zużywanie elementów węzła tribologicznego skutkuje zmianami w geometrii powierzchni i budowie warstwy wierzchniej, które powstają na skutek wzajemnego oddziaływania współpracujących powierzchni. Wielkość zużycia zależy głównie od środowiska pracy tego węzła tribologicznego. Jednym ze sposobów pomiaru zmian w geometrii powierzchni jest ocena ich profilu.

Ukształtowanie struktury powierzchni, w tym stopień jej izotropowości, ma wpływ na intensywność zużywania. Ze względu na styk współpracujących powierzchni, na który ma wpływ stopień izotropowości, zużywanie może być przerywane lub ciągłe (Matuszewski, 2013). Przy małym stopniu izotropowości grzbiety nierówności przesuwają się po sobie, a przy dużym wierzchołki mikronierówności opierają się wzajemnie lub trafiają we wgłębienia, bruzdzą przeciwległą powierzchnię lub ulegają ścięciu. W drugim przypadku produktów zużycia będzie więcej i powierzchnie mogą wykazywać mniejszą odporność na zużywanie. Kierunkowość struktury powierzchni ma istotny wpływ na intensywność zużycia ściernego, a kąt współpracy struktur będzie wpływał na mechanizm zużycia (Ibidem).

Powierzchnia niezajęta przez zużycie – pomiar 3

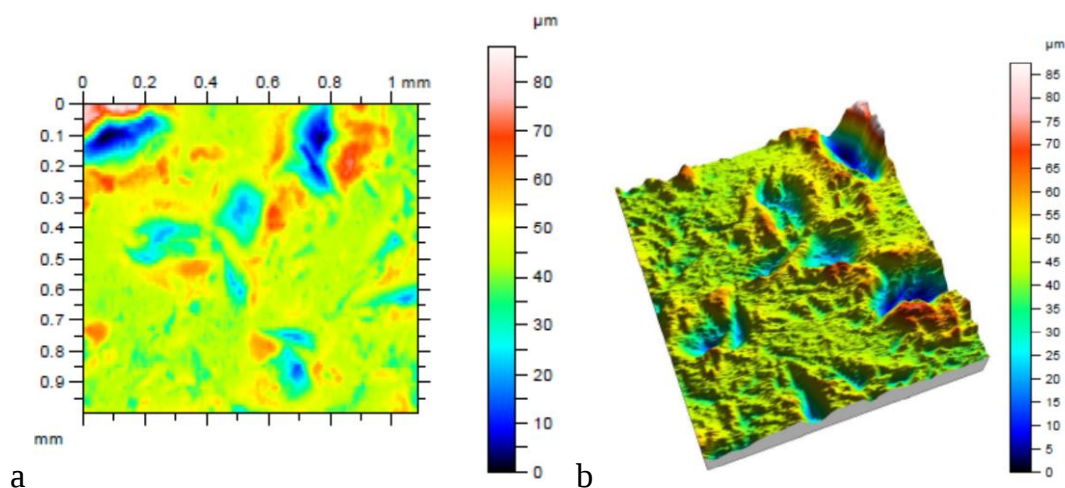
W tabeli 7.1 zaprezentowano wartości amplitudowe, przestrzenne, hybrydowe oraz funkcyjne parametrów chropowatości według normy ISO 25178. Na rysunkach 7.10-7.14 ukazano wyniki pomiaru topografii powierzchni, na które składają się: mapy warstwiczne powierzchni, krzywa Abbotta-Firestone'a, analiza graficzna parametrów S_k oraz stopień izotropowości powierzchni.

Tabela 7.1

Parametry SGP – pomiar 3

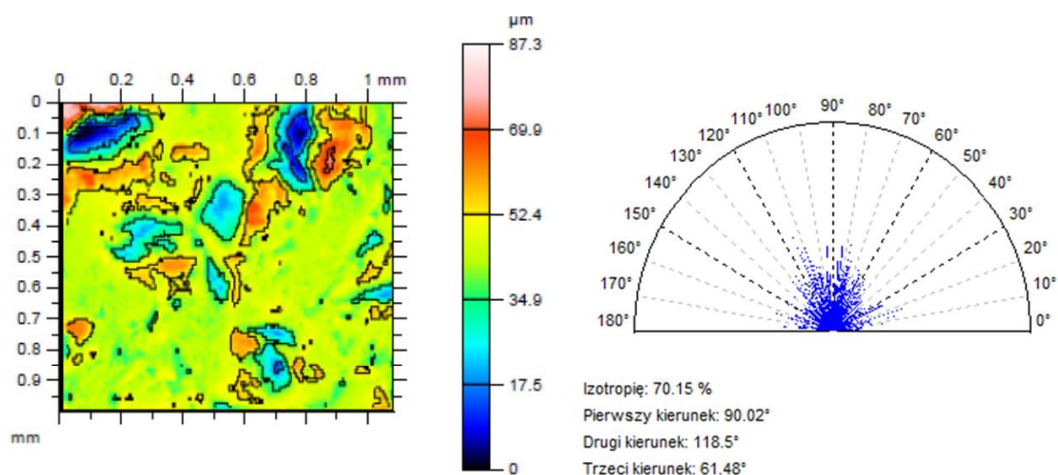
Amplitudowe	Przestrzenne	Hybrydowe	Funkcyjne	S_k
$S_a = 6,496 \mu m$	$S_{tr} = 0,7015$	$S_{dq} = 0,4660$	$S_{bi} = 0,3539$	$S_k = 13,7 \mu m$
$S_q = 9,709 \mu m$	$S_{td} = 112,2$	$S_{ds} = 1088 \text{ 1/mm}^2$	$S_{ci} = 1,330$	$S_{pk} = 11,49 \mu m$
$S_p = 41,98 \mu m$	$S_{al} = 0,060481 \text{ mm}$	$S_{sc} = 83,72 \text{ 1/mm}$	$S_{vi} = 0,1968$	$S_{vk} = 19,92 \mu m$
$S_v = 43,63 \mu m$		$S_{dr} = 10,16 \%$		
$S_{sk} = -0,7271$		$S_{fd} = 2,481$		
$S_{ku} = 6,022$				
$S_z = 85,60 \mu m$				

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.10. Pomiar chropowatości powierzchni niezajętej przez zużycie, filtr gaussowski, cut-off 0,8 mm: a) obraz 2D, b) obraz 3D.

Źródło: opracowanie własne.

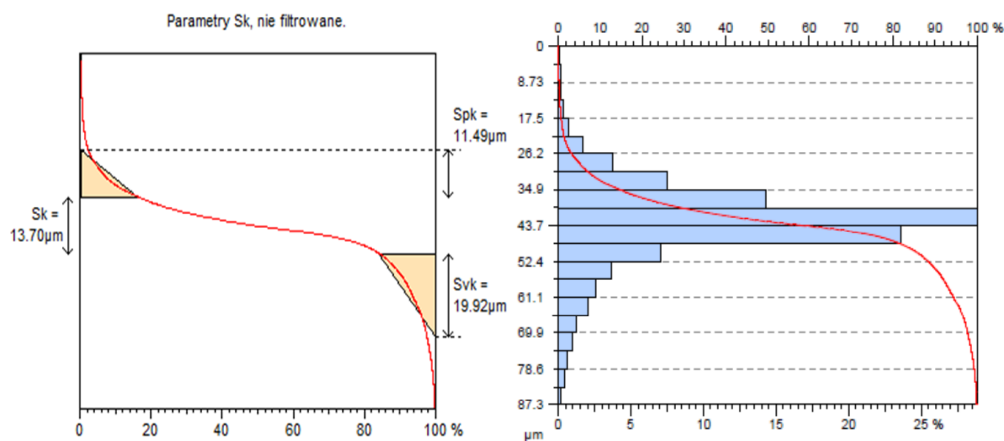


Rysunek 7.11. Wykres warstwicowy powierzchni niezajętej przez zużycie.

Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 7.12. Kierunek struktury powierzchni.

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.13. Analiza graficzna parametrów Sk.

Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 7.14. Krzywa Abbotta-Firestone'a.

Źródło: opracowanie własne.

Większa chropowatość powierzchni osłabia odporność korozyjną wskutek zwiększenia rzeczywistej powierzchni styku korodującego elementu. Z tego względu największy wpływ na intensywność zużycia korozyjnego mają wysokościowe parametry chropowatości powierzchni i promień krzywizny wgłębień mikronierówności. Wpływ na wzrost intensywności zużycia ma zwiększenie chropowatości i to powiększona powierzchnia oddziaływania oddziałuje na wzrost intensywności zużycia. Natomiast wskazywane parametry są miarą zwiększenia chropowatości i faktycznie mogą być skorelowane z wielkością zużycia.

Analizując uzyskane wartości parametrów dla powierzchni niezajętej przez zużycie, można zauważyć, że maksymalna wysokość powierzchni S_z wynosi $85,60\ \mu\text{m}$, średnia arytmetyczna wysokość powierzchni $S_a = 6,496\ \mu\text{m}$, maksymalna wysokość piku powierzchni $S_p = 41,98\ \mu\text{m}$, maksymalna wysokość wgłębienia powierzchni $S_v = 43,63\ \mu\text{m}$ oraz wysokość średniokwadratowa powierzchni $S_q = 9,709\ \mu\text{m}$. Dość szybkie zanikanie funkcji ACF ($S_{al} = 0,060481\ \text{mm}$) świadczy o dominującym udziale składowej losowej w strukturze geometrii powierzchni (SGP). Rozkład rzędnych wierzchołków miejscowych wzniesień jest rozkładem normalnym o wysokim skupieniu $S_{ku} = 6,022$ z niewielką ujemną skośnością $S_{sk} = -0,7271$, co wskazuje na powierzchnię w kształcie płaskowyżowym.

Powierzchnia nieobjęta korozją ma strukturę izotropową losową. O strukturze takiej świadczy wartość wskaźnika tekstury powierzchni $S_{tr} = 0,7015$ (poziom izotropowości wynosi $70,15\%$).

Analizując parametry hybrydowe, należy zwrócić uwagę na dużą gęstość wierzchołków miejscowych wzniesień ($S_{ds} = 1088\ 1/\text{mm}^2$) i duży wymiar fraktalny ($S_{fd} = 2,481$). Średniokwadratowe pochylenie nierówności powierzchni $S_{dq} = 0,466$, średnia arytmetyczna krzywizna szczytów $S_{sc} = 83,72\ 1/\text{mm}$ i rozwinięcie powierzchni $S_{dr} = 10,16\%$ świadczy o chropowatej powierzchni. Powierzchnia charakteryzuje się najmniejszym wskaźnikiem utrzymania cieczy przez rdzeń ($S_{ci} = 1,33$) i największym współczynnikiem utrzymania cieczy przez doliny ($S_{vi} = 0,197$) przy wskaźniku nośności $S_{bi} = 0,3539$ w porównaniu do powierzchni objętych korozją.

Powierzchnia zajęta przez zużycie – pomiar 1

W tabeli 7.2 przedstawiono parametry SGP dla pomiaru 1 (obszar badany objęty korozją). Na rysunkach 7.15-7.19 ukazano wyniki pomiaru topografii powierzchni, na które składają się: mapy warstwiczne powierzchni, krzywa Abbotta-Firestone'a, analiza graficzna parametrów S_k oraz stopień izotropowości powierzchni.

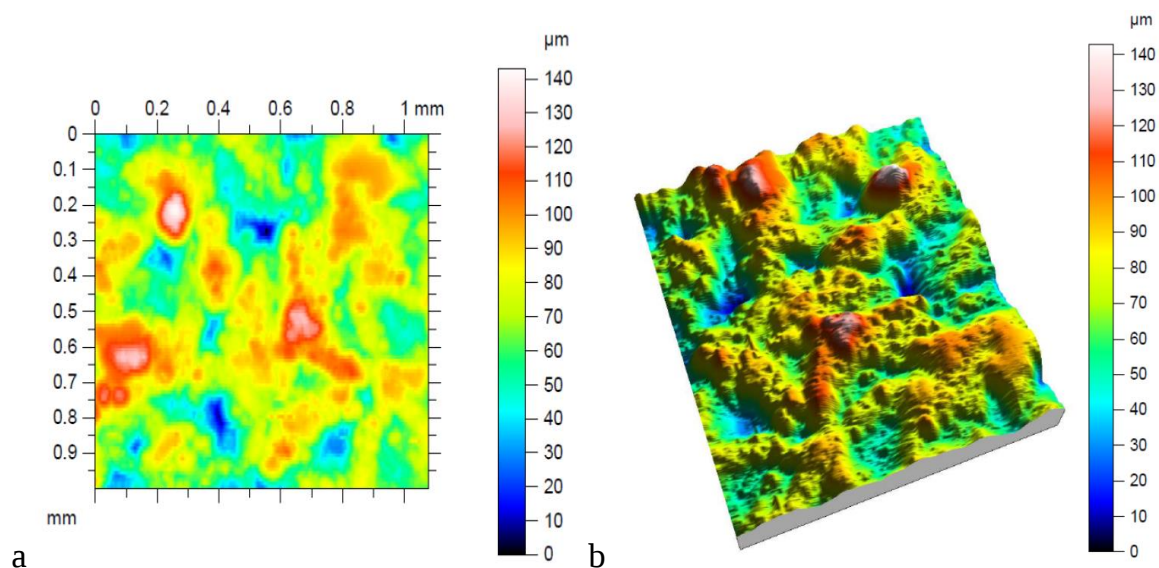
Analizując powyższe wartości parametrów wysokościowych dla powierzchni objętej korozją, można zauważyć, że maksymalna wysokość powierzchni S_z wynosi $143,2\ \mu\text{m}$, średnia arytmetyczna wysokość powierzchni $S_a = 15,04\ \mu\text{m}$, maksymalna wysokość piku powierzchni $S_p = 69,68\ \mu\text{m}$, maksymalna wysokość wgłębienia powierzchni $S_v = 73,52\ \mu\text{m}$ i wysokość średniokwadratowa powierzchni $S_q = 18,93\ \mu\text{m}$.

Tabela 7.2

Parametry SGP – pomiar 1

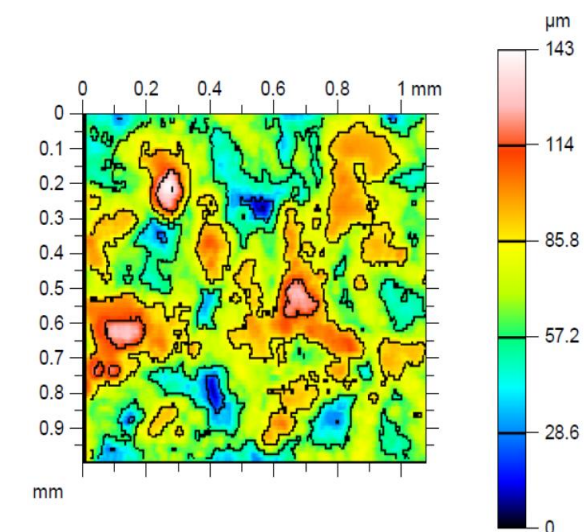
Amplitudowe	Przestrzenne	Hybrydowe	Funkcyjne	Sk
Sa = 15,04 μm	Str = 0,8574	Sdq = 0,6640	Sbi = 0,4821	Sk = 49,84 μm
Sq = 18,93 μm	Std = 57,75	Sds = 531,13 1/mm ²	Sci = 1,526	Spk = 20,45 μm
Sp = 69,68 μm	Sal = 0,1069 mm	Ssc = 93,03 1/mm	Svi = 0,1092	Svk = 19,31 μm
Sv = 73,52 μm		Sdr = 20,20 %		
Ssk = 0,07224		Sfd = 2,382		
Sku = 3,275				
Sz = 143,2 μm				

Źródło: opracowanie własne.

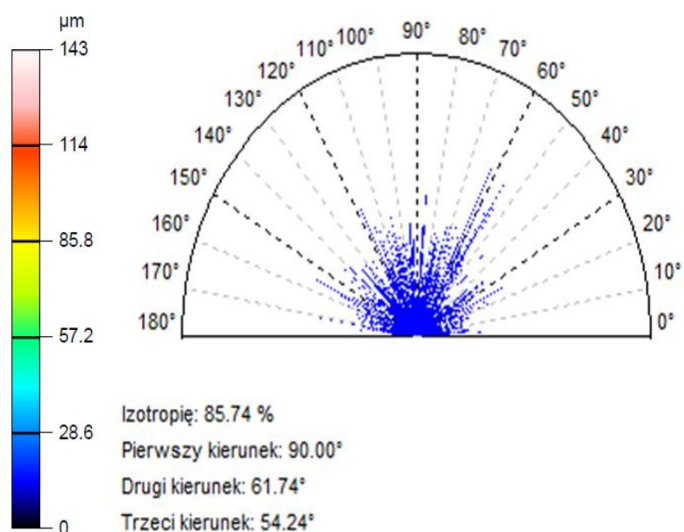


Rysunek 7.15. Pomiar chropowatości powierzchni zajętej przez zużycie, filtr gaussowski, cut-off 0,8 mm: a) obraz 2D, b) obraz 3D.

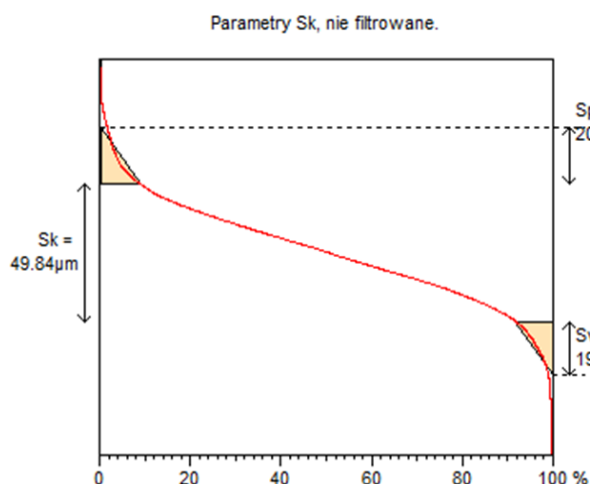
Źródło: opracowanie własne.



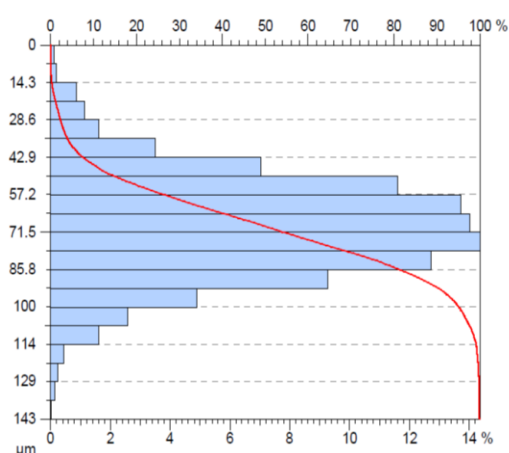
Rysunek 7.16. Wykres warstwicowy.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.17. Kierunek struktury powierzchni.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.18. Analiza graficzna parametrów Sk.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.19. Krzywa Abbotta-Firestone'a.
Źródło: opracowanie własne.

Wszystkie parametry wysokościowe zwiększyły swoją wartość nawet dwukrotnie w porównaniu z powierzchnią nieobjętą korozją. Szybko zanikająca funkcja autokorelacji ($S_{al} = 0,10691$ mm) jest charakterystyczna dla struktur losowych.

Rozkład rzędnych wierzchołków miejscowych wzniesień jest rozkładem normalnym o wysokim skupieniu $S_{ku} = 3,275$ i z niewielką dodatnią skośnością $S_{sk} = 0,07224$, co wskazuje na powierzchnię w kształcie zaostrowym.

Powierzchnia objęta korozją ma strukturę izotropową losową, o czym świadczy wartość wskaźnika tekstury powierzchni $S_{tr} = 0,8574$ (poziom izotropowości wynosi ok. 85,74%).

Analiza parametrów hybrydowych zwraca uwagę na gęstość wierzchołków miejscowych wzniesień, która zmniejszyła się dwukrotnie w porównaniu do powierzchni nieobjętej korozją ($S_{ds} = 531,13$ 1/mm²) oraz duży wymiar fraktalny ($S_{fd} = 2,382$). Średniokwadratowe pochylenie nierówności powierzchni $S_{dq} = 0,664$, średnia arytmetyczna krzywizna szczytów $S_{sc} = 93,03$ 1/mm i rozwinięcie powierzchni $S_{dr} = 20,20\%$, zwiększyło się dwukrotnie, co świadczy o większej chropowatości powierzchni.

Powierzchnia charakteryzuje się większym wskaźnikiem utrzymania cieczy przez rdzeń ($S_{ci} = 1,526$) i zmniejszającym się współczynnikiem utrzymania cieczy przez doliny ($S_{vi} = 0,1092$) przy zwiększającym się wskaźniku nośności $S_{bi} = 0,4821$ w porównaniu do powierzchni nieobjętej korozją.

Powierzchnia zajęta przez zużycie – pomiar 2

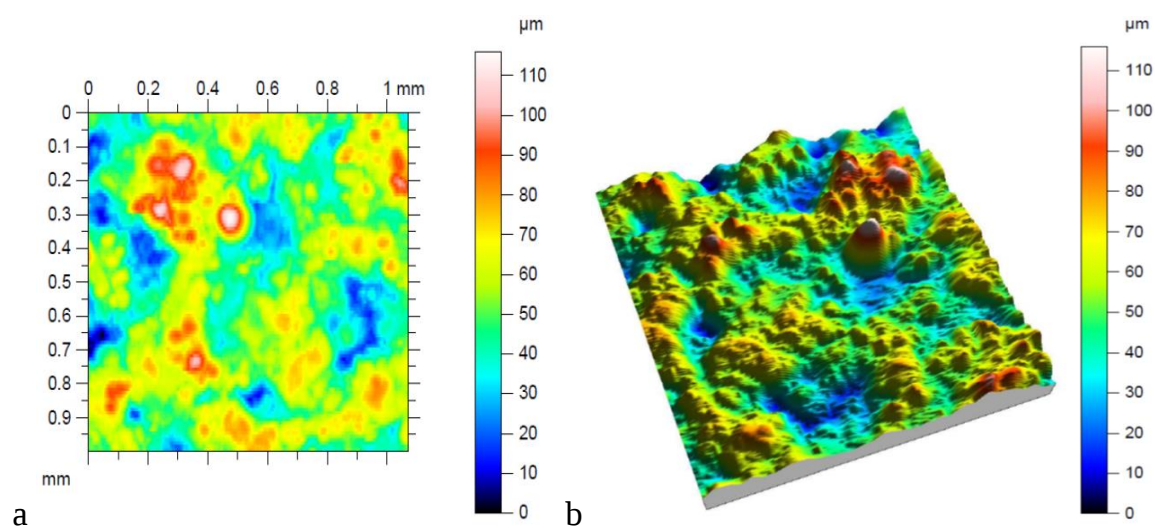
W tabeli 7.3 przedstawiono parametry SGP dla pomiaru 2 (obszar badany objęty korozją). Na rysunkach 7.20-7.24 przedstawiono wyniki pomiaru topografii powierzchni, na które składają się: mapy warstwiczne powierzchni, Krzywa Abbotta-Firestone'a, analiza graficzna parametrów Sk oraz stopień izotropowości powierzchni.

Tabela 7.3

Parametry SGP – pomiar 2

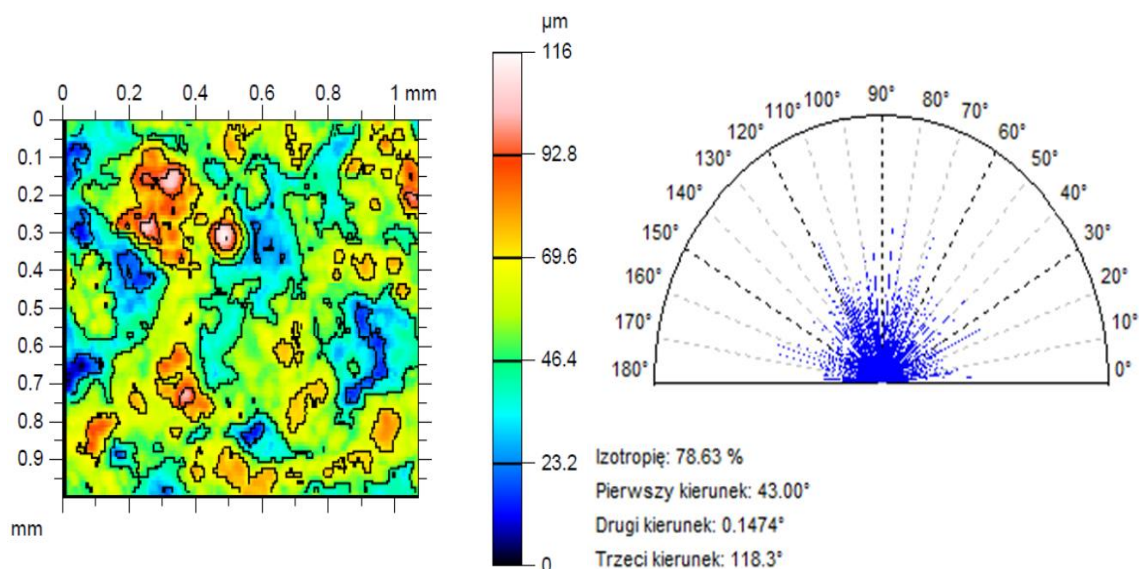
Amplitudowe	Przestrzenne	Hybrydowe	Funkcyjne	Sk
Sa = 12,64 μm	Str = 0,7863	Sdq = 0,6303	Sbi = 0,45	Sk = 39,17 μm
Sq = 16,13 μm	Std = 98,75	Sds = 640,3 1/mm ²	Sci = 1,553	Spk = 18,75 μm
Sp = 62,29 μm	Sal = 0,09301 mm	Ssc = 108,0 1/mm	Svi = 0,1147	Svk = 16,09 μm
Sv = 53,25 μm		Sdr = 18,29 %		
Ssk = 0,1113		Sfd = 2,407		
Sku = 3,285				
Sz = 115,5 μm				

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.20. Pomiar chropowatości powierzchni zajętej przez zużycie, filtr gaussowski, cut-off 0,8 mm, a) obraz 2D, b) obraz 3D.

Źródło: opracowanie własne.

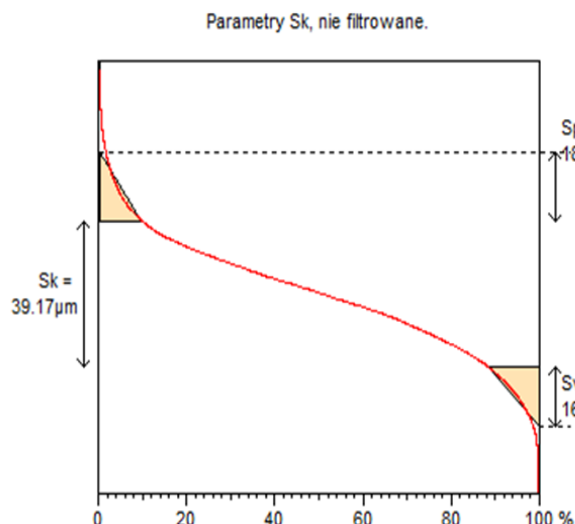


Rysunek 7.21. Wykres warstwiczny powierzchni przez zużycie.

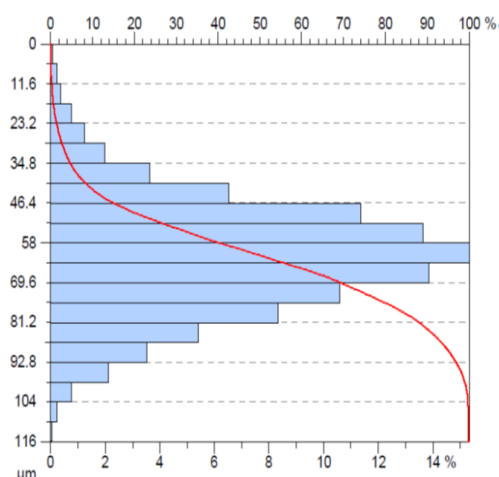
Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 7.22. Kierunek struktury zajętej powierzchni.

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.23. Analiza graficzna parametrów Sk.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.24. Krzywa Abbotta-Firestone'a.
Źródło: opracowanie własne.

Analizując uzyskane wartości parametrów wysokościowych dla powierzchni objętej korozją, można zauważyć, że maksymalna wysokość powierzchni S_z wynosi $115,5 \mu\text{m}$, średnia arytmetyczna wysokość powierzchni $S_a = 12,64 \mu\text{m}$, maksymalna wysokość piku powierzchni $S_p = 62,29 \mu\text{m}$, maksymalna wysokość wgłębienia powierzchni $S_v = 53,25 \mu\text{m}$ i wysokość średniokwadratowa powierzchni $S_q = 16,13 \mu\text{m}$.

Wszystkie parametry wysokościowe zwiększyły swą wartość nawet dwukrotnie w porównaniu z powierzchnią nieobjętą korozją. Szybko zanikająca funkcja autokorelacji ($S_{al} = 0,09301 \text{ mm}$) jest charakterystyczna dla struktur losowych.

Rozkład rzędnych wierzchołków miejscowych wzniesień jest rozkładem normalnym o wysokim skupieniu $S_{ku} = 3,2785$ i z niewielką dodatnią skośnością $S_{sk} = 0,1113$, co wskazuje na powierzchnię w kształcie zaostrego.

Powierzchnia objęta korozją ma strukturę izotropową losową, świadczy o tym wartość wskaźnika tekstury powierzchni $S_{tr} = 0,7863$ (poziom izotropowości wynosi ok. 78,63%).

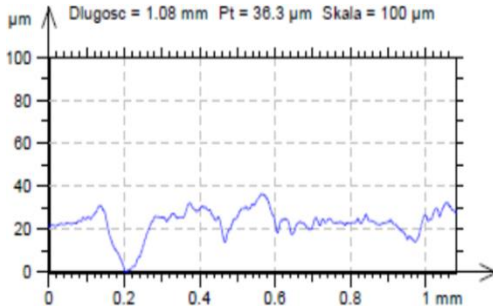
Należy zwrócić uwagę, że gęstość wierzchołków miejscowych wzniesień zmniejszyła się dwukrotnie w porównaniu do powierzchni nieobjętej korozją ($S_{ds} = 640,3 \text{ 1/mm}^2$) oraz na wielkość wymiaru fraktalnego, który jest wysoki i wynosi $S_{fd} = 2,407$.

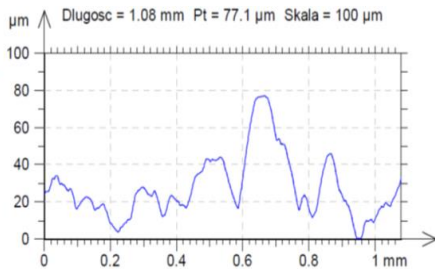
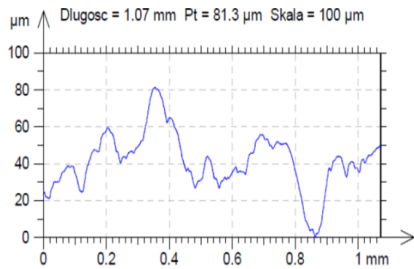
Średniokwadratowe pochylenie nierówności powierzchni wynosi $S_{dq} = 0,6303$, średnia arytmetyczna krzywizna szczytów wynosi $S_{sc} = 108 \text{ 1/mm}$ i rozwinięcie powierzchni wynosi $S_{dr} = 18,29\%$. Parametry te zwiększyły się dwukrotnie, co świadczy o większej chropowatości powierzchni.

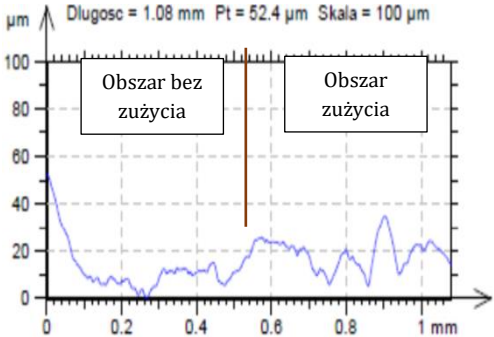
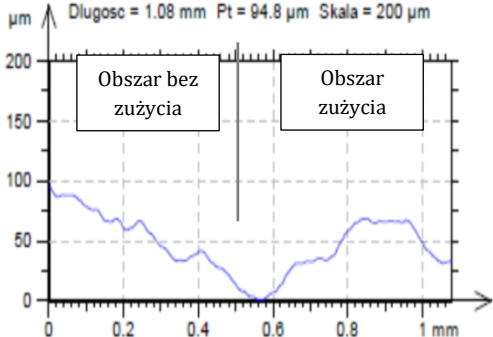
Powierzchnia charakteryzuje się większym wskaźnikiem utrzymania cieczy przez rdzeń ($S_{ci} = 1,553$) i zmniejszającym się współczynnikiem utrzymania cieczy przez doliny ($S_{vi} = 0,1147$) przy zwiększającym się wskaźniku nośności $S_{bi} = 0,45$ w porównaniu do powierzchni nieobjętej korozją.

Tabela 7.4

Profile chropowatości i wartości parametrów 2D powierzchni [μm]

Powierzchnia niezajęta przez zużycie Pomiar 3													
													
Ra	Rz	Rp	Rv	Rc	Rt	Rq							
3,05	16,9	7,16	9,77	9,61	22,3	3,9							

Powierzchnia zajęta przez zużycie Pomiar 1							Powierzchnia zajęta przez zużycie Pomiar 2						
													
Ra	Rz	Rp	Rv	Rc	Rt	Rq	Ra	Rz	Rp	Rv	Rc	Rt	Rq
7,24	30,0	13,2	16,8	20,1	43,7	8,72	6,37	27,4	12,6	14,8	22,1	36,5	7,58

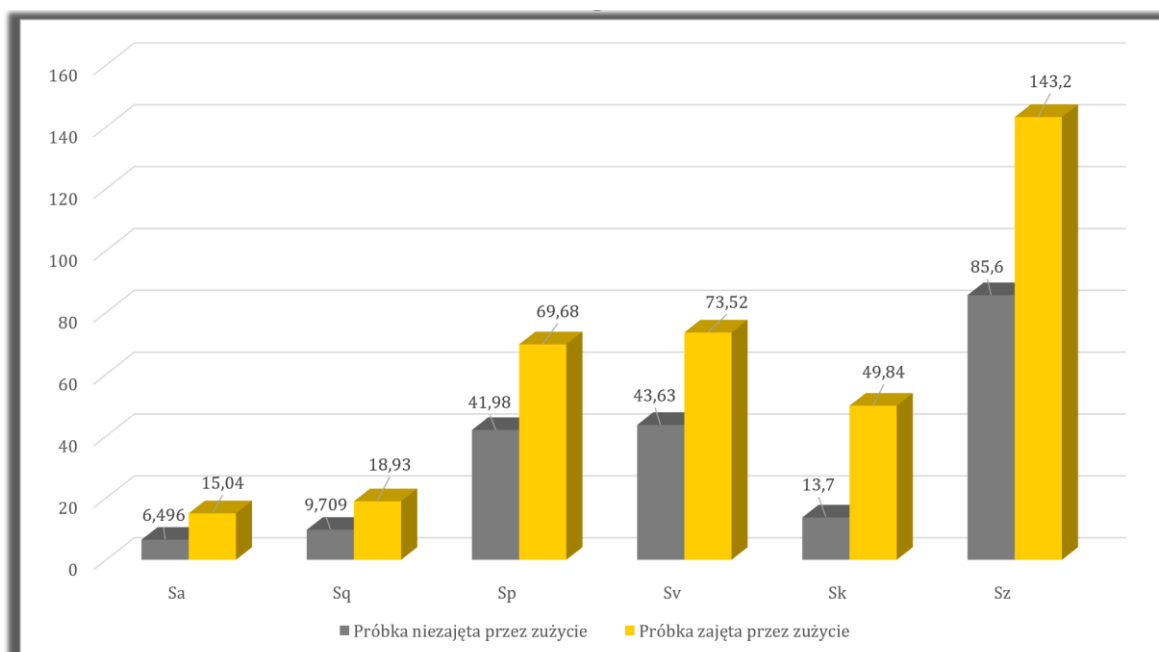
Powierzchnia przejściowa Pomiar 4							Powierzchnia przejściowa Pomiar 5						
													
Ra	Rz	Rp	Rv	Rc	Rt	Rq	Ra	Rz	Rp	Rv	Rc	Rt	Rq
2,59	13,2	4,97	8,21	9,82	26,6	3,19	20,5	94,8	47,6	47,2	-	94,8	23,8

Źródło: opracowanie własne.

Powierzchnia nieobjęta korozją charakteryzuje się najmniejszym wskaźnikiem utrzymania cieczy przez rdzeń w porównaniu do powierzchni nieobjętej korozją. Rozpatrując parametr S_{vk} , czyli parametr charakteryzujący wgłębienia profilu, można dojść do wniosku, że zmiany wartości są minimalne.

Można zatem stwierdzić, że powierzchnia cały czas zachowuje warunki zapewniające utrzymanie cieczy między belką a gumową tulejką drążka stabilizatora, co jest niekorzystne, gdyż sprzyja powstawaniu korozji. Na podstawie zaobserwowanych zmian wartości parametru S_{pk} (zredukowana wysokość wgłębień) można stwierdzić, że następuje intensywne usuwanie największych wzniesień profilu, a udział nośny powierzchni ulega zwiększeniu. Parametr S_{pk} zwiększył się dwukrotnie dla powierzchni objętej korozją.

Uzupełnieniem analizy przestrzennej powierzchni belki były pomiary profilu chropowatości powierzchni 2D. Wykonanie badań było celowe, gdyż chropowatość powierzchni znacząco wpływa na wytrzymałość zmęczeniową elementów (Grzesik, 2015). Wyniki tych pomiarów zestawiono w tabeli 7.4, w której porównano parametry chropowatości dla powierzchni zajętej przez zużycie i powierzchni bez śladów zużycia. Zamieszczono też wartości parametrów dla powierzchni przejściowej, tj. miejsca, w którym stykają się obie powierzchnie. Analizując uzyskane wyniki badań, należy zauważyć znaczny wzrost wszystkich badanych parametrów chropowatości w przypadku powierzchni zajętej przez zużycie w stosunku do powierzchni wolnej od zużycia. Wzrost tych parametrów świadczy o ubytku materiału w wyniku cyklicznego oddziaływania obciążeń, ciągłym wytwarzaniu produktów zużycia w węzle tribologicznym (połączenie belka zawieszenia – drążek stabilizatora), które podczas eksploatacji pojazdu przemieszczają się na całej długości połączenia, powodując zarysowania powierzchni bądź tworzenie mikrowżerów i mikrowytarć. Zjawiska te sprzyjają rozwojowi zużycia frettingowego.



Rysunek 7.25. Porównanie przykładowych parametrów chropowatości powierzchni obszaru zajętego przez zużycie do obszaru niezajętego przez zużycie.

Źródło: opracowanie własne.

Wykres porównujący przykładowe parametry chropowatości powierzchni obszaru zajętego przez zużycie do obszaru niezajętego przez zużycie pokazuje ich prawie dwukrotne zwiększenie na obszarze zajęтым przez zużycie.

Powierzchnia nieobjęta korozją charakteryzuje się najmniejszym wskaźnikiem utrzymania cieczy przez rdzeń w porównaniu do powierzchni objętej korozją. Rozpatrując parametr Svk, czyli parametr charakteryzujący wgłębienia profilu, widzimy, że zmiany wartości są minimalne.

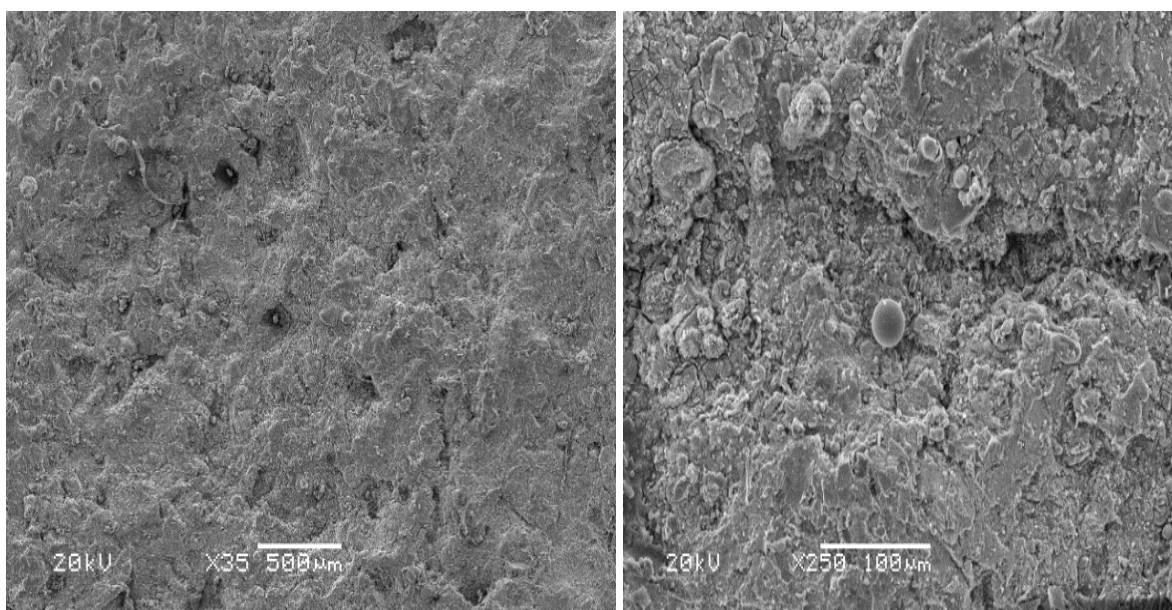
Można więc stwierdzić, że powierzchnia cały czas zachowuje warunki zapewniające utrzymanie cieczy między belką a gumową tulejką drążka stabilizatora, co jest niekorzystne, gdyż sprzyja powstawaniu korozji. Na podstawie zaobserwowanych zmian wartości parametru Spk (zredukowana wysokość wgłębień) można stwierdzić, że następuje intensywne usuwanie największych wzniesień profilu belki, a udział nośny powierzchni ulega zwiększeniu. Parametr Spk zwiększył się prawie dwukrotnie dla powierzchni objętej korozją.

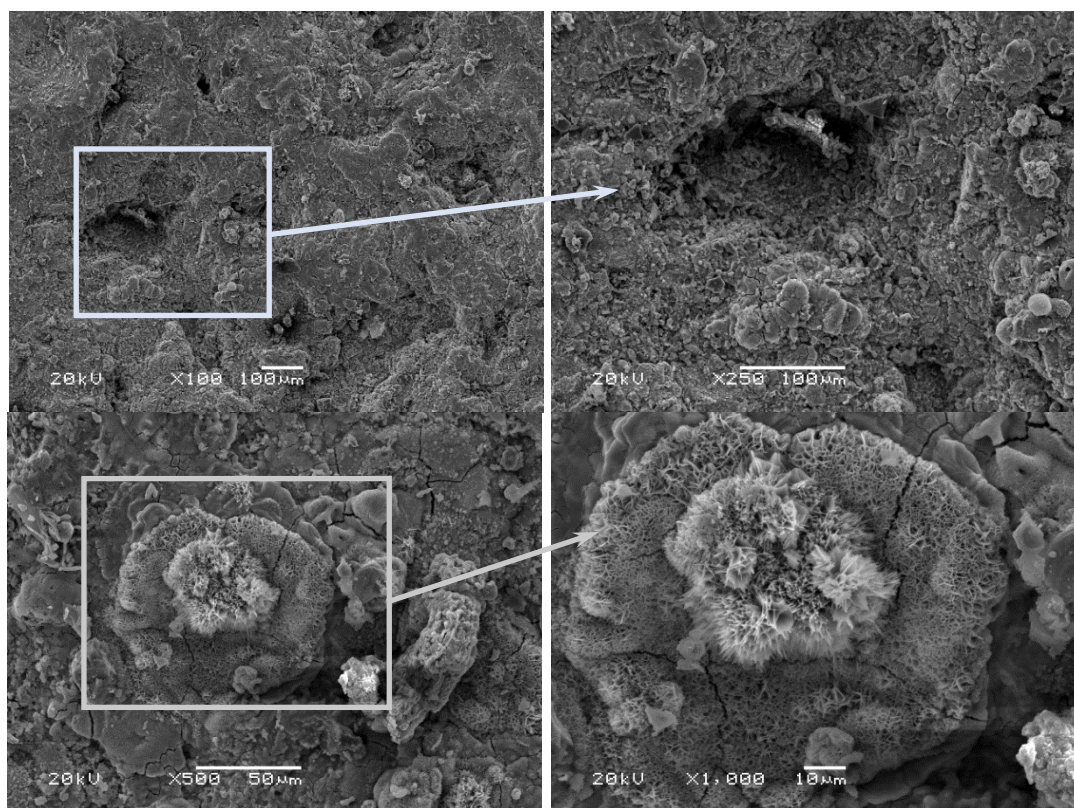
7.2.3. Obserwacje mikroskopowe wraz z analizą EDS

Obserwacjom mikroskopowym poddano miejsca belki, w których podczas obserwacji makroskopowych zaobserwowano uszkodzenia lub zużycia. Zasadnym jest wykonanie badań szczegółowych dla belki ze względu na powtarzający się charakter uszkodzeń dla wszystkich badanych układów zawieszenia. Obok mikroskopowych obserwacji wykonano analizę składu chemicznego zaobserwowanych produktów zużycia w celu oceny ich elementów składowych.

Analiza obrazu zużycia powierzchni belki

Na rysunku 7.26 zaprezentowano przykładowe obrazy z mikroskopu skaningowego, uwidaczniające ślady zużycia powierzchni belki zawieszenia przedniego.





Rysunek 7.26. Topografia powierzchni belki z widocznymi produktami zużycia.
Źródło: opracowanie własne.

Obserwacje mikroskopowe potwierdziły obserwacje makroskopowe sugerujące, że głównym uszkodzeniem belki jest zjawisko korozji lub zużycia frettingowego. Obserwuje się charakterystyczne dla tych rodzajów uszkodzeń zjawiska, takie jak powstawanie pęknięć zmęczeniowych, wżerów korozyjnych czy rys, a także narostów materiałowych. Wymienione zjawiska można obserwować na rysunku 7.26. Widoczne są również produkty korozji.

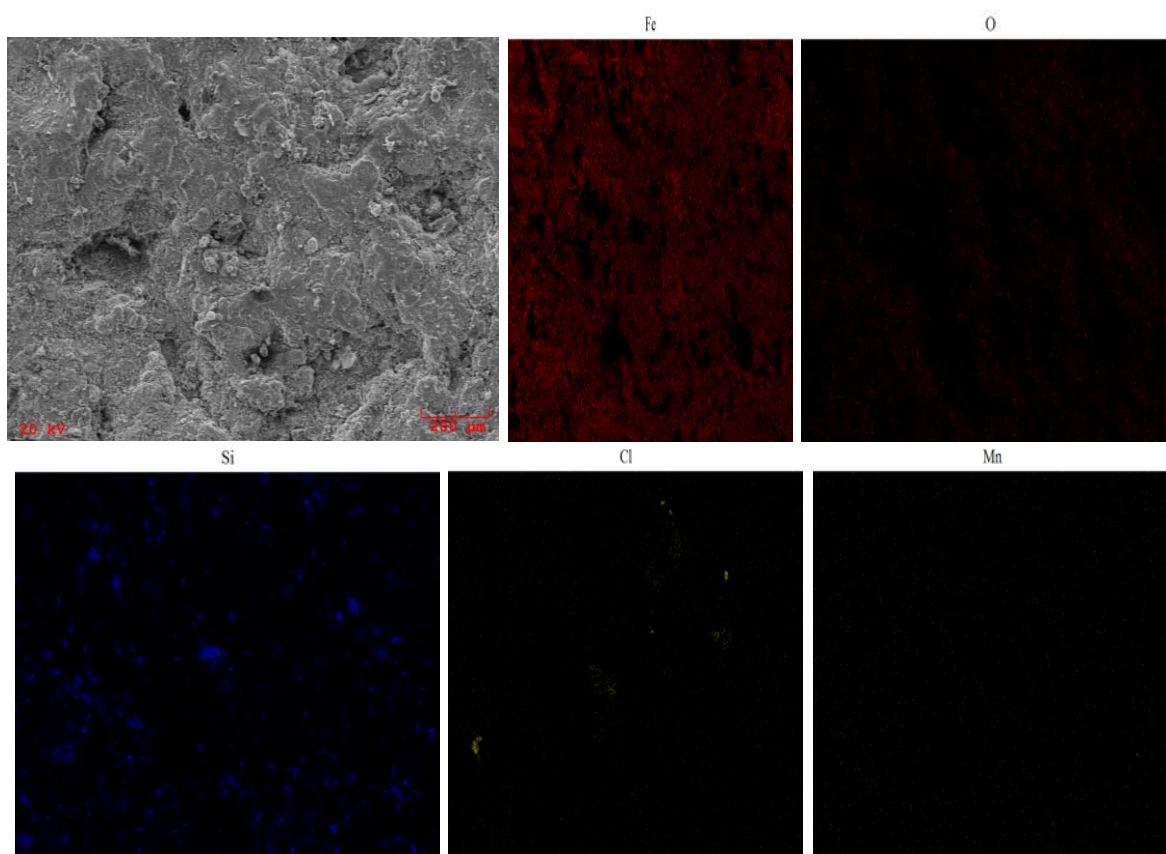
Na podstawie obserwacji makro- i mikroskopowych można zaproponować ewentualny mechanizm rozwoju zużycia frettingowego na powierzchni belki.

W wyniku działania agresywnego środowiska, wynikającego z warunków otoczenia (sól drogowa, woda, kurz itp.), dochodzi do różnych reakcji chemicznych, jak utlenianie powierzchni, co powoduje powstawanie produktów zużycia w postaci szarobrunatnych śladów na powierzchni belki, świadczących o zjawisku korozji. Wspomniane czynniki przedostają się pomiędzy współpracujące elementy poprzez szparę pomiędzy belką a sprężynami, która powstaje w wyniku ugięcia się belki pod wpływem działania sił zewnętrznych pochodzących od masy pojazdu poprzez sprężyny. W wyniku opisanego procesu może dochodzić do inicjacji *fretting corrosion*. Podczas jazdy samochodu z różnymi prędkościami i po różnych nawierzchniach dochodzi do cyklicznych mikroprzemieszczeń pomiędzy współpracującymi elementami, co skutkuje ubytkiem masy warstwy wierzchniej oraz gromadzeniem się produktów zużycia w różnych miejscach belki. Dalsza eksploatacja pojazdu będzie powodowała namnażanie się produktów zużycia i ich przemieszczanie oraz gromadzenie w jednym miejscu lub usuwanie poza obszar styku. Konsekwencją takiego stanu będzie rozwój zjawiska *fretting wear* pomiędzy współpracującymi elementami układu zawieszenia.

Przebieg pojazdu liczony w tysiącach kilometrów w założonych ciągle tych samych warunkach pracy będzie powodował kolejne gromadzenie się produktów zużycia. Będą one generować naprężenia zmęczeniowe, w wyniku których dochodzić będzie do powstawania mikropęknięć. Te z kolei z czasem będą rozwijać się w głąb materiału, powodując w efekcie zjawisko *fretting fatigue*, prowadzące do pęknięcia belki. Jak niebezpieczne jest uszkodzenie elementów powierzchni i jakie niesie to ze sobą konsekwencje, zaprezentowano we wstępie niniejszej pracy.

Analiza składu chemicznego produktów zużycia belki

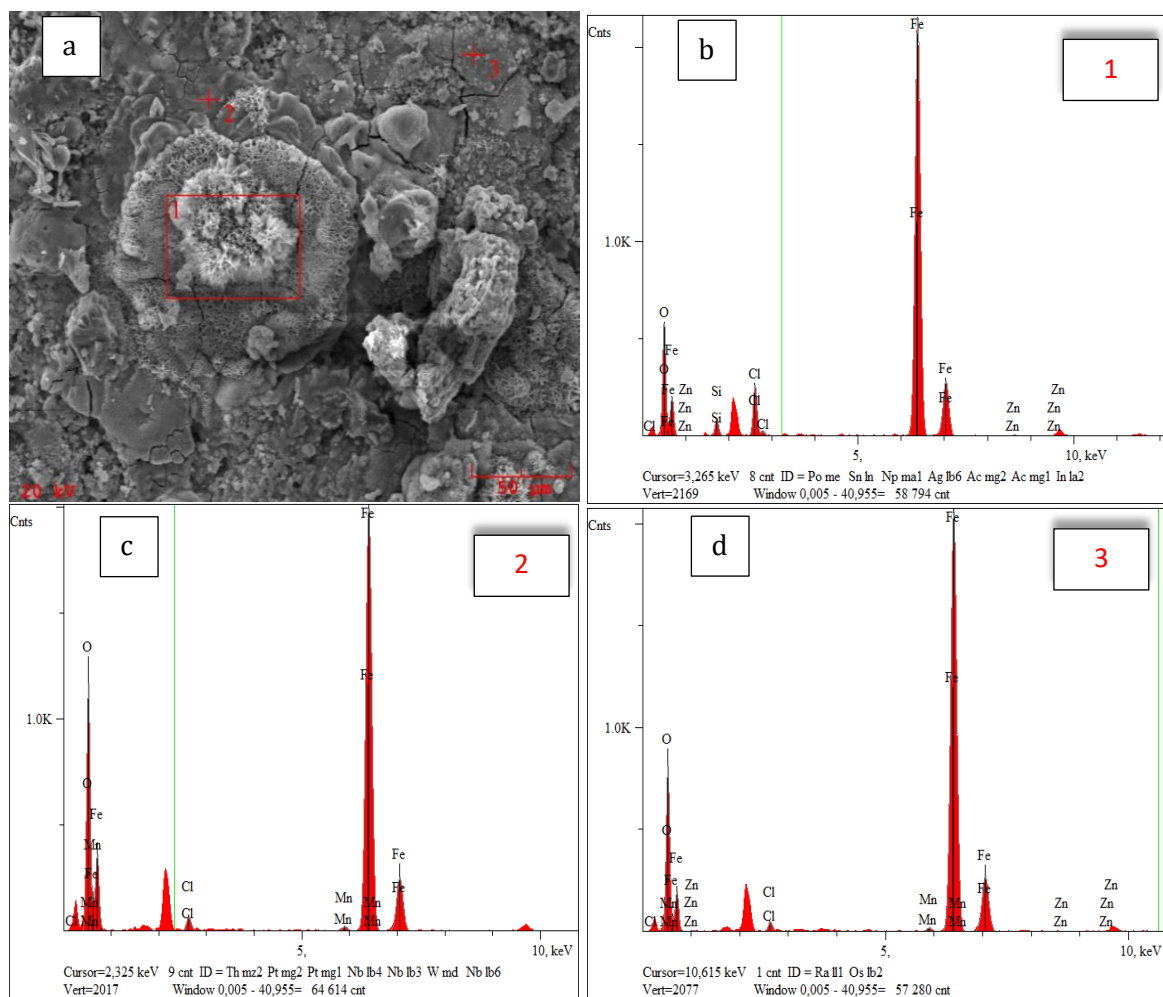
W celu identyfikacji produktów korozji przeprowadzono analizę składu chemicznego w mikroobszarach, z wykorzystaniem technik analiz powierzchniowej, punktowej i liniowej. Badania przeprowadzono w różnych miejscach belki, a wyniki tych analiz zaprezentowano na rysunku 7.27.



Rysunek 7.27. Analiza powierzchniowa pierwiastków.

Źródło: opracowanie własne.

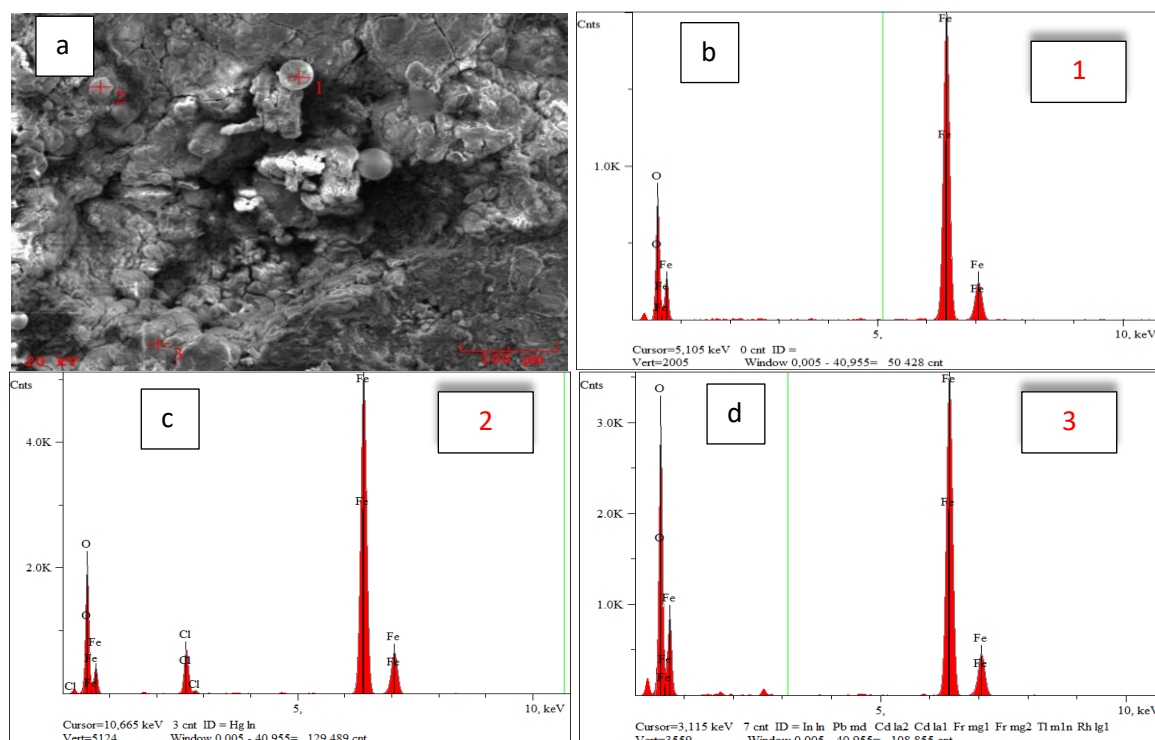
Na rysunkach 7.28 i 7.29 ukazano punktową analizę składu chemicznego dla obszaru belki zawierającego charakterystyczne zużycia dla korozji atmosferycznej lub zużycia frettingowego. Analizę przeprowadzono w trzech miejscach.



Skład chemiczny pierwiastków					
Pierwiastek chemiczny	Linia	Obszar 1	Punkt 2	Punkt 3	Jednostka
Fe	Ka	62,582	77,679	60,096	wt.%
O	Ka	30,688	47,519	38,245	wt.%
Si	Ka	2,166	—	—	wt.%
Cl	Ka	4,086	0,993	0,768	wt.%
Zn	Ka	0,478	—	0,446	wt.%
Mn	Ka	—	0,434	0,603	wt.%

Rysunek 7.28. Punktowa analiza składu chemicznego: a) obraz SEM, b) widmo promieniowania charakterystycznego dla punktu 1, c) widmo promieniowania charakterystycznego dla punktu 2, d) widmo promieniowania charakterystycznego dla punktu 3.

Źródło: opracowanie własne.



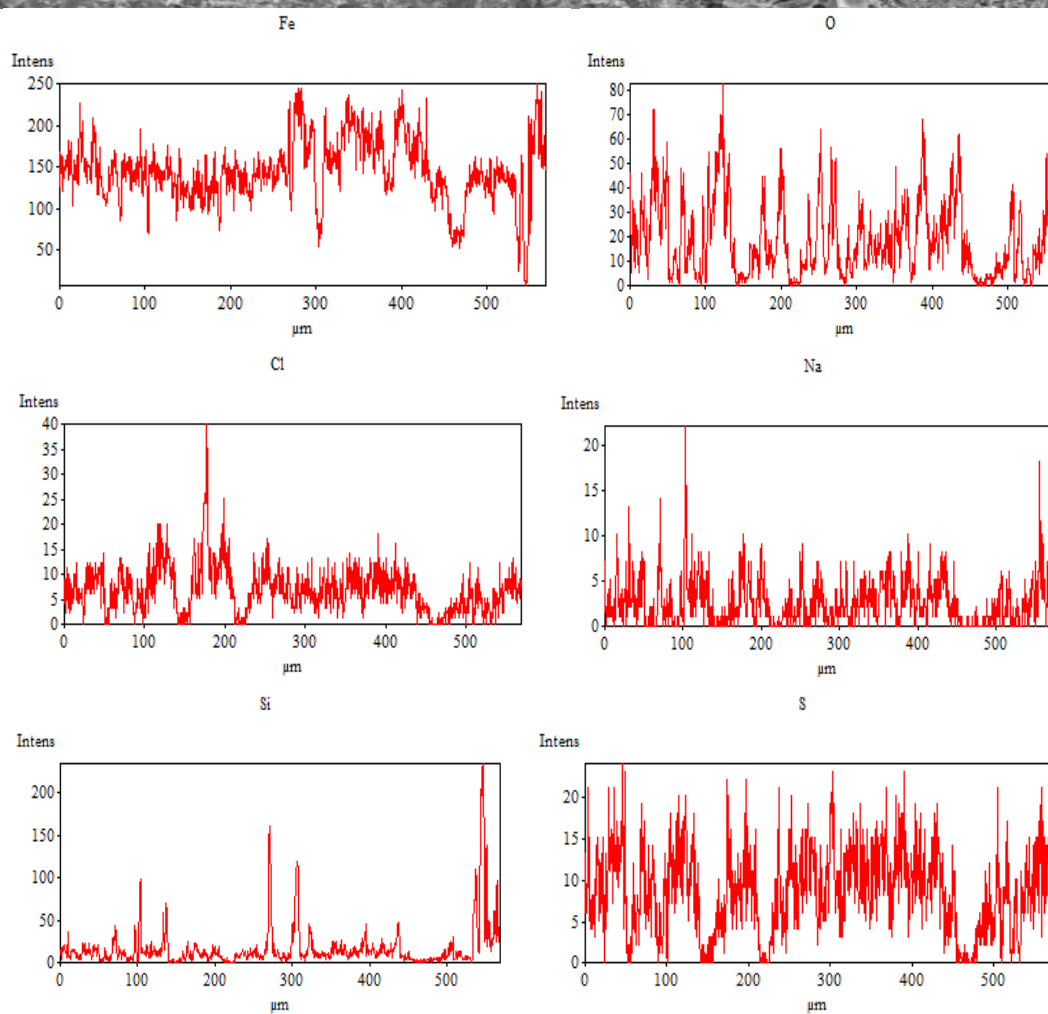
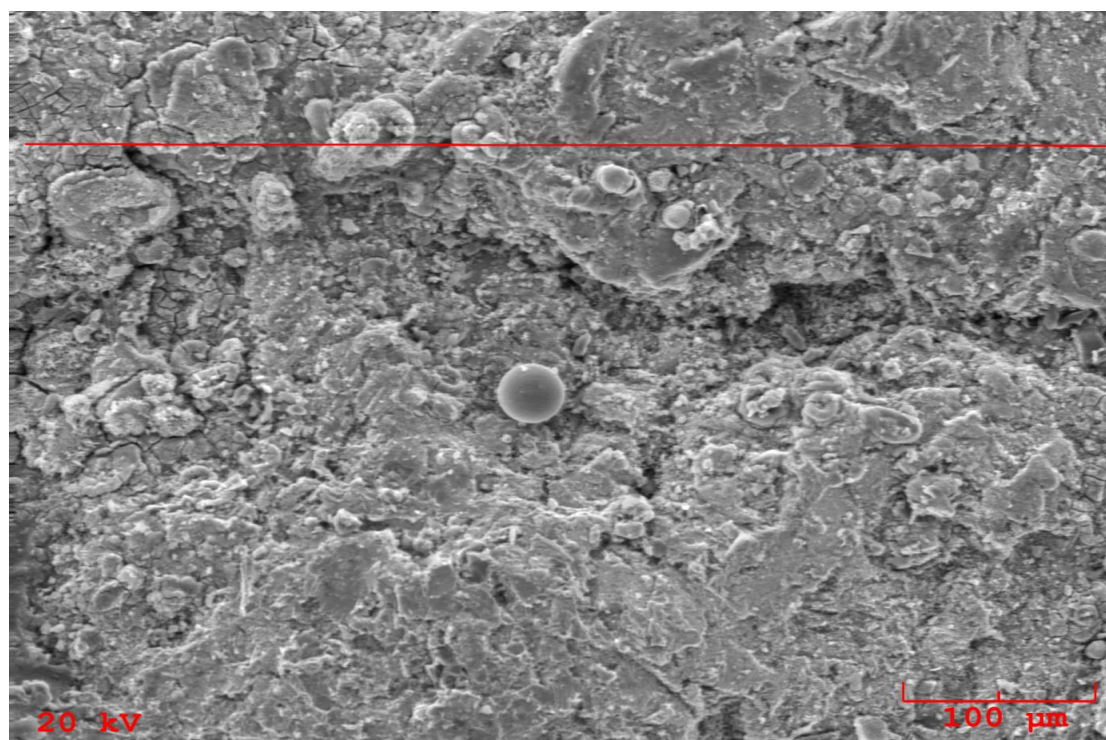
Skład chemiczny pierwiastków					
Pierwiastek chemiczny	Linia	Punkt 1	Punkt 2	Punkt 3	Jednostka
Fe	Ka	61,459	56,352	44,428	wt.%
O	Ka	38,541	39,214	55,572	wt.%
Cl	Ka	—	4,434	—	wt.%

Rysunek 7.29. Punktowa analiza składu chemicznego: a) obraz SEM, b) widmo promieniowania charakterystycznego dla punktu 1, c) widmo promieniowania charakterystycznego dla punktu 2, d) widmo promieniowania charakterystycznego dla punktu 3.

Źródło: opracowanie własne.

Analiza powierzchniowa składu chemicznego produktów zużycia wykazała w głównej mierze obecność takich pierwiastków, jak: żelazo, tlen, krzem, chlor oraz mangan. Analiza punktowa wybranych powierzchni także wykazała obecność tych samych pierwiastków. W składzie chemicznym produktów zużycia dominują atomy żelaza i tlenu. Wynik taki świadczy o przedostawaniu się tlenu pomiędzy powierzchnie współpracujące, prowadząc do utleniania powierzchni i inicjacji zjawiska korozji. W przypadku zużycia frettingowego dominującymi składnikami produktów zużycia również są atomy żelaza i tlenu (Kowalski, 2020; Kowalski, Cygnar, 2019; Kowalski, 2018, 2016). Zatem i w tym przypadku potwierdza się teza, że elementy układu zawieszenia mogą być narażone na rozwój zużycia frettingowego.

Kolejne charakterystyczne pod względem uszkodzeń miejsca poddano ocenie składu chemicznego, a wyniki ukazano na rysunku 7.30. Analizę przeprowadzono wzdłuż zaznaczonej linii.



Rysunek 7.30. Analiza składu chemicznego wzdłuż zaznaczonej linii.

Źródło: opracowanie własne.

Analiza składu chemicznego wykonana metodą wzdłuż linii dla powierzchni belki też w głównej mierze wykazuje obecność atomów żelaza i tlenu. Potwierdza ona wyniki obserwacji makroskopowych, w których stwierdzono brunatne ślady na powierzchni belki, świadczące o rozwoju zjawiska korozji lub zużycia frettingowego.

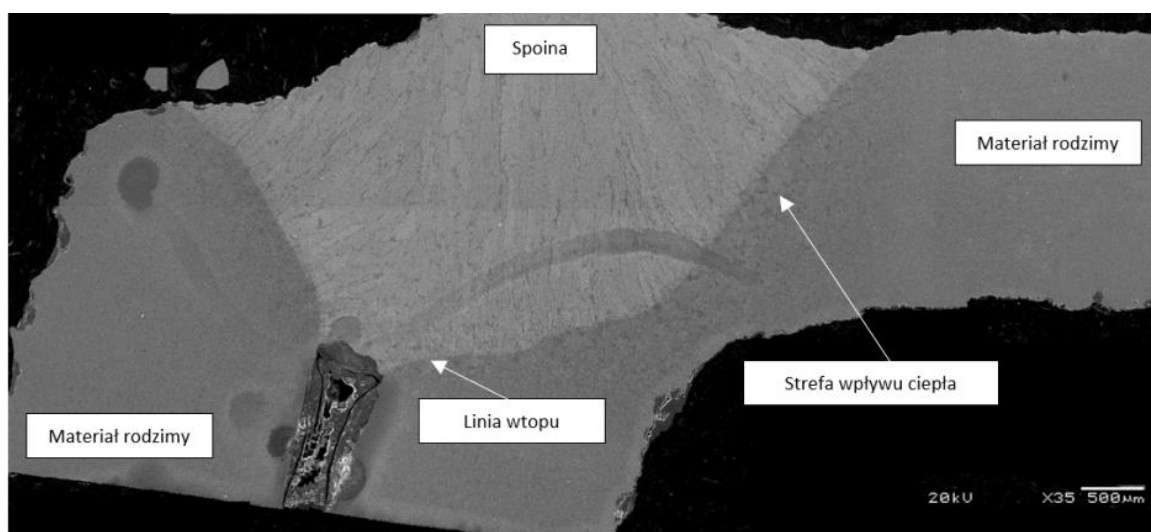
Obok atomów żelaza i tlenu we wszystkich badanych próbkach stwierdzono obecność atomów sodu i jonów chloru. Taki skład chemiczny potwierdza, że pojazdy poruszały się po drogach, których śliskość niwelowana była solą drogową. Podczas ugięcia układu zawieszenia sól obecna na drodze przedostawała się do przestrzeni pomiędzy belką a drążkiem stabilizatora. Sól drogową, która nie zostanie usunięta z tej przestrzeni, przyspiesza proces zużycia korozyjnego.

Analiza składu chemicznego produktów zużycia wykazała również obecność atomów krzemu. Pierwiastek ten świadczy o obecności w przestrzeni pomiędzy belką a drążkiem stabilizatora piasku lub innych zanieczyszczeń drogowych. Dowodzi to faktu, że pojazdy poruszały się po drogach piaszczystych. Uwięzione w przestrzeni pomiędzy współpracującymi elementami ziarna piasku podczas eksploatacji pojazdu przemieszczają się w różnych kierunkach, powodując z czasem rozwój zużycia ściernego, jak i również zarysowania powierzchni w skali mikro, które mogą zainicjować rozwój pęknięć zmęczeniowych.

7.2.4. Ocena stanu technicznego złącza spawanego belki

Analiza wyników obserwacji mikroskopowych

Obserwując liczne uszkodzenia warstwy wierzchniej elementów układu zawieszania, zasadne było przeprowadzenie oceny stanu technicznego spoin łączących poszczególne wytłoczki belki. Warunki pracy, jakim poddane są elementy układu zawieszania, sprawiają, że elementy te są szczególnie narażone na różnego rodzaju uszkodzenia lub zużycia. Takie warunki mogą też powodować przedwczesną destrukcję połączenia spawanego.

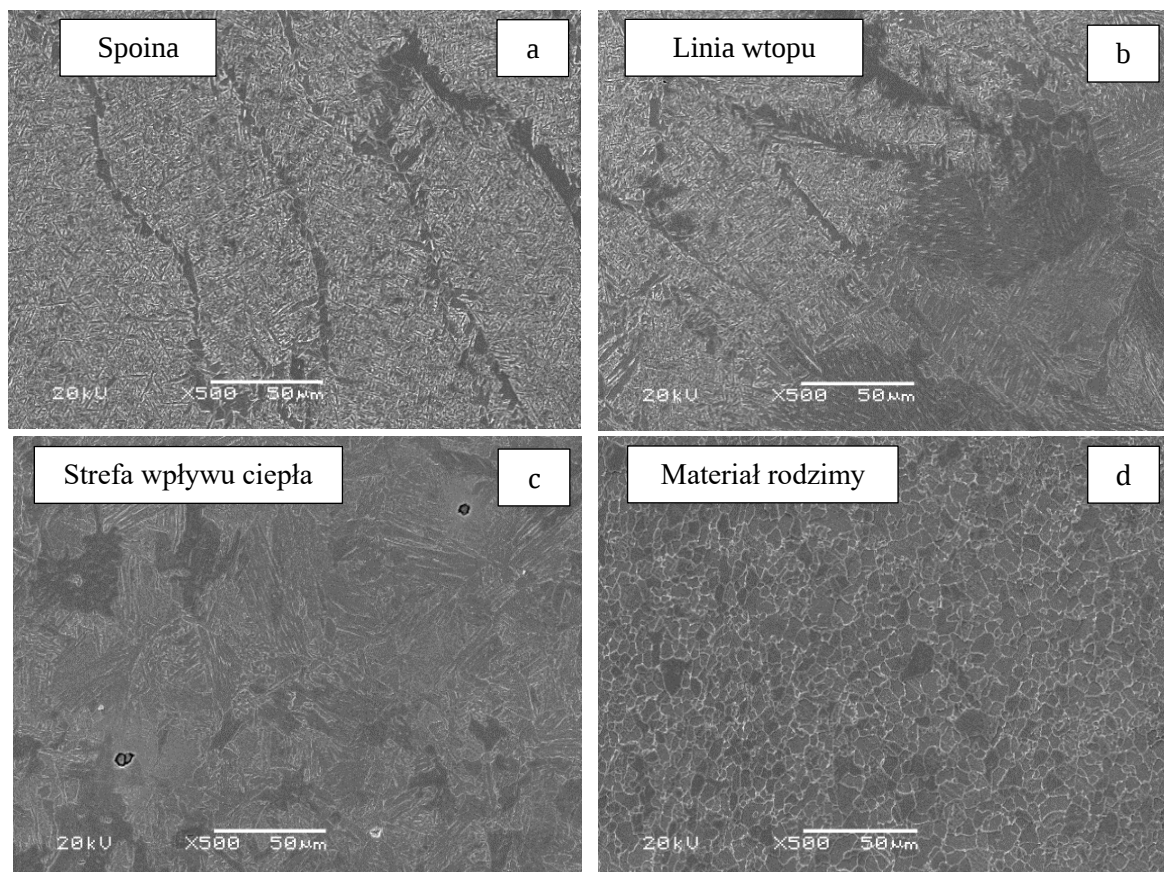


Rysunek 7.31. Obraz złącza spawanego z mikroskopu skaningowego.

Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 7.31 ukazano obraz mikroskopowy złącza spawanego. Obserwuje się wyraźnie zarysowaną spoinę, na której nie zauważono błędów technologicznych ani zniszczeń. Na podstawie przedstawionego obrazu złącza należy stwierdzić, że spoina wykonana została prawidłowo.

Dla głębszej oceny stanu technicznego złącza spawanego przeprowadzono ocenę mikrograficzną poszczególnych stref złącza. Wyniki tych obserwacji przedstawiono na rysunku 7.32.



Rysunek 7.32. Mikrostruktura złącza spawanego.

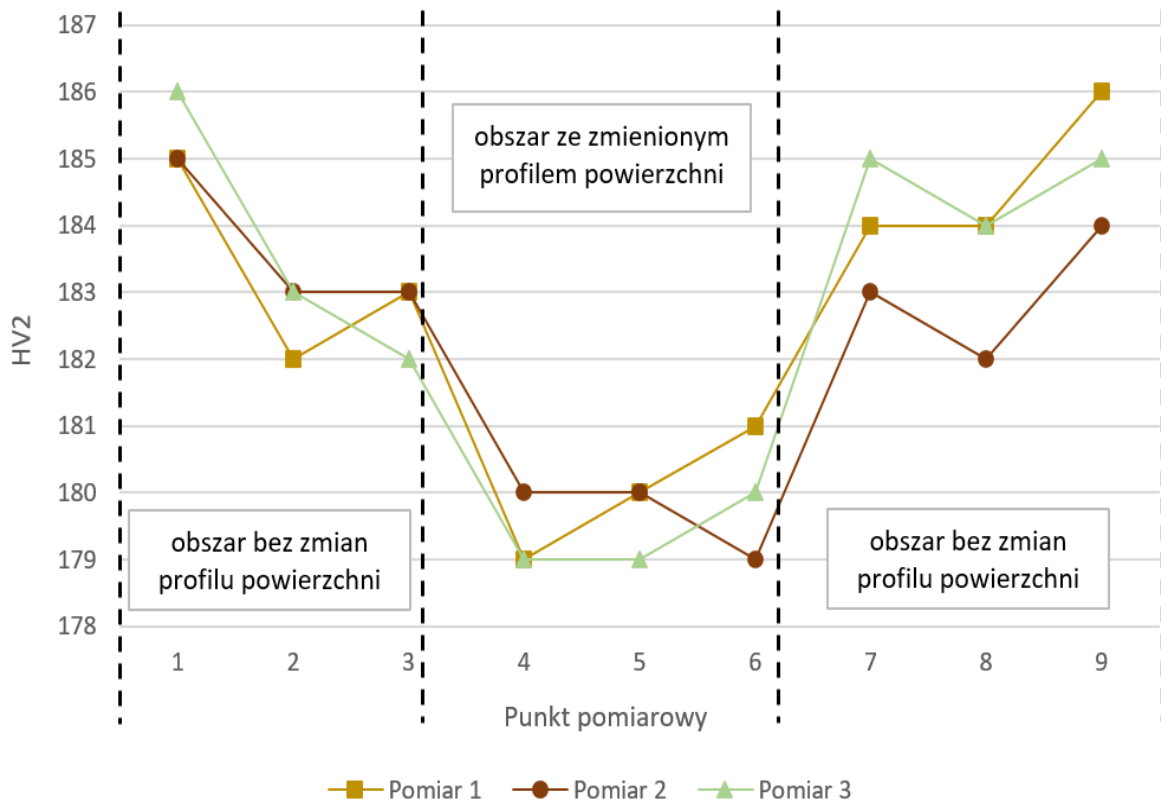
Źródło: opracowanie własne.

Analizując mikrostrukturę w poszczególnych obszarach, można wyciągnąć następujące wnioski. W spoinie stwierdzono występowanie układów dendrytycznych związanych z kierunkowym odprowadzeniem ciepła. Wewnątrz dendrytów stwierdzono obecność struktury o charakterze iglastym, prawdopodobnie martenzyt listwowy, na rysunku 7.32.a stwierdzono obecność wyraźnie zarysowanej linii wtopu, rozgraniczającej spoinę od strefy wpływu ciepła (rysunek 7.32.b). W strefie wpływu ciepła zaobserwowano silny rozrost ziarna ferrytu spowodowany oddziaływaniem temperatury (rysunek 7.32.c). Materiał rodzimy charakteryzował się równo osiowym ziarnem ferrytu, którego średnica nie przekracza $10\ \mu\text{m}$ (rysunek 7.32.d).

Zaobserwowana budowa złącza spawanego jest charakterystyczna dla połączeń uzyskiwanych w trakcie łączenia blach. Nie stwierdzono występowania w złączu spawanym wad w postaci naderwań lub pęknięć zimnych. Mikrostruktura materiału rodzimego charakteryzuje się drobnoziarnistym, równoosiowym ziarnem ferrytu, co świadczy o prawidłowo przeprowadzonej obróbce cieplno-plastycznej.

7.2.5. Twardość powierzchni belki i złącza spawanego

Na rysunku 7.33 zaprezentowano wyniki pomiaru twardości powierzchni belki w zależności od mierzonego miejsca. W ramach jednego badania wykonano pomiar w 9 punktach, obejmujących obszar zarówno bez zużycia, jak również zajęty przez zużycie.

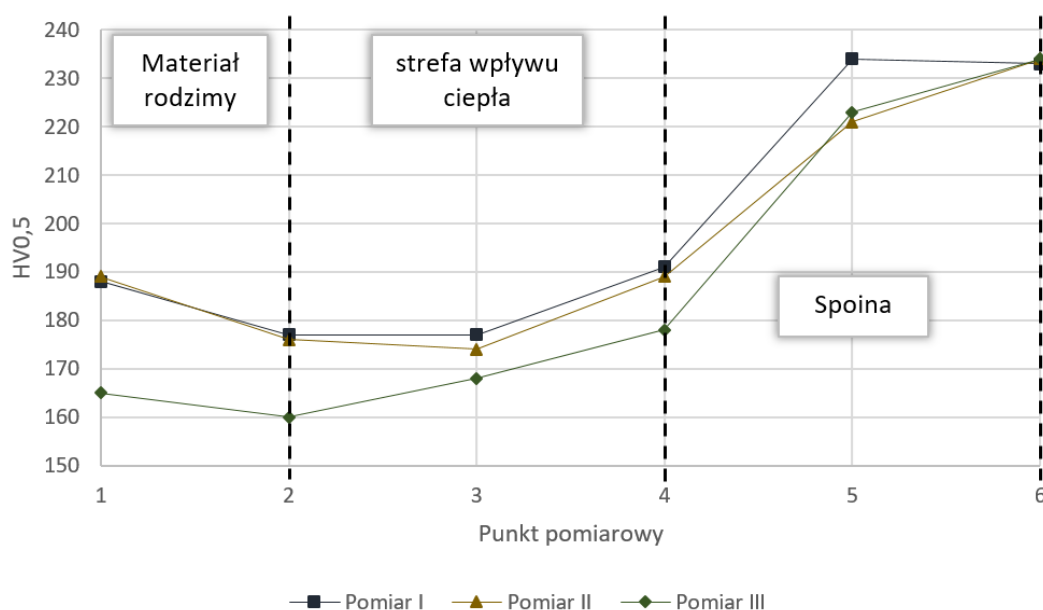


Rysunek 7.33. Wyniki pomiaru twardości belki zawieszenia.
Źródło: opracowanie własne.

Twardość powierzchni belki waha się w zakresie od 179 do 186 HV2. Analizując wyniki pomiaru twardości powierzchni belki, można zauważyć spadek wartości twardości powierzchni w obszarze zajęтым przez zużycie. W obszarze tym twardość powierzchni wynosi 179-181 HV2. Spadek twardości stali może być przyczyną zmniejszenia odporności elementu na zużycie ścierne oraz odkształcenia plastyczne, które sprzyjają procesom adhezyjnym. Czynniki te tworzą odpowiednie środowisko dla rozwoju zużycia frettingowego (Kowalski, 2018, 2020), którego konsekwencją jest rozwój zużycia zmęczeniowego i pęknięcie elementu.

Na rysunku 7.34 zaprezentowano wyniki pomiaru twardości złącza spawanego w różnych strefach. W ramach jednego badania wykonano pomiar w 6 punktach obejmujących zarówno materiał rodzimy, strefę wpływu ciepła, jak i samą spoinę.

Złącze spawane przeznaczone do pomiaru twardości pobrano z belki zamontowanej w pojeździe, który przebył trasę liczącą blisko 100 tys. km.



Rysunek 7. 34. Rozkład twardości złącza spawanego.

Źródło: opracowanie własne.

Analizując rozkład twardości złącza spawanego, można zauważyć, że strefa wpływu ciepła charakteryzuje się najniższymi wartościami twardości. Twardość w tym miejscu waha się w granicy od 160 do 190 HV0,5. Twardość samej spoiny waha się w granicach od 190 do 235 HV0,5.

Na podstawie uzyskanych wyników pomiaru twardości złącza spawanego można stwierdzić, że rozrzut twardości nie jest zbyt duży, zatem złącze zostało wykonane prawidłowo, zgodnie z obowiązującą technologią. Potwierdzeniem tego faktu są również obserwacje makroskopowe, które nie wykazywały żadnych zmian w obrazie.

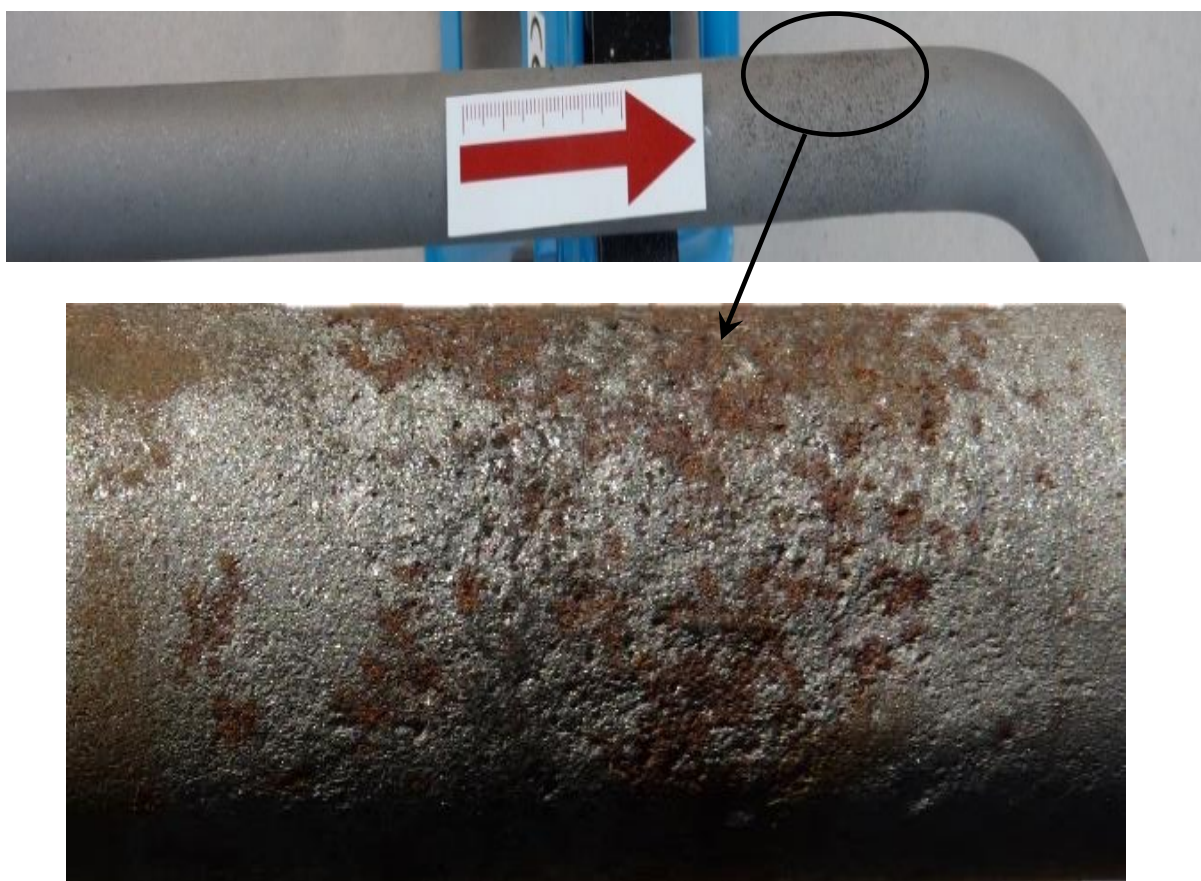
Jak już wcześniej zasygnalizowano, złącze spawane przeznaczone do badań w niniejszej pracy wycięto z belki zawieszenia pojazdu, który eksploatowany był przez ok. 100 tys. kilometrów. Pomimo tak dużego przebiegu w różnych warunkach terenowych i środowiskowych, nie odnotowano żadnych pęknięć oraz odkształceń plastycznych. Można więc wnioskować, że jakość wykonania połączenia jest wysoka, a samo złącze charakteryzuje się odpornością na pękanie oraz ma dużą trwałość i niezawodność.

7.3. Drażek stabilizatora

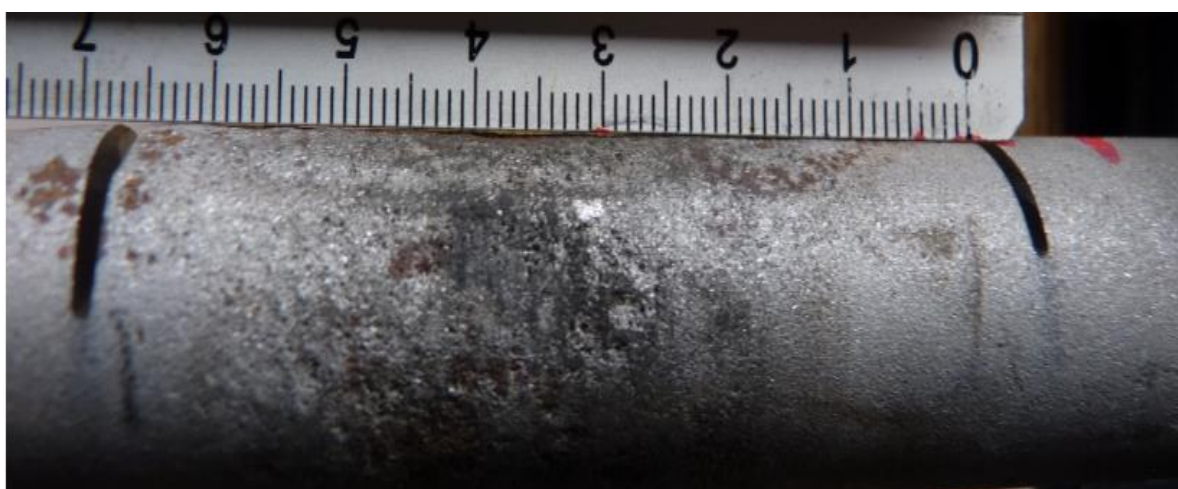
Zużycie drążka stabilizatora obserwuje się głównie w miejscu mocowania do belki podwozia. Zużycie obejmuje cały jego obwód. W ramach badań drążka stabilizatora przeprowadzono obserwacje makroskopowe oraz pomiar parametrów chropowatości.

7.3.1. Obserwacje makroskopowe

Na rysunku 7.35 przedstawiono fragment drążka stabilizatora, gdzie ujawniono jego uszkodzenia w postaci zużycia, na które składają się wżery, ubytki warstwy wierzchniej oraz płaskie miejsca. Uszkodzenia te mogą świadczyć o pojawieniu się zużycia korozyjnego. Obserwowane są również brązowe zabarwienia na powierzchni stabilizatora, co świadczy o przedostawaniu się powietrza atmosferycznego do przestrzeni pomiędzy współpracującymi powierzchniami.



Rysunek 7.35. Ślady zużycia widoczne na drążku stabilizatora.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.36. Obraz makroskopowy zużycia drążka stabilizatora.
Źródło: opracowanie własne.

Najczęściej do uszkodzenia drążka stabilizatora zawieszenia dochodzi w skutek eksploatacji w trudnych warunkach drogowych. Te trudne warunki to przede wszystkim zły stan dróg. Liczne ubytki w asfalcie i koleiny, w które wpadają koła, są przyczyną wielu gwałtownych uderzeń przenoszonych na całe zawieszenie. Wskutek tych uderzeń dochodzi do zużycia, a nawet rozerwania gumowego elementu drążka stabilizatora. Nie bez powodu do tego typu uszkodzenia w przeważających przypadkach dochodzi

w prawej części zawieszenia samochodu, gdyż prawe koła mają najczęstszy kontakt z poboczem, którego nawierzchnia nie zawsze znajduje się w dobrym technicznie stanie. Ponadto na elementy podwoziowe działają czynniki zewnętrzne zanieczyszczeń dróg, które zwiększają się w okresach zimowych stosowaniem materiałów uszorstniających jezdnię. Można wskazywać, że łącznie z procesem starzenia się elementów gumowych na przyspieszony proces ich zużycia wpływają warunki drogowe, które napotyka samochód w czasie eksploatacji.

Na rysunku 7.36 widoczny jest wyraźny ubytek w obwodzie drążka stabilizatora na odcinku jego współpracy z tulejką. Taki charakter zużycia wskazuje, że w czasie eksploatacji doszło do wytarcia tulejki, co wywołało pojawienie się niepożądanego luzu. Eksploatacja pojazdu w takim stanie (bez podjęcia jego naprawy) wywołała powiększenie się luzu. Podczas ruchów zawieszenia drążek stabilizatora luźno poruszał się w tulejce, wywołując powiększenie procesu zużycia drążka. Opisana awaryjna praca tych elementów przeniosła się na zwiększony proces tarcia pomiędzy belką zawieszenia a podstawą gumowej tulejki. Ocenia się, że również w tym miejscu powstał ponadnormatywny luz ułatwiający przedostanie się w przestrzeń przylegania tulejki do belki niekorzystnych elementów środowiska ruchu, tj. wody, zanieczyszczeń, a w okresach zimowych materiałów uszorstniających jezdnię oraz soli, które wpłynęły na przyspieszenie zużycia badanych elementów.

7.3.2. Ocena topografii powierzchni

Powierzchnia niezajęta przez zużycie – pomiar 1a

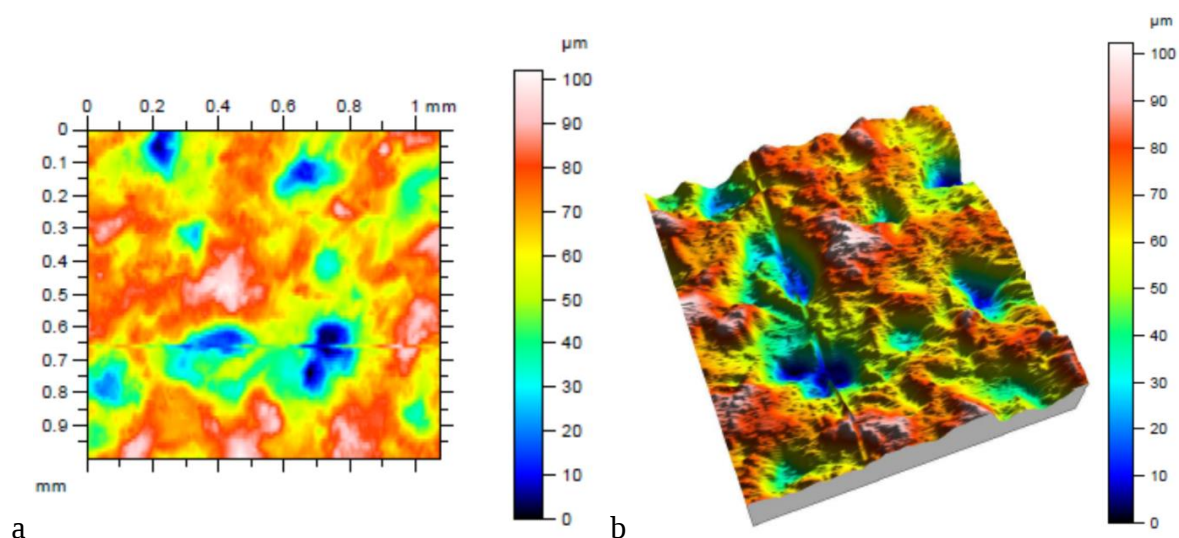
W tabeli 7.5 przedstawiono parametry SGP dla pomiaru 1a (obszar nieobjęty korozją). Na rysunkach 7.37-7.42 przedstawiono wyniki pomiaru topografii powierzchni, na które składają się: mapy warstwiczne powierzchni, krzywa Abbotta-Firestone'a, analiza graficzna parametrów S_k i stopień izotropowości powierzchni.

Tabela 7.5

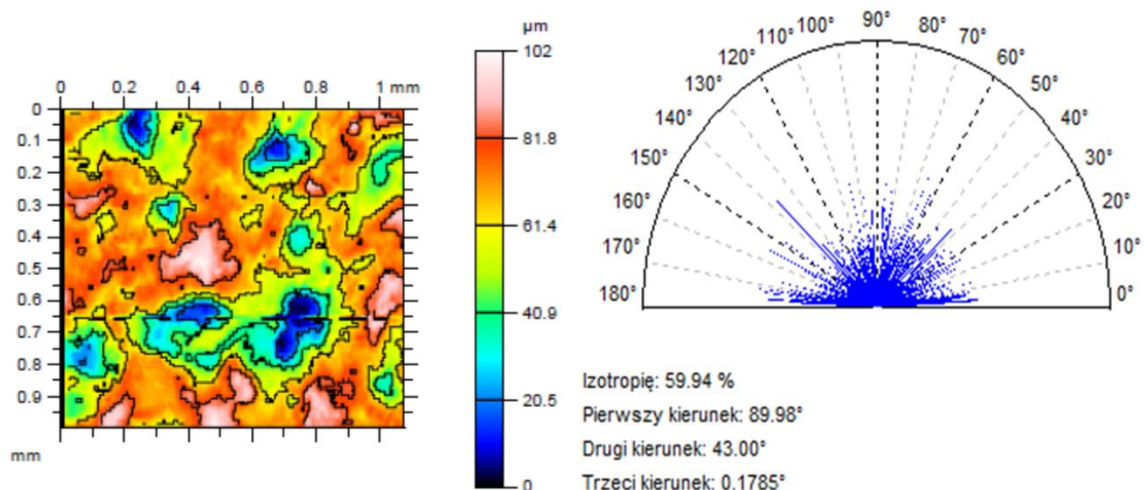
Parametry SGP – pomiar 1a

Amplitudowe	Przestrzenne	Hybrydowe	Funkcyjne	S_k
$S_a = 13,96 \mu m$	$S_{tr} = 0,5994$	$S_{dq} = 0,5640$	$S_{bi} = 1,207$	$S_k = 37,70 \mu m$
$S_q = 17,66 \mu m$	$S_{td} = 176,2$	$S_{ds} = 735,2 \text{ 1/mm}^2$	$S_{ci} = 1,222$	$S_{pk} = 9,427 \mu m$
$S_p = 38,82 \mu m$	$S_{al} = 0,1034 \text{ mm}$	$S_{sc} = 109,2 \text{ 1/mm}$	$S_{vi} = 0,1582$	$S_{vk} = 27,02 \mu m$
$S_v = 63,06 \mu m$		$S_{dr} = 14,69 \%$		
$S_{sk} = -0,8017$		$S_{fd} = 2,357$		
$S_{ku} = 3,464$				
$S_z = 101,9 \mu m$				

Źródło: opracowanie własne.

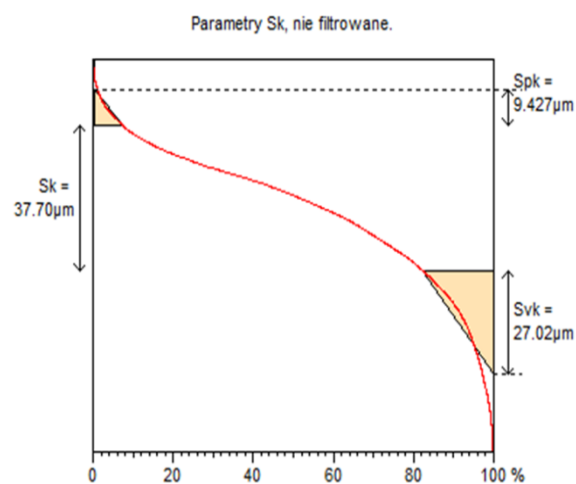


Rysunek 7.37. Pomiar chropowatości, filtr gaussowski, cut-off 0,8 mm, a) obraz 2D, b) obraz 3D.

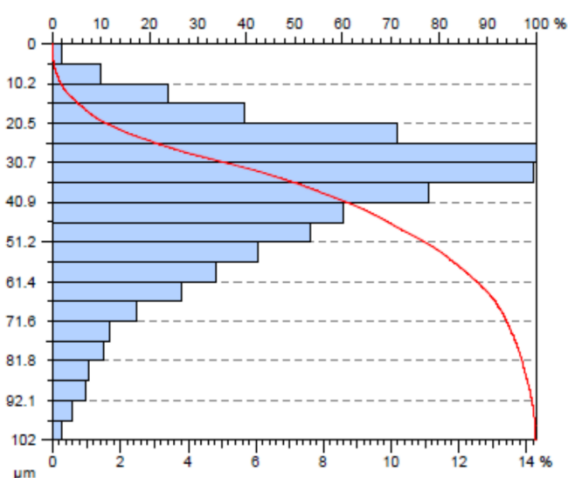


Rysunek 7.38. Wykres warstwiczny.
Źródło: opracowanie własne.

Rysunek 7.39. Kierunek struktury powierzchni.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.40. Analiza graficzna parametrów Sk.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.41. Krzywa Abbotta-Firestone'a.
Źródło: opracowanie własne.

Jak już wcześniej wspomniano, chropowatość powierzchni osłabia odporność korozyjną wskutek zwiększenia rzeczywistej powierzchni styku korodującego elementu. Z tego też względu największy wpływ na intensywność zużycia korozyjnego mają wysokościowe parametry chropowatości powierzchni i promień krzywizny wgłębień mikronierówności. Wpływ na zwiększenie intensywności zużycia ma wzrost chropowatości i to zwiększona powierzchnia oddziaływania ma wpływ na wzrost intensywności zużycia. Natomiast wskazywane parametry są miarą zwiększenia chropowatości i faktycznie mogą być skorelowane z wielkością zużycia.

Analizując powyższe wartości parametrów dla powierzchni niezajętej przez zużycie, można zauważyć, że maksymalna wysokość powierzchni S_z wynosi $101,9\ \mu\text{m}$, średnia arytmetyczna wysokość powierzchni $S_a = 13,96\ \mu\text{m}$, maksymalna wysokość piku powierzchni $S_p = 38,82\ \mu\text{m}$, maksymalna wysokość wgłębienia powierzchni $S_v = 63,06\ \mu\text{m}$ oraz wysokość średniokwadratowa powierzchni $S_q = 17,66\ \mu\text{m}$.

Dość szybkie zanikanie funkcji ACF ($S_{al} = 0,1034\ \text{mm}$) świadczy o dominującym udziale składowej losowej w SGP. Rozkład rzędnych wierzchołków miejscowych wzniesień jest rozkładem normalnym o skupieniu $S_{ku} = 3,464$ i niewielką ujemną skośnością $S_{sk} = -0,8017$, co wskazuje na powierzchnię w kształcie płaskowyżowym.

Powierzchnia nieobjęta korozją ma strukturę zbliżoną do izotropowej losową, świadczy o tym wartość wskaźnika tekstury powierzchni $S_{tr} = 0,5994$ (poziom izotropowości wynosi $59,94\%$).

Zwraca uwagę dość duża gęstość wierzchołków miejscowych wzniesień ($S_{ds} = 735,2\ 1/\text{mm}^2$) i duży wymiar fraktalny ($S_{fd} = 2,357$). Wartości średniokwadratowego pochylenia nierówności powierzchni $S_{dq} = 0,564$, średniej arytmetycznej krzywizny szczytów $S_{sc} = 109,2\ 1/\text{mm}$ oraz rozwinięcie powierzchni $S_{dr} = 14,69\%$ świadczą o chropowatej powierzchni.

Powierzchnia charakteryzuje się najmniejszym wskaźnikiem utrzymania cieczy przez rdzeń ($S_{ci} = 1,222$) i największym współczynnikiem utrzymania cieczy przez doliny ($S_{vi} = 0,1582$) przy wskaźniku nośności $S_{bi} = 1,207$ w porównaniu do powierzchni objętych korozją.

Powierzchnia zajęta przez zużycie – pomiar 2a

W tabeli 7.6 przedstawiono parametry SGP dla pomiaru 2a (obszar zajęty przez zużycie). Na rysunkach 7.42-7.46 ukazano wyniki pomiaru topografii powierzchni, na które składają się: mapy warstwiczne powierzchni, krzywa Abbotta-Firestone'a, analiza graficzna parametrów S_k oraz stopień izotropowości powierzchni.

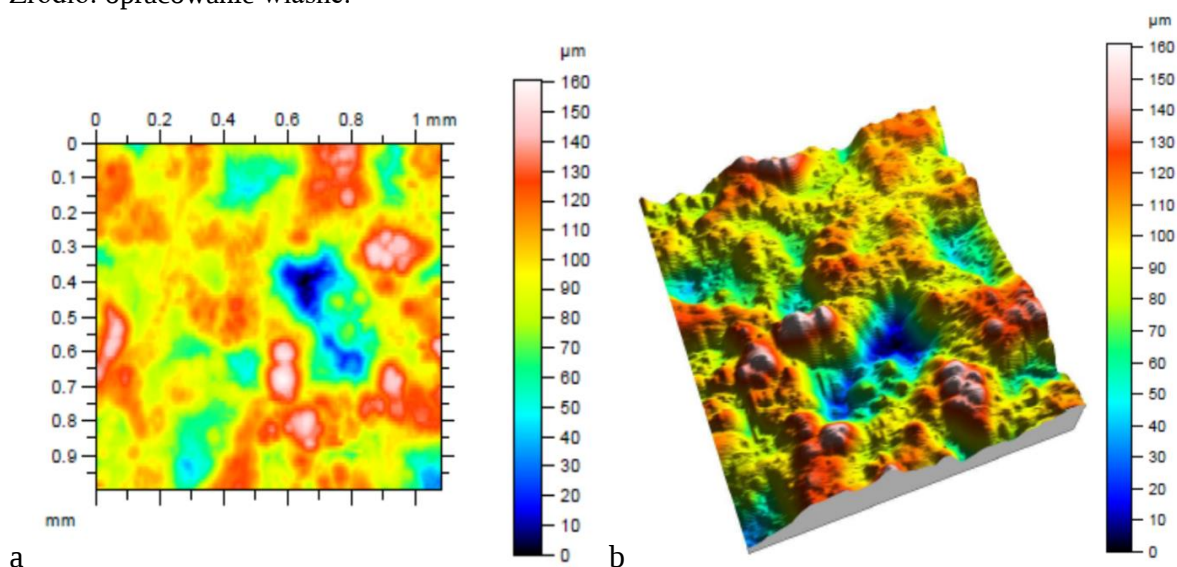
Analizując wartości parametrów wysokościowych dla powierzchni objętej korozją, można zauważyć, że maksymalna wysokość powierzchni S_z wynosi $159,0\ \mu\text{m}$, średnia arytmetyczna wysokość powierzchni $S_a = 24,41\ \mu\text{m}$, maksymalna wysokość piku powierzchni $S_p = 65,70\ \mu\text{m}$, maksymalna wysokość wgłębienia powierzchni $S_v = 93,30\ \mu\text{m}$ i wysokość średniokwadratowa powierzchni $S_q = 24,41\ \mu\text{m}$. Wszystkie parametry wysokościowe zwiększyły swoją wartość w porównaniu z powierzchnią nieobjętą korozją.

Tabela 7.6

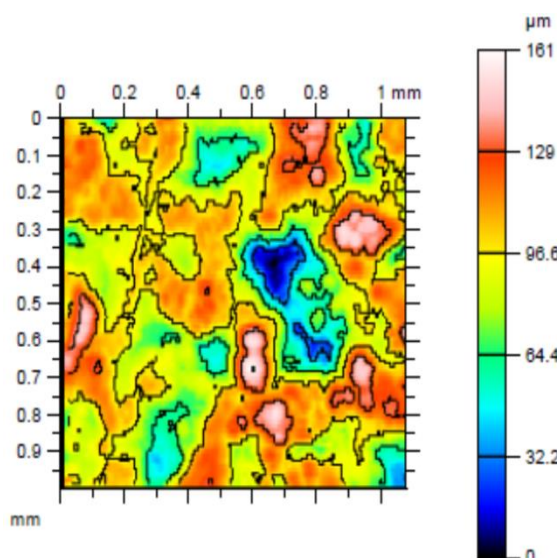
Parametry SGP – pomiar 2a

Amplitudowe	Przestrzenne	Hybrydowe	Funkcyjne	Sk
Sa = 18,73 μm	Str = 0,7584	Sdq = 0,7176	Sbi = 0,8598	Sk = 54,85 μm
Sq = 24,41 μm	Std = 70,51	Sds = 555,2 1/mm ²	Sci = 1,388	Spk = 19,58 μm
Sp = 65,70 μm	Sal = 0,1085 mm	Ssc = 113,6 1/mm	Svi = 0,1563	Svk = 34,04 μm
Sv = 93,30 μm		Sdr = 23,41 %		
Ssk = -0,5596		Sfd = 2,387		
Sku = 3,671				
Sz = 159,0 μm				

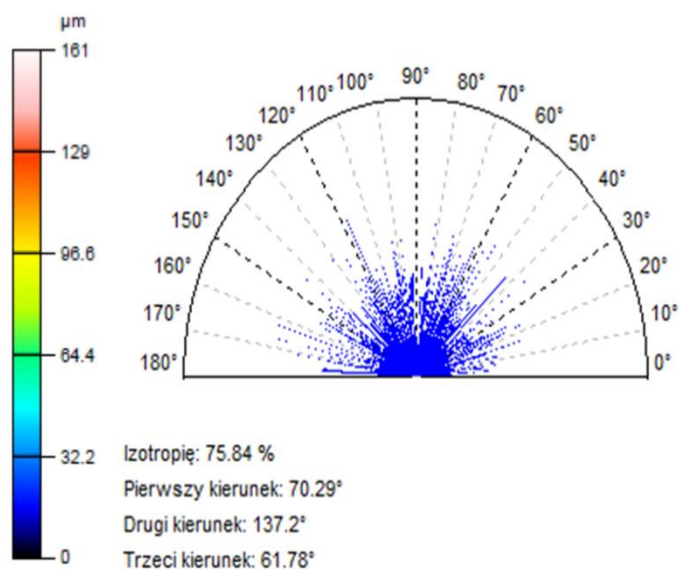
Źródło: opracowanie własne.



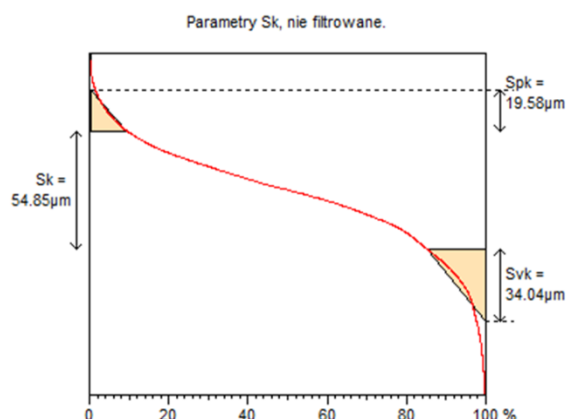
Rysunek 7.42. Pomiar chropowatości, filtr gaussowski, cut-off 0,8 mm: a) obraz 2D, b) obraz 3D.
Źródło: opracowanie własne.



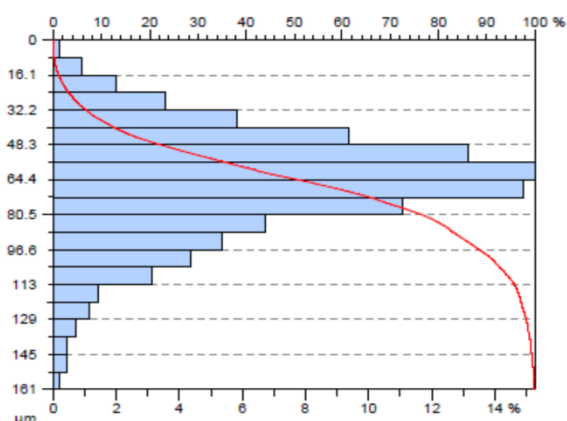
Rysunek 7.43. Wykres warstwicowy.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.44. Kierunek struktury powierzchni.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.45. Analiza graficzna parametrów Sk.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.46. Krzywa Abbotta-Firestone'a.
Źródło: opracowanie własne.

Szybko zanikająca funkcja autokorelacji ($S_{al} = 0,1085$ mm) jest typowa dla struktur losowych. Rozkłady rzędnych wierzchołków miejscowych wzniesień są rozkładami normalnymi o skupieniu $S_{ku} = 3,671$ i z niewielką ujemną skośnością $S_{sk} = -0,5596$, co wskazuje na powierzchnię w kształcie płaskowyżowym.

Powierzchnia objęta korozją ma strukturę zbliżoną do izotropowej losowej, o czym świadczy wartość wskaźnika tekstury powierzchni $S_{tr} = 0,7584$ (poziom izotropowości wynosi 75,84%).

Gęstość wierzchołków miejscowych wzniesień zmniejszyła się w porównaniu do powierzchni nieobjętej korozją ($S_{ds} = 555,2$ 1/mm²). Obserwowany jest także duży wymiar fraktalny ($S_{fd} = 2,387$).

Średniokwadratowe pochylenie nierówności powierzchni wynosi $S_{dq} = 0,7176$, średnia arytmetyczna krzywizna szczytów $S_{sc} = 113,6$ 1/mm i rozwinięcie powierzchni $S_{dr} = 23,41\%$, które uległo zwiększeniu, co świadczy o większej chropowatości powierzchni.

Powierzchnia charakteryzuje się większym wskaźnikiem utrzymania cieczy przez rdzeń ($S_{ci} = 1,388$) i takim samym współczynnikiem utrzymania cieczy przez doliny ($S_{vi} = 0,1563$) przy zmniejszającym się wskaźniku nośności $S_{bi} = 0,8598$ w porównaniu do powierzchni nieobjętej korozją.

Analizując wartości parametrów wysokościowych powierzchni drążka stabilizatora dla powierzchni nieobjętej korozją (pomiar 1a) i obszaru objętego korozją (pomiar 2a), można zauważyć, że wszystkie parametry wysokościowe zwiększyły swoją wartość w porównaniu z powierzchnią nieobjętą korozją. Wszystkie struktury miały charakter losowy, o czym świadczyła zanikająca funkcja autokorelacji. Rozkłady rzędnych wierzchołków miejscowych wzniesień dla wszystkich analizowanych powierzchni są rozkładami normalnymi o podobnym współczynniku skupienia S_{ku} i z niewielką ujemną skośnością S_{sk} , co wskazuje na powierzchnie w kształcie płaskowyżowym.

Wszystkie powierzchnie mają strukturę zbliżoną do izotropowej losowej, o czym świadczy wartość wskaźnika tekstury powierzchni S_{tr} . Gęstość wierzchołków miejscowych wzniesień zmniejszyła się w porównaniu do powierzchni nieobjętej korozją (S_{ds}), duży wymiar fraktalny i rozwinięcie powierzchni $S_{dr} = 23,41\%$, które zwiększyło się w porównaniu do powierzchni nieobjętej korozją, świadczą o większej chropowatości powierzchni.

Powierzchnia nieobjęta korozją odznacza się najmniejszym wskaźnikiem utrzymania cieczy przez rdzeń i największym współczynnikiem utrzymania cieczy przez doliny przy zwiększającym się wskaźniku nośności w porównaniu do powierzchni objętej korozją.

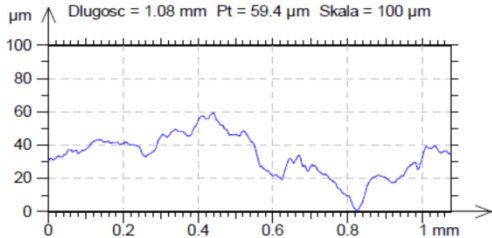
Rozpatrując parametr S_{vk} , czyli parametr charakteryzujący wgłębienia profilu, można zauważyć, że zmiany wartości są zauważalne. Parametr ten zwiększa się w przypadku powierzchni objętej korozją i w obszarze przejściowym. Można więc stwierdzić, że powierzchnia objęta korozją ma inne warunki zapewniające utrzymanie cieczy pomiędzy belką a drążkiem stabilizatora, co jest niekorzystne, gdyż sprzyja powstawaniu korozji.

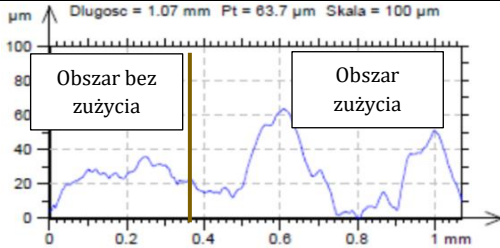
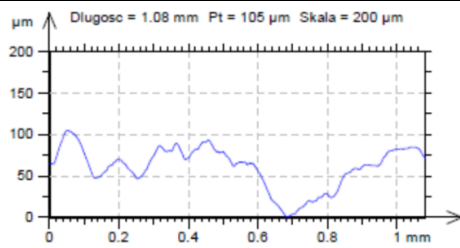
Na podstawie zaobserwowanych zmian wartości parametru S_{pk} (zredukowana wysokość wgłębień) można stwierdzić, że następuje intensywne usuwanie największych wzniesień profilu, a udział nośny powierzchni ulega zwiększeniu. Parametr S_{pk} zwiększył się dwukrotnie dla powierzchni objętej korozją.

Uzupełnieniem analizy przestrzennej powierzchni drążka stabilizatora były pomiary profilu chropowatości powierzchni 2D. Wykonanie badań było celowe, gdyż chropowatość powierzchni znacząco wpływa na wytrzymałość zmęczeniową elementów (Grzesik, 2015; Niemczewska-Wójcik, Piekoszewski, 2017). Wyniki tych pomiarów zestawiono w tabeli 7.7, w której porównano parametry chropowatości dla powierzchni zajętej przez zużycie i powierzchni bez śladów zużycia. Zamieszczono też wartości parametrów dla powierzchni przejściowej, tj. miejsca, w którym kończy się obszar zajęty przez zużycie, a zaczyna obszar wolny od zużycia.

Tabela 7.7

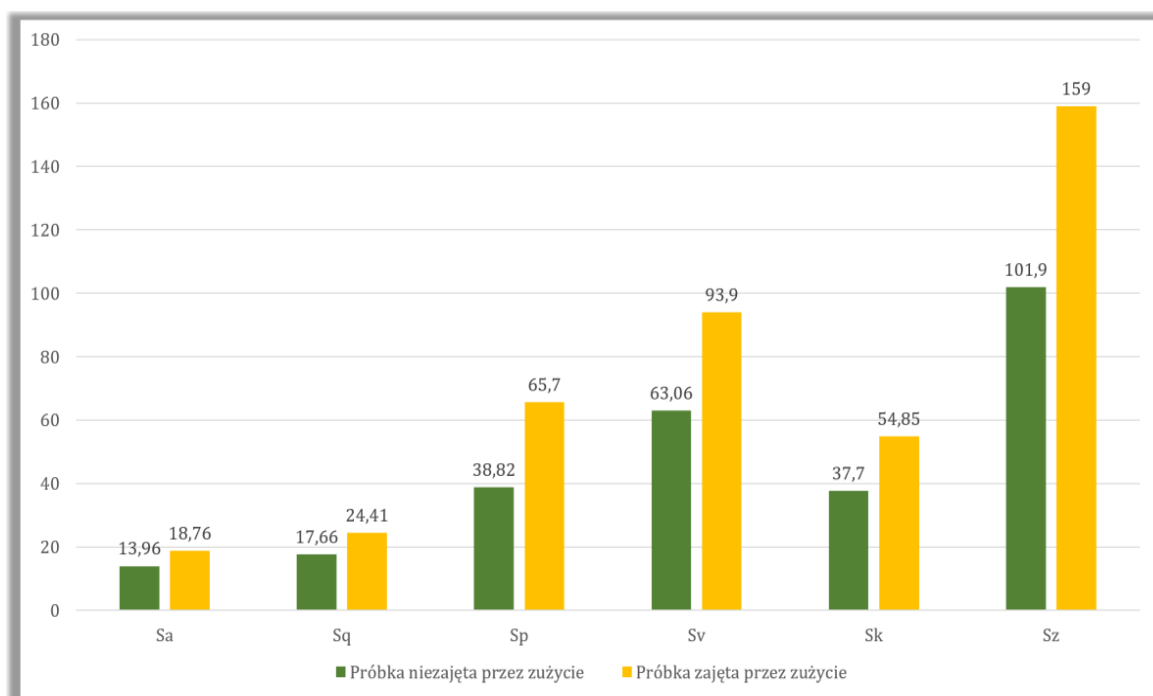
Profile chropowatości i wartości parametrów 2D powierzchni [μm]

Powierzchnia niezajęta przez zużycie Pomiar 1a						
						
Ra	Rz	Rp	Rv	Rc	Rt	Rq
3,25	15,1	6,05	9,06	12,0	19,8	3,99

Powierzchnia przejściowa pomiędzy strefą zużycia i strefą z brakiem zużycia	Powierzchnia zajęta przez zużycie Pomiar 2a					
						
Ra	Rz	Rp	Rv	Rc	Rt	Rq
6,21	25,9	10,6	15,3	19,1	32,3	7,54

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie zaprezentowanych wyników parametrów chropowatości powierzchni można zaobserwować wzrost wszystkich zmierzonych parametrów w obszarze zajęтым przez zużycie w stosunku do wartości parametrów w obszarze niezająтым przez zużycie. Podobnie jak w przypadku belki zawieszenia przyczyną takiego stanu mogą być produkty zużycia przemieszczające się na długości połączenia i powodujące ścieranie i bruzdowanie powierzchni, co z czasem może powodować mikrowyrwania oraz mikrowżery na powierzchni drążka stabilizatora.



Rysunek 7.47. Porównanie przykładowych parametrów chropowatości powierzchni obszaru zajętego przez zużycie do obszaru niezajątego przez zużycie.

Źródło: opracowanie własne.

Wykres porównujący przykładowe parametry chropowatości powierzchni obszaru zajętego przez zużycie do obszaru niezajątego przez zużycie pokazuje ich prawie dwukrotne zwiększenie na obszarze zajęтым przez zużycie.

Powierzchnia nieobjęta korozją charakteryzuje się najmniejszym wskaźnikiem utrzymania cieczy przez rdzeń w porównaniu do powierzchni objętej korozją. Rozpatrując parametr S_{vk} , czyli parametr charakteryzujący wgłębienia profilu, widzimy, że zmiany wartości są minimalne.

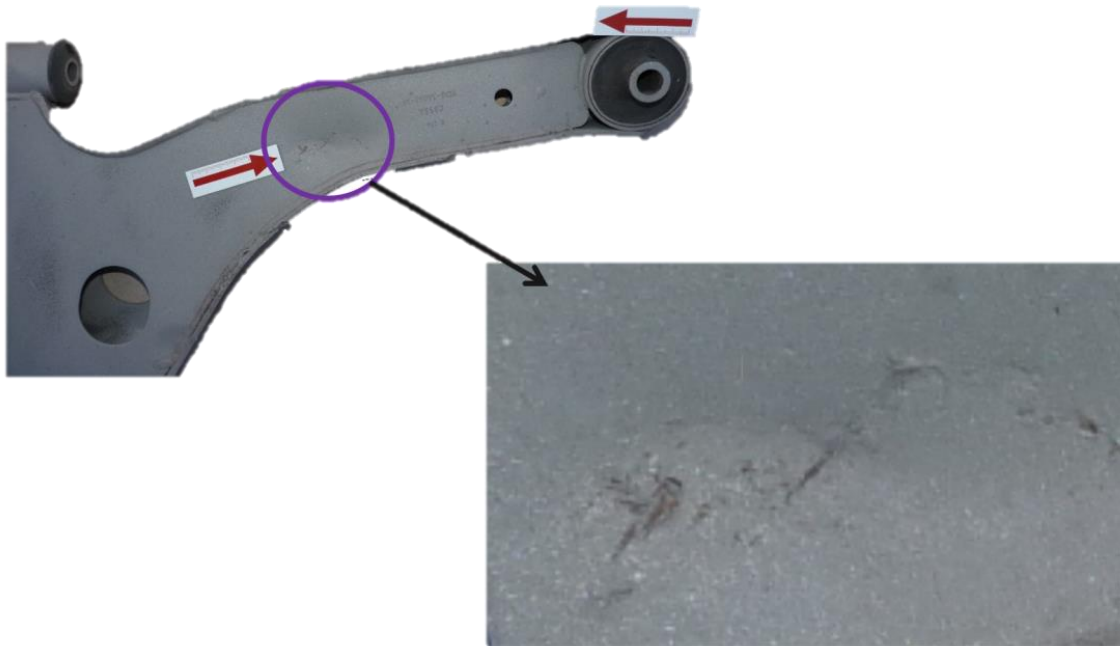
Można zatem stwierdzić, że powierzchnia cały czas zachowuje warunki zapewniające utrzymanie cieczy w obszarze gumowych tulejek obejm, mocujących drążek stabilizatora do belki. Jest to niekorzystne, gdyż sprzyja powstawaniu korozji. Na podstawie zaobserwowanych zmian wartości parametru S_{pk} (zredukowana wysokość wgłębień) można stwierdzić, że następuje intensywne usuwanie największych wzniesień profilu drążka, a udział nośny powierzchni ulega zwiększeniu. Parametr S_{pk} zwiększył się prawie dwukrotnie dla powierzchni objętej korozją.

7.4. Wahacz i tuleja metalowo-gumowa

W poniższym punkcie zaprezentowano wyniki badań i obserwacji uszkodzeń wahacza, a także przedstawiono wyniki badań charakterystyk tulei metalowo-gumowych.

7.4.1. Obserwacje makroskopowe wahacza

Uszkodzenia eksploatacyjne wahaczy polegały w głównie na odkształceniach plastycznych występujących na ramieniu zarówno po prawej, jak też lewej stronie. Uszkodzenia zaobserwowano na 5 wahaczach. Intensywność uszkodzeń była zróżnicowana ze względu na pole powierzchni i głębokość. Na rysunku 7.48 ukazano wahacz z uszkodzeniem o największym nasileniu.



Rysunek 7.48. Przykładowy obraz makrograficzny uszkodzonego wahacza.

Źródło: opracowanie własne.

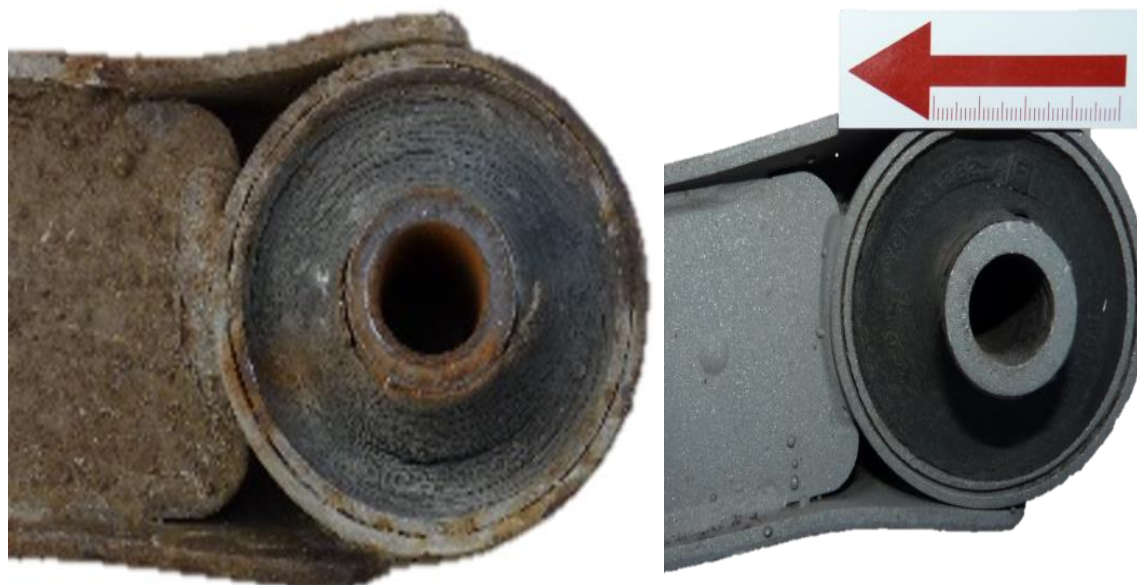
Największe odnotowane odkształcenia plastyczne wahacza zajmowały powierzchnię 24 cm^2 , a maksymalna głębokość odkształcenia wynosiła 3 mm. Są to znaczące zmiany, które dyskwalifikują pojazd z dalszej eksploatacji, gdyż wpływają na zmianę parametrów geometrycznych wahacza, co z kolei może skutkować zmianą struktury geometrycznej pojazdu.

Uszkodzenia tego typu najczęściej powstają w wyniku zdarzeń losowych, do których można zaliczyć m.in. najechanie na przedmioty ostrokrawędziste znajdujące się przypadkowo na drodze lub najechanie na elementy infrastruktury (wysokie krawężniki, separatory drogowe itp.).

Wzrost odkształceń plastycznych powoduje zmianę właściwości mechanicznych elementu, co z kolei wpływa na wzrost defektów w sieci krystalograficznej materiału. Przy dłuższej eksploatacji tak uszkodzonego elementu rozwijać będą się kolejne uszkodzenia, które mogą przekształcić się w zużycie zmęczeniowe, powodujące pęknięcie elementu.

7.4.2. Obserwacje makroskopowe tulei metalowo-gumowych

Obok uszkodzeń wahacza zarejestrowano też uszkodzenia tulei metalowo-gumowej, szczególnie w części gumowej. W celu identyfikacji uszkodzeń wykonano obserwacje makroskopowe, których przykładowe wyniki ukazano na rysunku 7.49.



Rysunek 7.49. Przykładowe uszkodzenia tulei metalowo-gumowej.
Źródło: opracowanie własne.

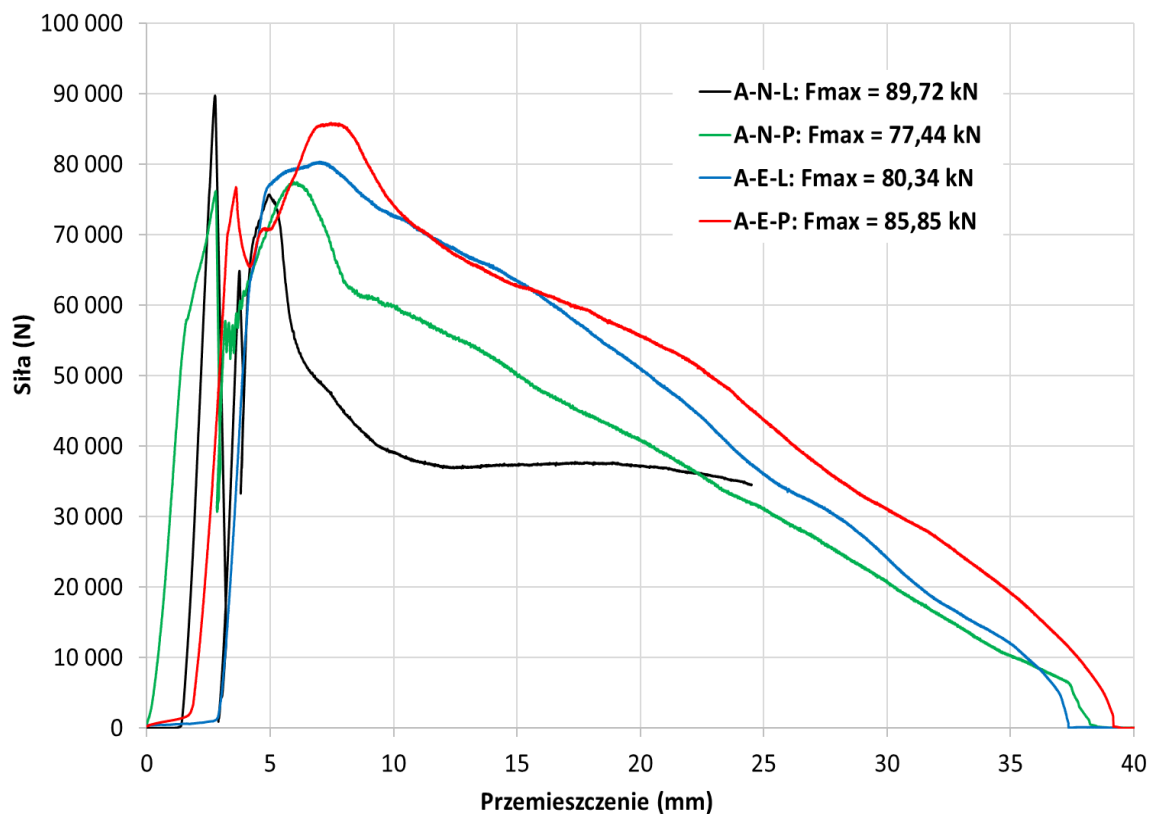
Obserwacje makroskopowe wykazały zużycie tulei metalowo-gumowych wszystkich wahaczy. W części metalowej tulei (zarówno na tulei wewnętrznej, jak i zewnętrznej) obserwuje się miejscowe odkształcenia plastyczne oraz wykruszenia materiału. Widoczne są też ogniska korozyjne, obejmujące swoim zasięgiem cały obwód pierścienia.

W części gumowej tulei widoczne są liczne pęknięcia o zróżnicowanej wielkości. Największe z nich zajmują długość połowy obwodu tulei. Widoczne są też naturalne procesy starzenia się gumy.

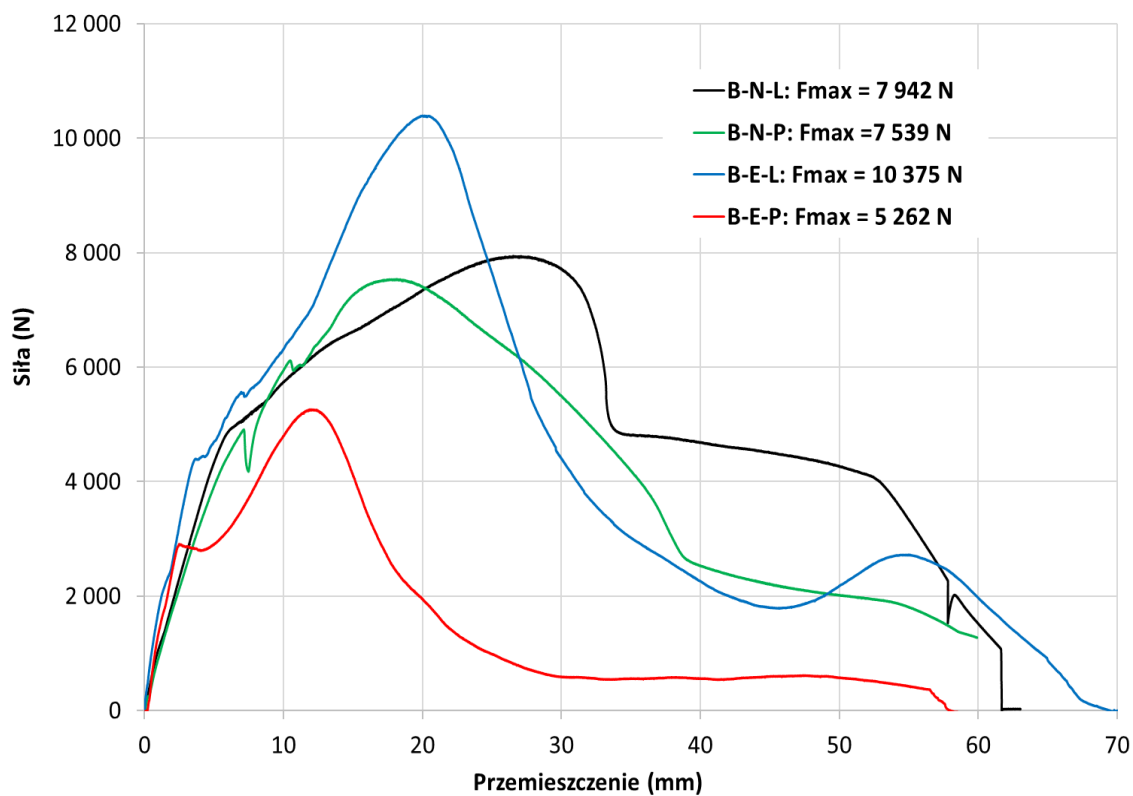
Przedstawione zużycia są wynikiem działania sił skrętnych oraz liniowych poprzecznych i wzdłużnych wytwarzanych podczas ciągłej jazdy po zróżnicowanym terenie oraz działania niekorzystnych czynników środowiskowych.

7.4.3. Charakterystyki tulei metalowo-gumowych

Na rysunkach 7.50 i 7.51 przedstawiono wartości maksymalne sił potrzebnych do wtłoczenia elementu gumowego z tulei i zarejestrowane przebiegi siły w funkcji przemieszczenia.



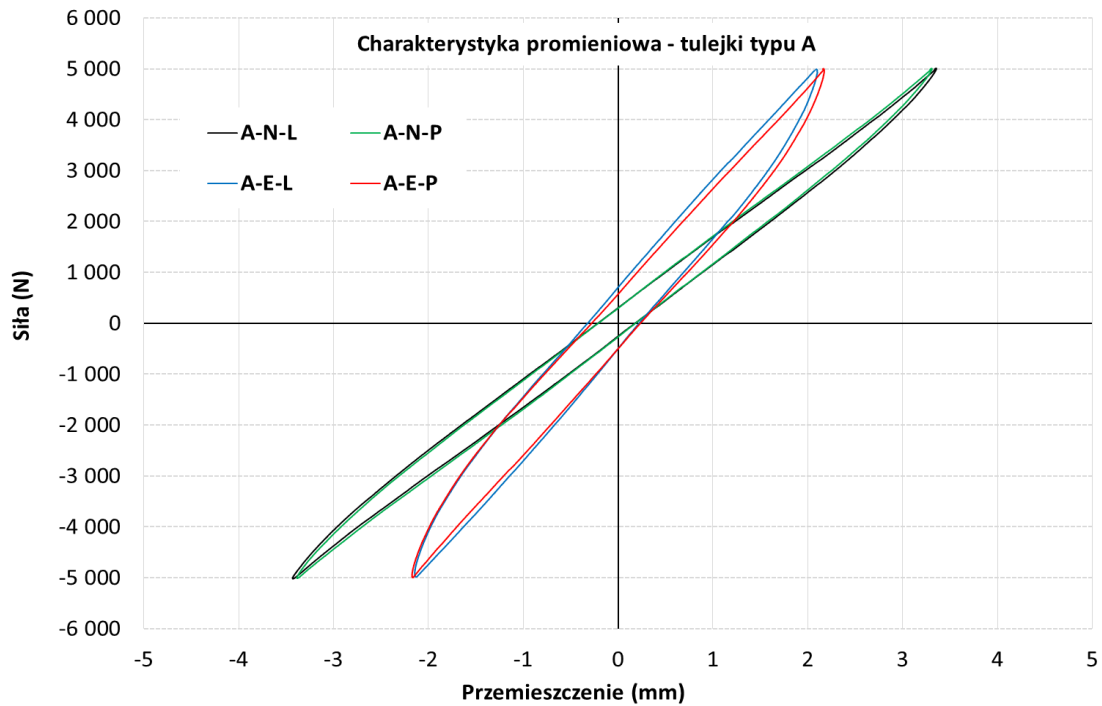
Rysunek 7.50. Wykres siły potrzebnej do wytłoczenia gumy z tulei metalowo-gumowej.
Źródło: opracowanie własne.



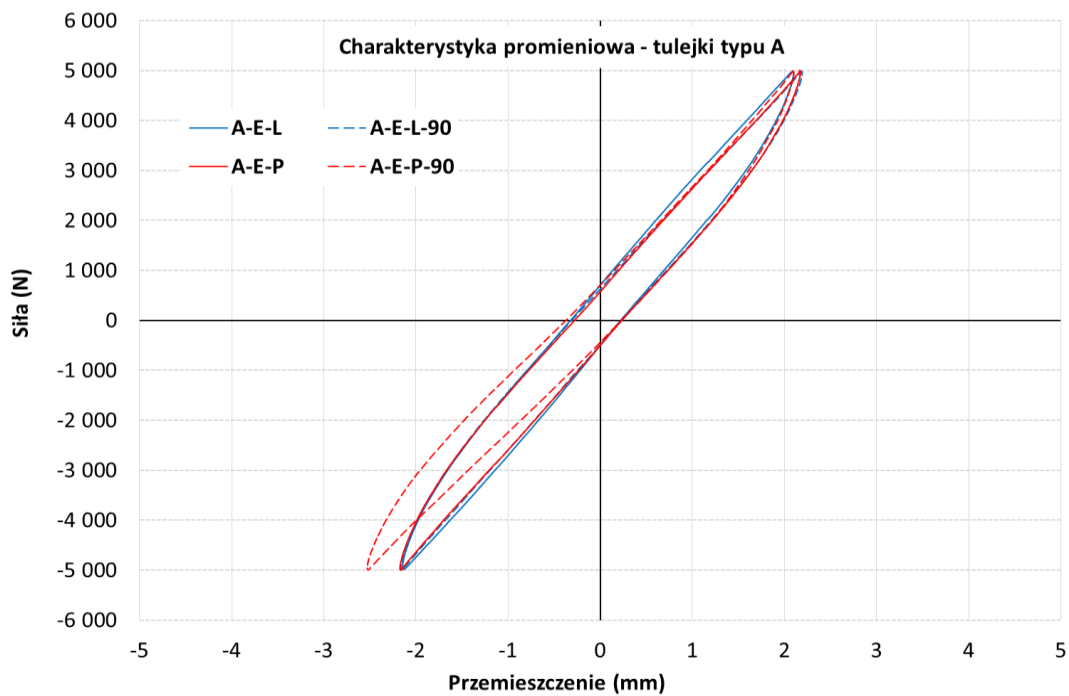
Rysunek 7.51. Wykres siły potrzebnej do wytłoczenia gumy z tulejki metalowo-gumowej.
Źródło: opracowanie własne.

Charakterystyka promieniowa

Zarejestrowane charakterystyki dla tulei typu A (siła – przemieszczenie) ukazano na rysunkach 7.52 i 7.53. W przypadku tulejek eksploatowanych pomiary przeprowadzono w 2 prostopadłych kierunkach.

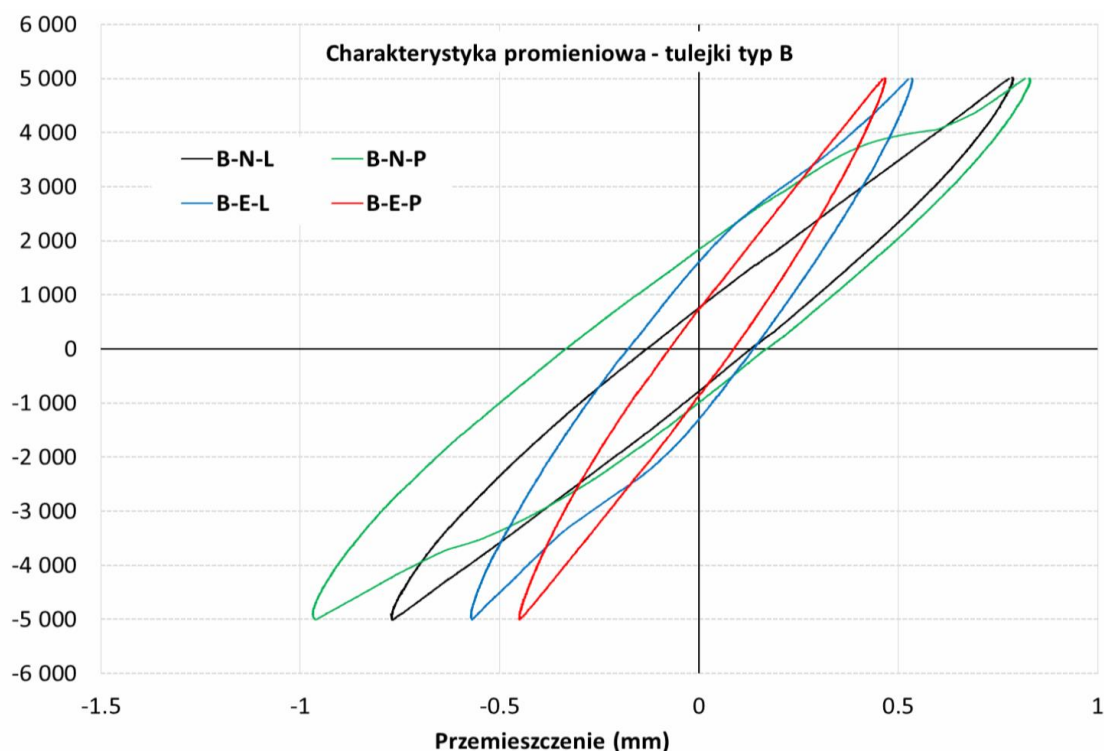


Rysunek 7.52. Charakterystyka promieniowa – tulejka typu A.
Źródło: opracowanie własne.



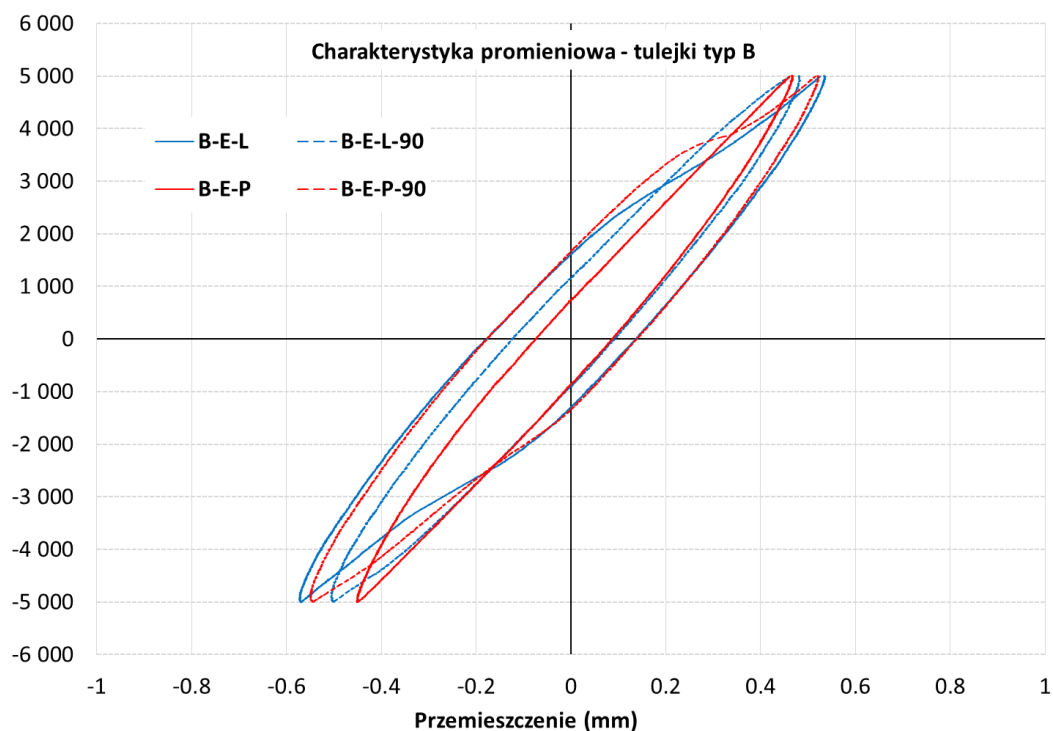
Rysunek 7.53. Charakterystyka promieniowa – tulejka typu A.
Źródło: opracowanie własne.

Zarejestrowane charakterystyki dla tulei typu B (siła – przemieszczenie) ukazano na rysunkach 7.54 i 7.55. W przypadku tulejek eksploatowanych pomiary przeprowadzono w 2 prostopadłych kierunkach.



Rysunek 7.54. Charakterystyka promieniowa tulejki typu B.

Źródło: opracowanie własne.

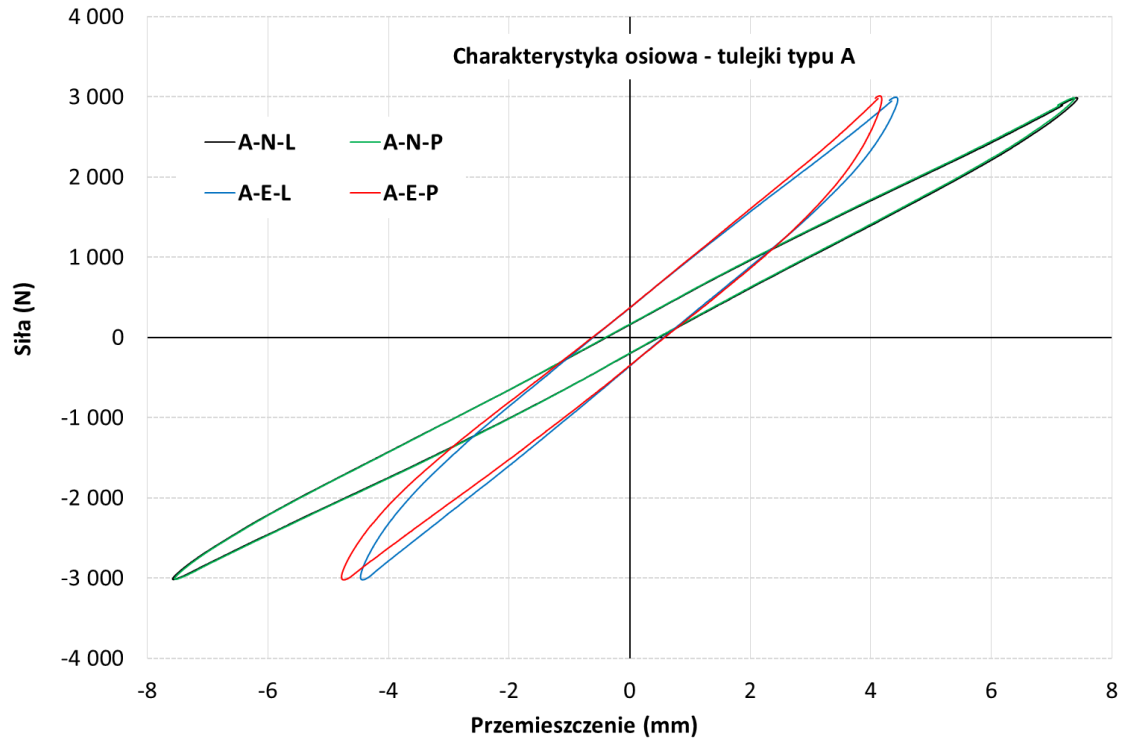


Rysunek 7.55. Charakterystyka promieniowa tulejki typu B.

Źródło: opracowanie własne.

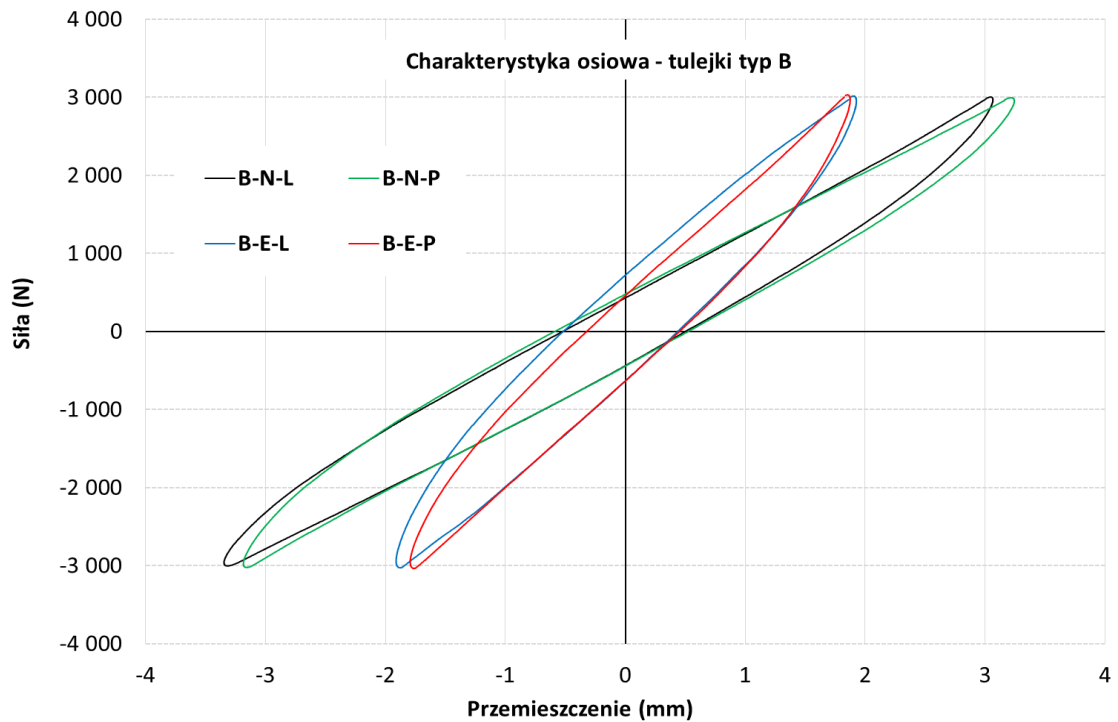
Charakterystyka osiowa

Zarejestrowane charakterystyki osiowe dla tulei A (siła – przemieszczenie) ukazano na rysunkach 7.56 i 7.57.



Rysunek 7.56. Charakterystyka osiowa tulejki typu A.

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 7.57. Charakterystyka osiowa tulejki typu A.

Źródło: opracowanie własne.

Analizując dane przedstawione na wykresach, można wyciągnąć następujące wnioski dotyczące charakterystyk elementów gumowych i metalowo-gumowych:

- charakterystyki tulejek nowych różnią się znacząco od charakterystyk tulejek wymontowanych z eksploatowanych wahaczy;
- zarówno w przypadku charakterystyki osiowej, jak i promieniowej sztywność tulejek nowych jest mniejsza od sztywności tulejek eksploatowanych;
- nie zauważono znaczących różnic między charakterystykami promieniowymi, w 2 prostopadłych kierunkach, eksploatowanych tulejek typu A;
- zaobserwowano różnice (szerokość pętli histerezy) między charakterystykami promieniowymi, w 2 prostopadłych kierunkach, eksploatowanych tulejek typu B;
- w wyniku porównania siły wypychania/wyciągania tulejek z gniazd wahaczy nie została ustalona żadna reguła dotycząca maksymalnej siły.

7.5. Elementy usprężynowania

Usprężynowanie przedniego zawieszenia pojazdu składa się z kolumny McPhersona, w której jednym z elementów składowych jest sprężyna. Sprężyna jest narażona głównie na działanie czynników zewnętrznych, które powiązane są z warunkami środowiskowymi. Konstruktorzy przewidzieli takie warunki pracy i zabezpieczyli sprężynę poprzez nałożenie odpowiedniej powłoki antykorozyjnej. Z różnych jednak powodów powłoka ta może ulec zniszczeniu, narażając sprężynę na uszkodzenia.

Materiałom wykorzystywanym do produkcji sprężyn stawia się wysokie wymagania. Powinny one odznaczać się nie tylko wysokimi cechami sprężystości, lecz także trwałością przy działaniu zmiennych obciążeń, wysoką udarnością i zdolnością do znacznych odkształceń bez powstawania pęknięć (Kułakowska, Patyk, 2011). Stale do wyrobu sprężyn, resorów, drążków skrętnych oraz innych elementów sprężystych cechują się dużym stosunkiem granicy plastyczności do wytrzymałości doraźnej. Stosowane w stanie ulepszonym cieplnie pozwalają na powstawanie znacznych odkształceń sprężystych w wykonywanych z nich elementach, bez wywoływania odkształceń plastycznych. Na właściwości sprężyste stali największy wpływ wywierają węgiel i krzem. Do wyrobu sprężyn i resorów dla mechanicznych pojazdów pracujących w warunkach wysokich obciążeń, zarówno stałych, jak również zmiennych, nadają się szczególnie stale sprężynowe chromowo-krzemowe. W stalach tych zawartość węgla waha się w granicach 0,45-0,55%, krzemu i chromu – ok. 1,0%, a wanadu – poniżej 0,2%. Po ulepszeniu cieplnym wytrzymałość $R_m = 1350 \div 1550$ MPa (Kułakowska, Patyk, 2011). Ze stali sprężynowych wykonywane są nie tylko elementy typowo sprężyste, lecz także inne funkcjonalne części samochodów, np. półosie.

W elementach wykonanych ze stali sprężynowej bardzo ważne znaczenie dla wytrzymałości zmęczeniowej ma stan powierzchni i warstwy przypowierzchniowej. Wszelkiego rodzaju wady powierzchni, jak zawalcowania, zakucia oraz odwęglenie, w znacznym stopniu obniżają wytrzymałość zmęczeniową (Ibidem).

Na sprężynę oddziałują obciążenia jednostronnie zmiennie, a zatem jest to przypadek, w którym sprężyna jest ściskana, a przebieg obciążenia zmienia się sinusoidalnie w czasie (Ibidem).

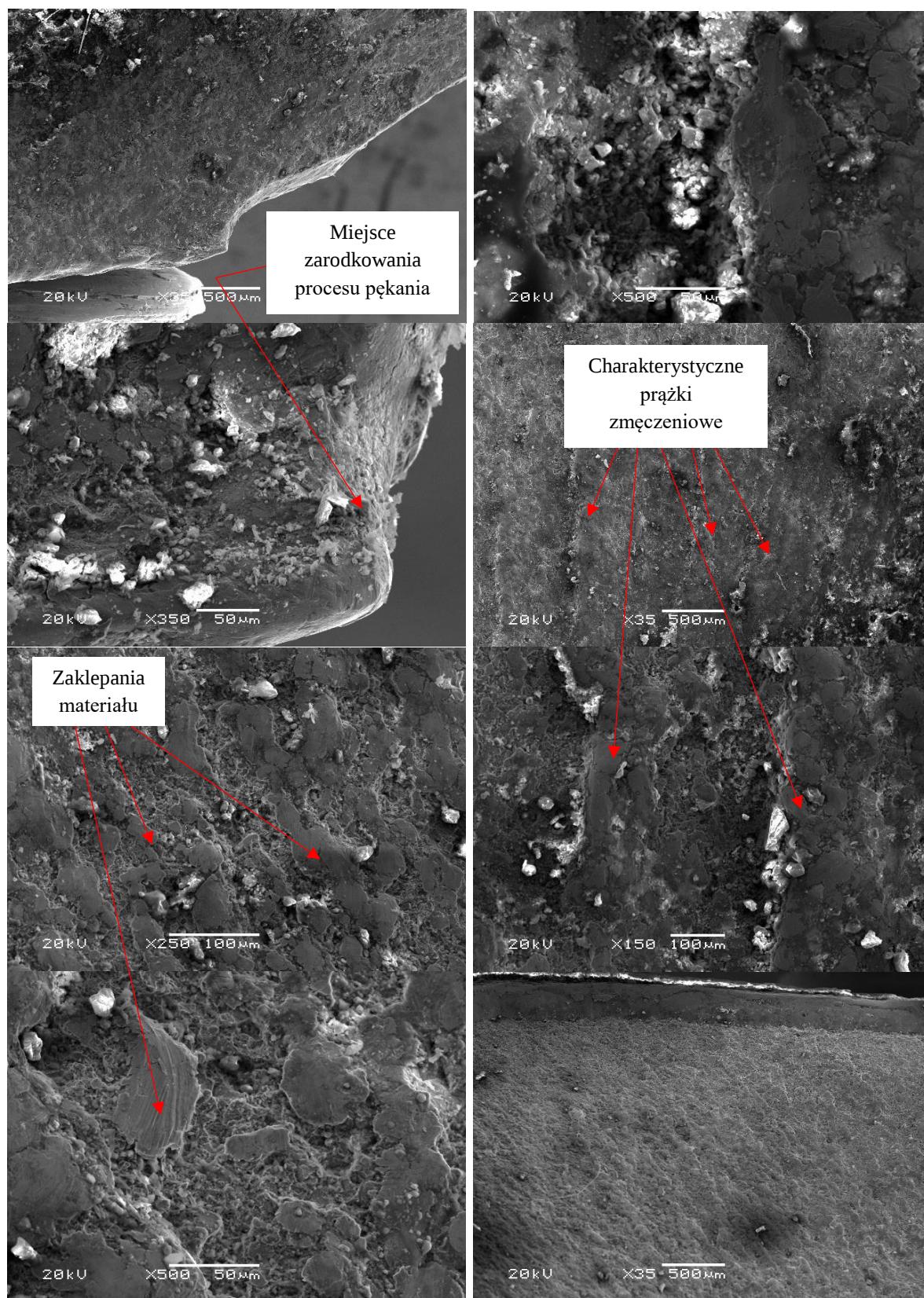
7.5.1. Sprężyna McPhersona

W 2 monitorowanych samochodach dostawczych zidentyfikowano pęknięcia zmęczeniowe sprężyn McPhersona. W przypadku jednego z tych pojazdów po wymianie pękniętej sprężyny i dalszej eksploatacji pojazdu zaistniała podobna awaria po przejechaniu ok. 15 tys. km. Na rysunku 7.58 zaprezentowano przykładowo pęknięcie jednej ze sprężyn. Wszystkie zużyte sprężyny miały podobny charakter pęknięcia.



Rysunek 7.58. Pęknięcie zmęczeniowe sprężyny kolumny McPhersona.
Źródło: opracowanie własne.

W celu poznania szczegółowego charakteru zużycia oraz określenia przebiegu zużycia zmęczeniowego sprężyny przeprowadzono dokładną analizę fraktograficzną przy użyciu mikroskopu skaningowego. Wyniki tych obserwacji zaprezentowano na rysunku 7.59.



Rysunek 7.59. Obrazy z mikroskopu skaningowego przełomu sprężyny McPhersona.
Źródło: opracowanie własne.

Obserwacje makroskopowe ujawniły zmęczeniowy charakter uszkodzenia sprężyny. Miejsce zarodkowania pęknięcia zlokalizowano przy krawędzi sprężyny na pierwszy zwoju.

Analizując obserwacje makroskopowe, można zaproponować następujący mechanizm inicjacji oraz rozwoju zużycia zmęczeniowego. W wyniku eksploatacji pojazdu w trudnych warunkach, na które składały się nierówności i koleiny na drodze oraz czynniki środowiskowe, w głównej mierze związane z odśnieżaniem jezdni i wodą, doszło do uszkodzenia warstwy ochronnej sprężyny. Jak wynika z przytoczonego wcześniej obrazu makroskopowego, najbardziej narażony na działanie tych czynników jest pierwszy zwoj sprężyny. Pozostałe zwoje sprężyny nie noszą znamion uszkodzeń zarówno warstwy ochronnej, jak i samej sprężyny. Dzieje się tak dlatego, że wszelkie zanieczyszczenia pochodzące z drogi i woda osadzają się w kielichu, tworząc idealne środowisko inicjacji uszkodzeń. W związku z brakiem reakcji ze strony obsługi serwisowej uszkodzenia powłoki poszerzały się, a na odsłoniętych częściach sprężyny zainicjowane zostały ogniska korozyjne. W trakcie dalszej eksploatacji pojazdu, szczególnie w agresywnym środowisku, korozja postępowała, przekształcając się w zużycie zmęczeniowe. Na początku występowały mikropęknięcia niezauważalne gołym okiem, które w następnych etapach eksploatacji przekształciły się w znacznych rozmiarów ogniska zmęczeniowe, doprowadzając do pęknięcia.

Należy również nadmienić, że do pęknięcia sprężyny doszło w styczniu, czyli w miesiącu, w którym najczęściej pojawiają się opady marznącego śniegu, wymagającego natychmiastowego niwelowania środkami uszorstniającymi i solą drogową.

Analiza faktograficzna przeprowadzona na mikroskopie skaningowym pozwoliła na zlokalizowanie ogniska procesu zmęczeniowego (miejsce inicjacji procesu pęknięcia).

Przełom zmęczeniowy sprężyny McPhersona poddano mikroskopowym obserwacjom. Potwierdziły one fakt, że przełom posiada cechy pęknięcia zmęczeniowego. Świadectwem takiego stanu są charakterystyczne prążki rozchodzące się promieniowo. Z obserwacji mikroskopowych można wyciągnąć również wniosek, że proces pęknięcia zmęczeniowego był procesem powolnym oraz długotrwałym. Świadczą o tym charakterystyczne zaklepania przełomu widoczne na wszystkich obserwowanych powierzchniach.

Ponadto na obrazie mikroskopowym obserwuje się utlenione mikroodłamki materiału o dużej twardości, które mogą być przyczyną zużycia ściernego.

8. Szacowanie wskaźników niezawodności układu zawieszenia

W tym rozdziale dokonano szacowania wskaźników niezawodnościowych układu zawieszenia dla samochodów dostawczych, których zużycie analizowano w niniejszej pracy. Wskaźniki szacowano, wykorzystując rozkład Weibulla.

Znajomość charakterystyk niezawodnościowych obiektów technicznych daje dostęp do niezmiennie istotnych informacji i pomoc w prawidłowej ocenie kondycji tych obiektów podczas ich użytkowania. Wyższa niezawodność pojazdu zapewnia bezpieczniejsze jego użytkowanie. W dobie wysokiego nasycenia technologicznego liczba użytkowanych obiektów technicznych, w tym pojazdów samochodowych, przekłada się na wysokie koszty ich eksploatacji. Wysoka trwałość i niezawodność samochodów to dłuższe okresy ich bezawaryjnej pracy i możliwość znacznej redukcji nakładów finansowych przeznaczanych na ich naprawy oraz remonty (Zdziennicki, Maciejczyk, 2011).

Właściwe podejście do modelowania niezawodności obiektów technicznych (systemów) wymaga m.in. wyodrębnienia poszczególnych faz w ich eksploatacji, tworzących niezawodnościową strukturę fazową (Kaczor, Lorenc, 2012).

Każda faza eksploatacji ma założony okres trwania i może charakteryzować się odrębnymi właściwościami z uwagi na (Ibidem):

- zmianę struktury niezawodnościowej systemu względem rodzaju i ilości wykonywanej pracy w danej fazie;
- zmianę wymagań dotyczących spełniania określonych funkcji przez system dla fazy, w której aktualnie on się znajduje;
- zmianę warunków otoczenia systemu;
- lokalizację w podsystemie eksploatacji technicznej (użytkowanie, obsługiwane).

8.1. Wiadomości ogólne

W teorii niezawodności rozkład Weibulla ma szczególne znaczenie, ponieważ spełnia on podstawy do oszacowania wskaźników niezawodności niezależnie od tego, czy intensywność uszkodzeń ma wartość malejącą, stałą czy rosnącą (Piec, 2004; Zhu, Yan, Peng, 2016).

Rozkład Weibulla stosuje się, gdy intensywność uszkodzeń jest zmienną o przebiegu monotonicznym. Opisuje się nim m.in. trwałość zmęczeniową materiałów i konstrukcji mechanicznych (Macha, Niesłony, 2010; Kowalski i in., 2021). W ramach niniejszej pracy dokonano szacowania wskaźników, których wzory podano poniżej.

Funkcja niezawodności (Słowiński, 2014):

$$R(t) = e^{\left(-\frac{t^\beta}{\alpha}\right)} \quad (8.1.)$$

Funkcja intensywności uszkodzeń (Piec, 2004):

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \quad (8.2.)$$

Dystrybuanta czasu pracy do pierwszego uszkodzenia (Słowiński, 2014):

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t^\beta}{\alpha}\right)} \quad (8.3.)$$

Funkcja gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy do pierwszego uszkodzenia:

$$f(t) = \frac{\beta}{\alpha} \left(\frac{t}{\alpha}\right)^{\beta-1} \cdot e^{-\left(\frac{t^\beta}{\alpha}\right)} \quad (8.4.)$$

gdzie:

t – czas poprawnej pracy obiektu,

α – parametr kształtu,

β – parametr skali.

Rozwiązując układ 3 równań, wyznaczyć można parametr skali β i parametr kształtu α :

$$\begin{cases} \alpha \cdot \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \ln x_i - \frac{n}{2} \cdot \ln \beta = \sum_{i=1}^{\frac{n}{2}} \ln \left(\ln \frac{1}{1-h(x_i)} \right) \\ \alpha \cdot \sum_{i=\frac{n}{2}}^n \ln x_i - \left(n - \frac{n}{2} \right) \cdot \ln \beta = \sum_{i=\frac{n}{2}}^n \ln \left(\ln \frac{1}{1-h(x_i)} \right) \\ h(x_i) = \frac{i-0,5}{n} \end{cases} \quad (8.5.)$$

8.2. Szacowanie wskaźników niezawodnościowych

Szacowanie wskaźników niezawodności przeprowadzono na podstawie informacji pozyskanych z bazy danych dotyczących pracy elementów układu zawieszenia. Bazę danych prowadzono dla wszystkich 5 pojazdów. Rejestrowano każdą niesprawność układu zawieszenia samochodów i odnotowywano przebieg pojazdu, dla którego ta niesprawność nastąpiła. W tabeli 8.1 zestawiono czas pracy pojazdów do chwili wystąpienia niesprawności ze względu na uszkodzenie dowolnego elementu układu zawieszenia.

Tabela 8.1

Zestawienie czasu pracy pojazdów do chwili wystąpienia niesprawności układu zawieszenia

Lp.	Przebieg [km]				
	Pojazd nr 1	Pojazd nr 2	Pojazd nr 3	Pojazd nr 4	Pojazd nr 5
1	4356	3750	4400	3250	2315
2	7250	5152	6852	4210	3363
3	10 256	7892	9833	7776	6897
4	12 115	10 248	13 875	11 290	10 043
5	17 140	12 566	16 652	14 840	12 387
6	24 897	17 397	26 668	21 376	20 117
7	25 132	23 341	28 163	25 967	24 785
8	30 168	27 345	32 567	27 546	29 930
9	40 150	30 158	37 115	33 183	31 564
10	48 192	36 268	44 026	40 642	36 457
11	49 668	40 132	49 528	50 113	49 286
12	52 692	43 708	54 123	55 632	54 198
13	56 026	50 962	58 195	56 743	58 700
14	56 185	55 331	61 954	60 153	60 127
15	57 770	61 853	63 868	63 001	64 539
16	58 347	65 456	66 446	65 902	68 611
17	60 126	69 225	70 069	70 433	71 675
18	63 023	72 009	72 008	73 285	72 986
19	66 185	75 780	74 639	75 801	76 908
20	68 978	77 153	74 995	77 338	80 147
21	70 055	79 871	77 645	79 172	81 793
22	72 123	80 138	81 555	82 916	84 078
23	77 564	83 854	83 587	84 443	86 401
24	79 587	86 745	85 678	86 907	89 056
25	80 560	88 385	89 125	88 904	91 046
26	81 630	90 111	92 985	95 794	96 892

Źródło: opracowanie własne.

Korzystając ze wzoru 8.5, wyznaczono parametr skali β i parametr kształtu α . Wartości tych parametrów zestawiono w tabeli 8.2.

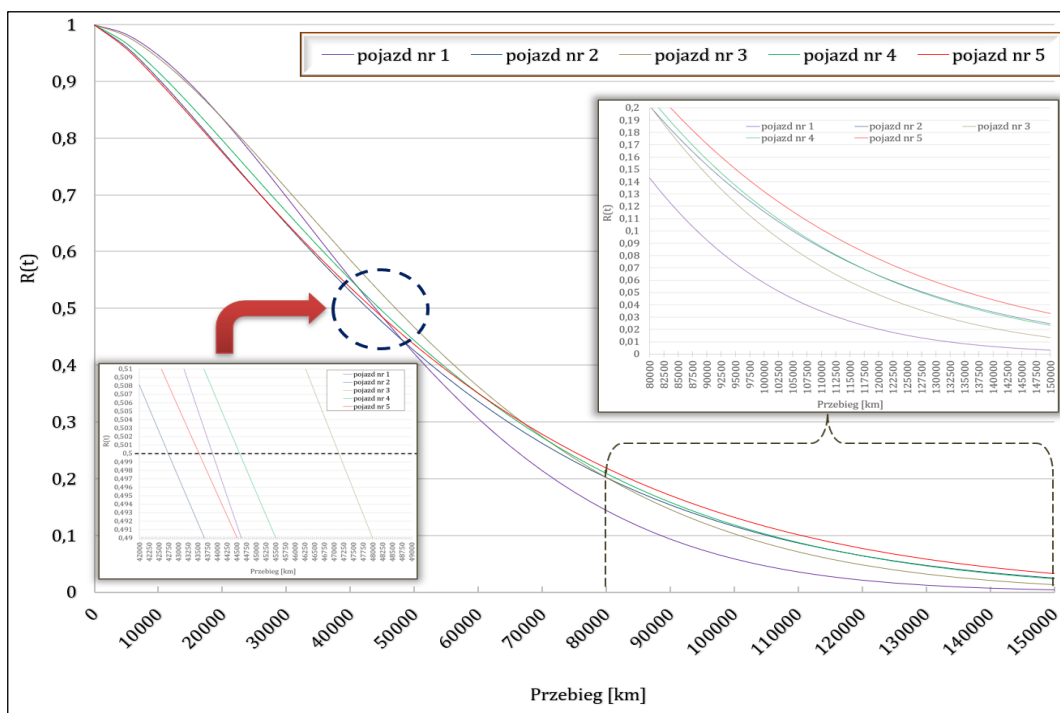
Tabela 8.2

Wartości parametru kształtu i parametru skali dla każdego samochodu dostawczego

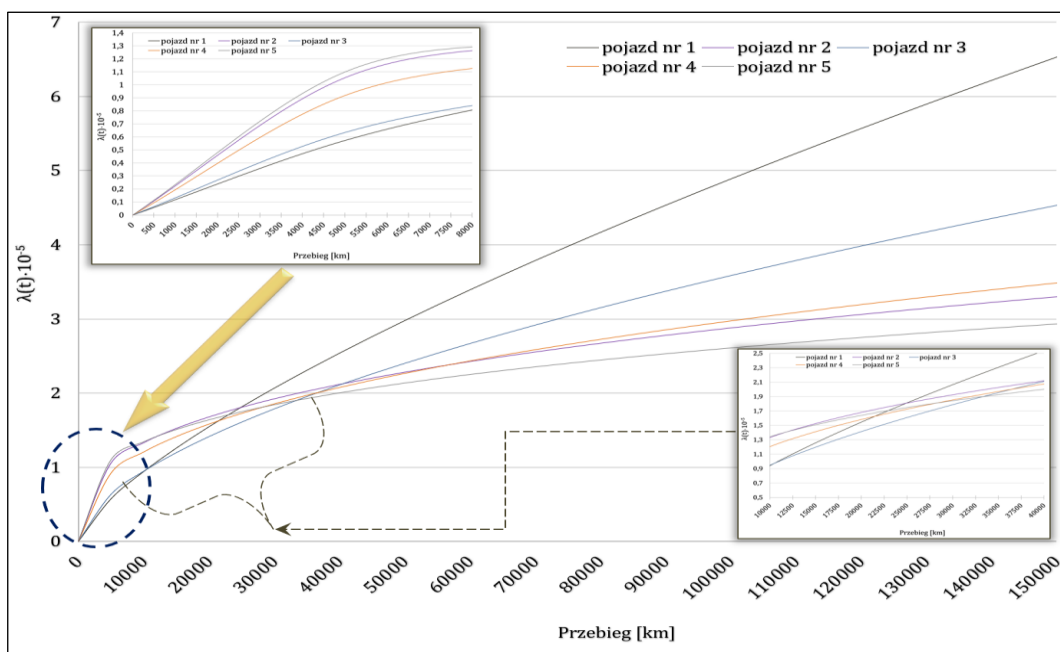
Pojazd	Parametr kształtu α	Parametr skali β
pojazd nr 1	1,715243119	132378319,4
pojazd nr 2	1,335275447	2201175,185
pojazd nr 3	1,578228631	34254105,67
pojazd nr 4	1,392016304	4273782,22
pojazd nr 5	1,288461321	1368038,62

Źródło: opracowanie własne.

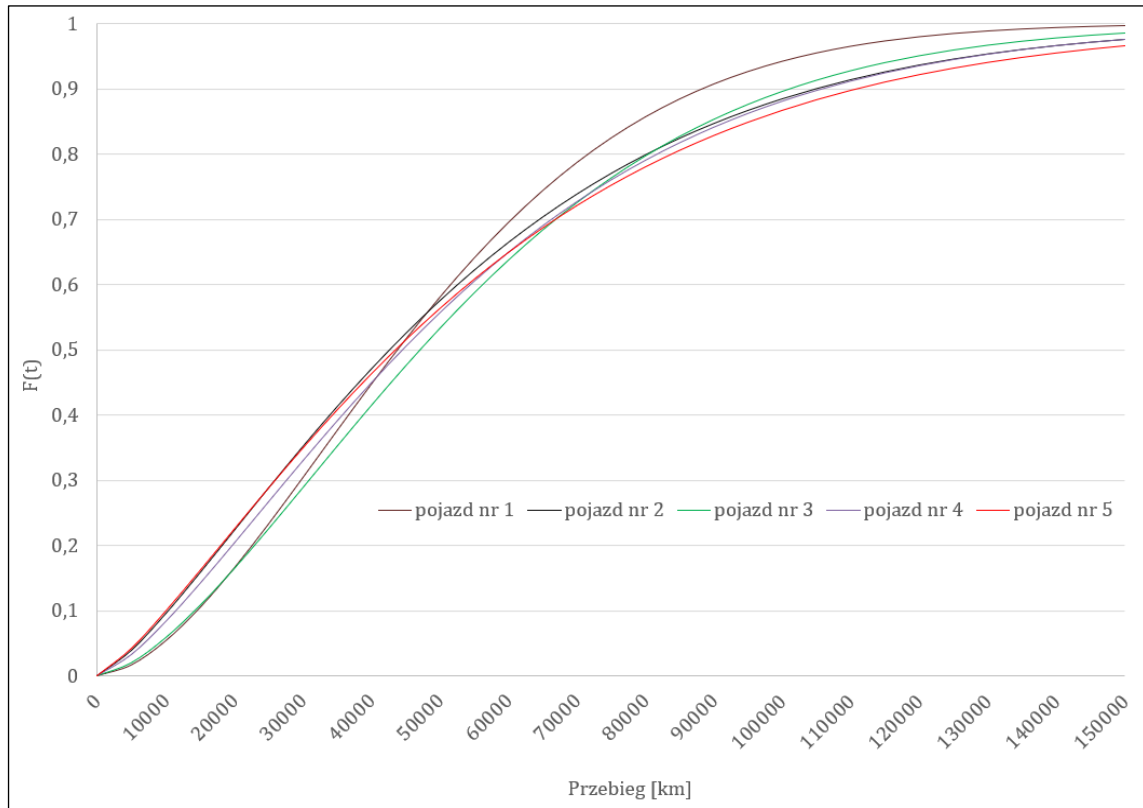
Znając parametry kształtu i parametry skali oraz korzystając ze wzorów 8.1-8.4, można wykreślić wykresy wskaźników niezawodności obiektu. Szacowano wartości wskaźników niezawodności układów zawieszenia dla pojazdów, które w swojej służbie osiągną przebieg 150 tys. km. Uzyskane wyniki analizy będą ważną informacją potrzebną do opracowania strategii obsługi pojazdu pod względem układów zawieszenia. Na rysunkach 8.1-8.9 zaprezentowano wykresy funkcji wskaźników niezawodności i mediany czasu zdatności.



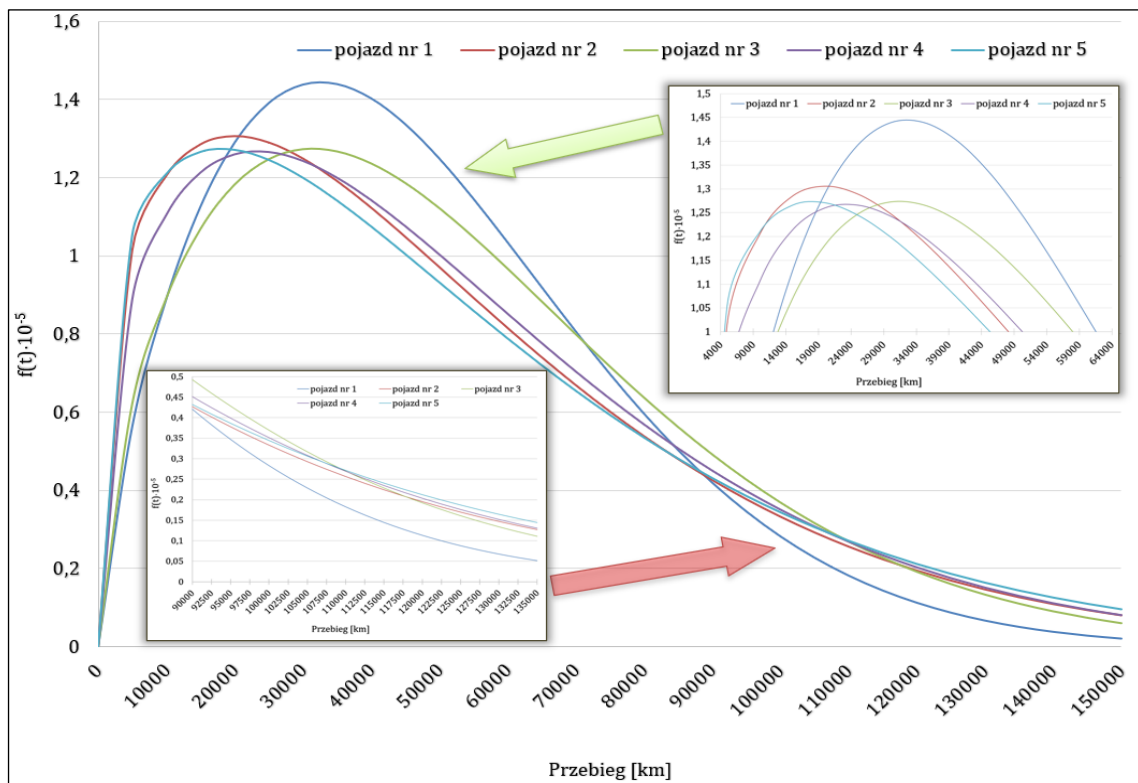
Rysunek 8.1. Wykres funkcji prawdopodobieństwa poprawnej pracy.
Źródło: opracowanie własne.



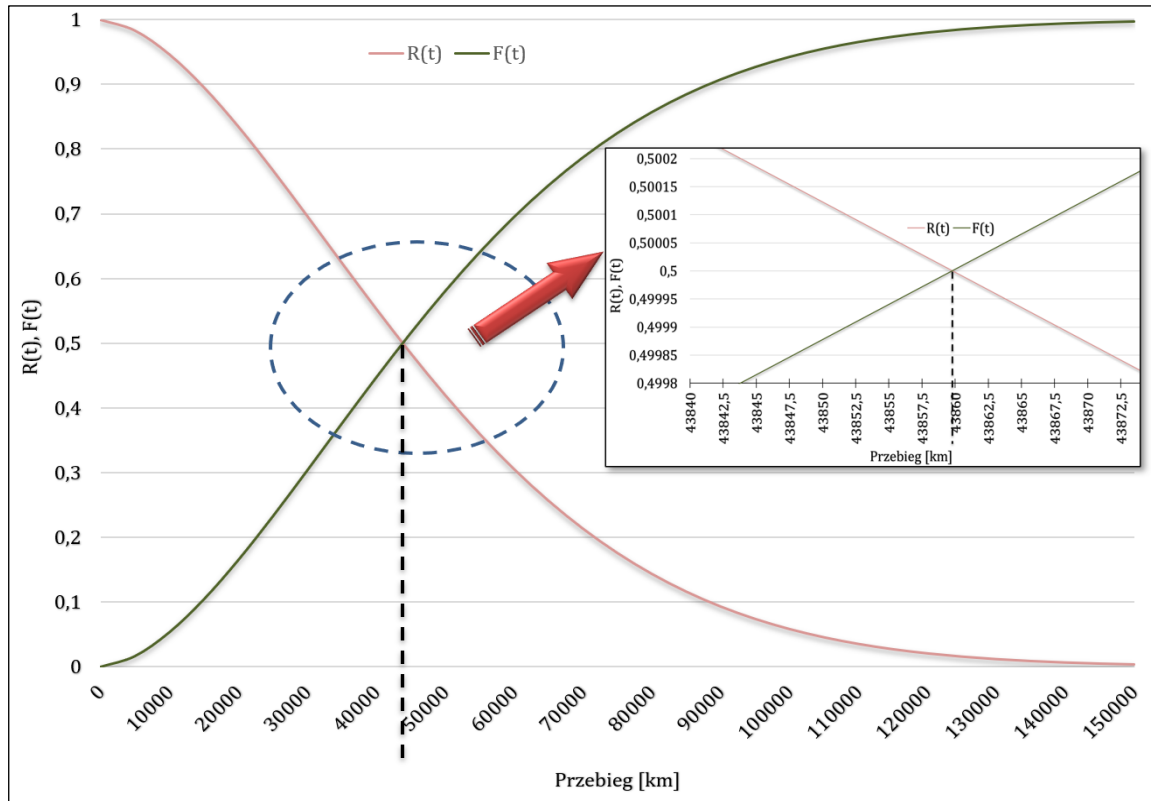
Rysunek 8.2. Wykres funkcji intensywności uszkodzeń.
Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 8.3. Wykres funkcji czasu pracy do pierwszego uszkodzenia.
Źródło: opracowanie własne.

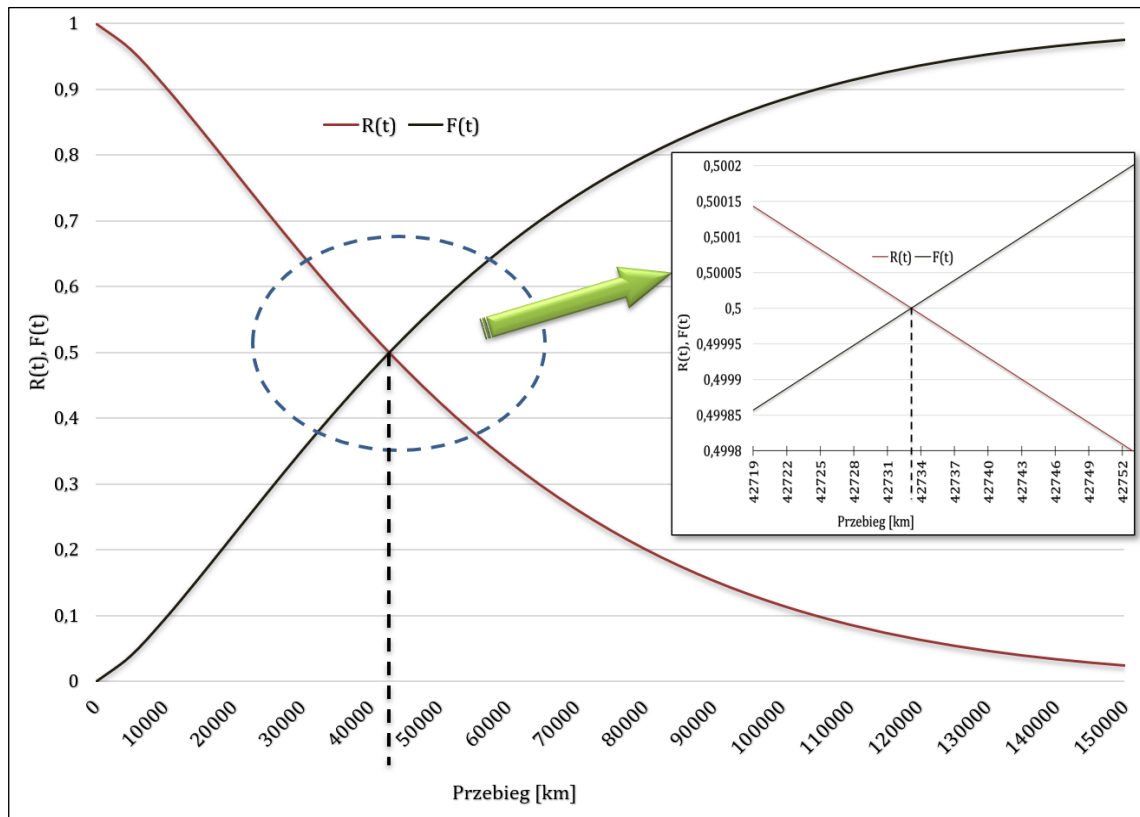


Rysunek 8.4. Wykres funkcji gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy.
Źródło: opracowanie własne.



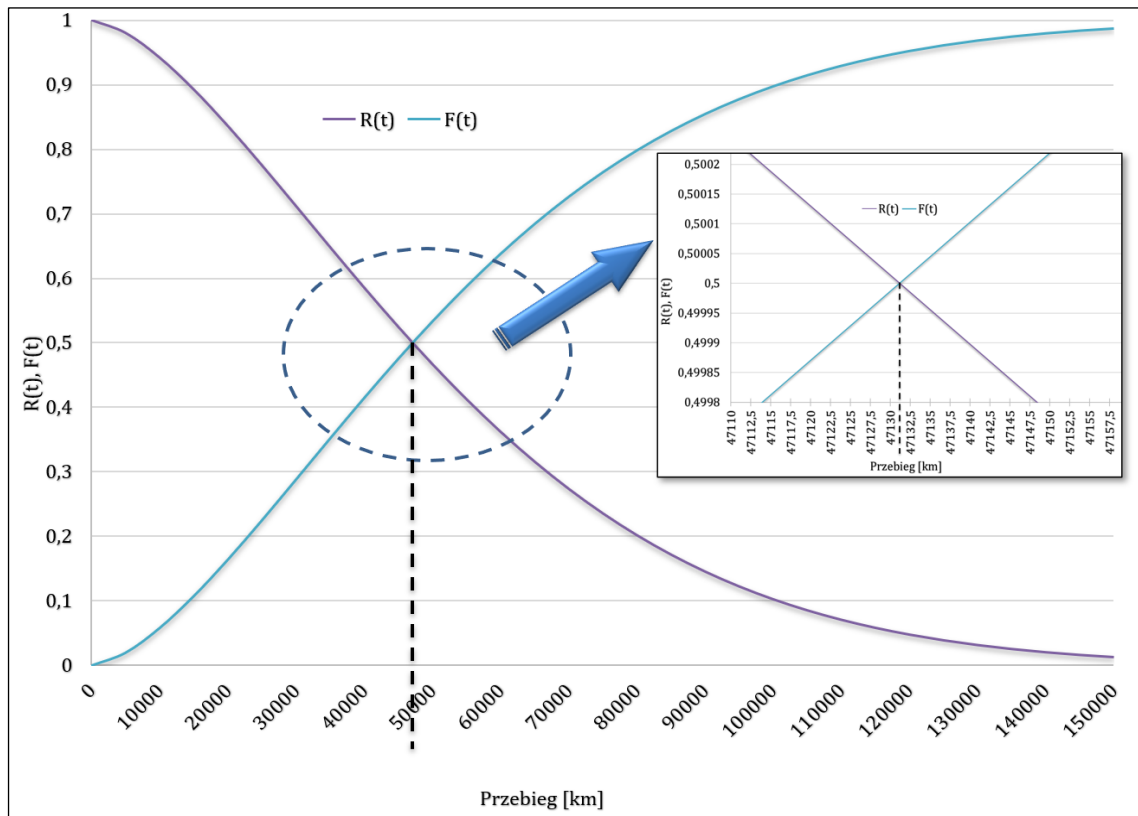
Rysunek 8.5. Mediana czasu zdadności układu zawieszenia pojazdu 1.

Źródło: opracowanie własne.



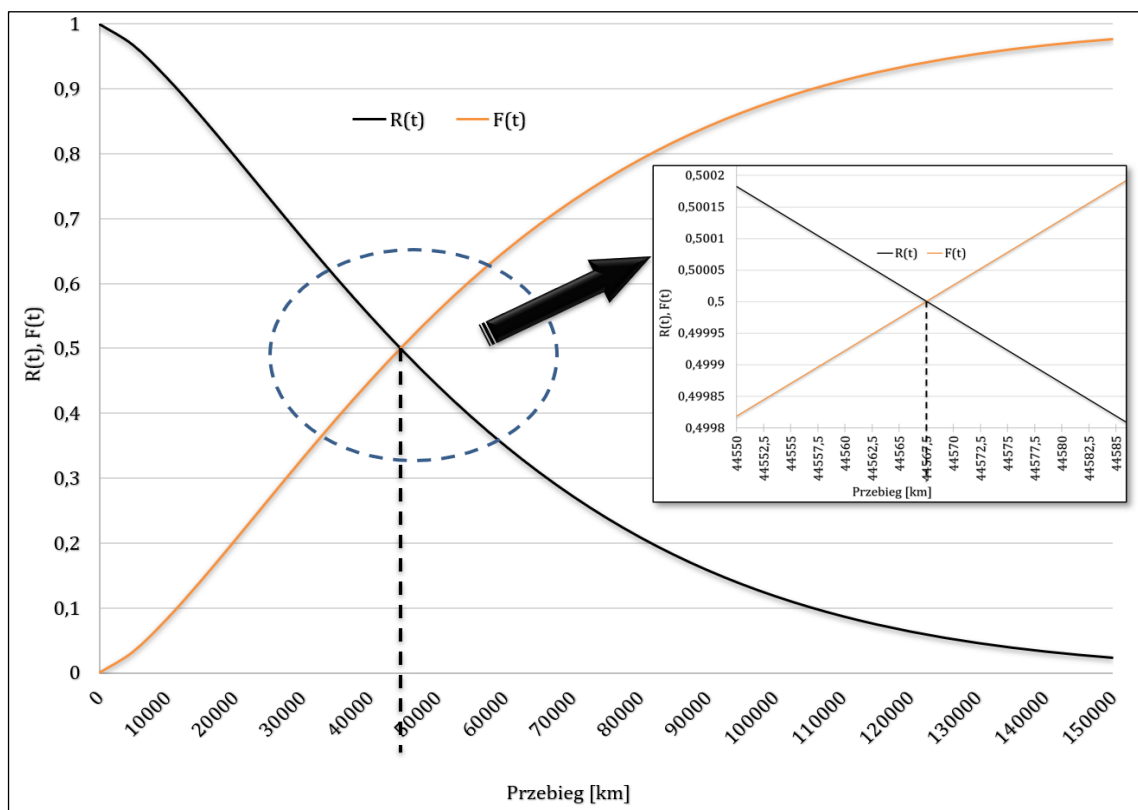
Rysunek 8.6. Mediana czasu zdadności układu zawieszenia pojazdu 2.

Źródło: opracowanie własne.



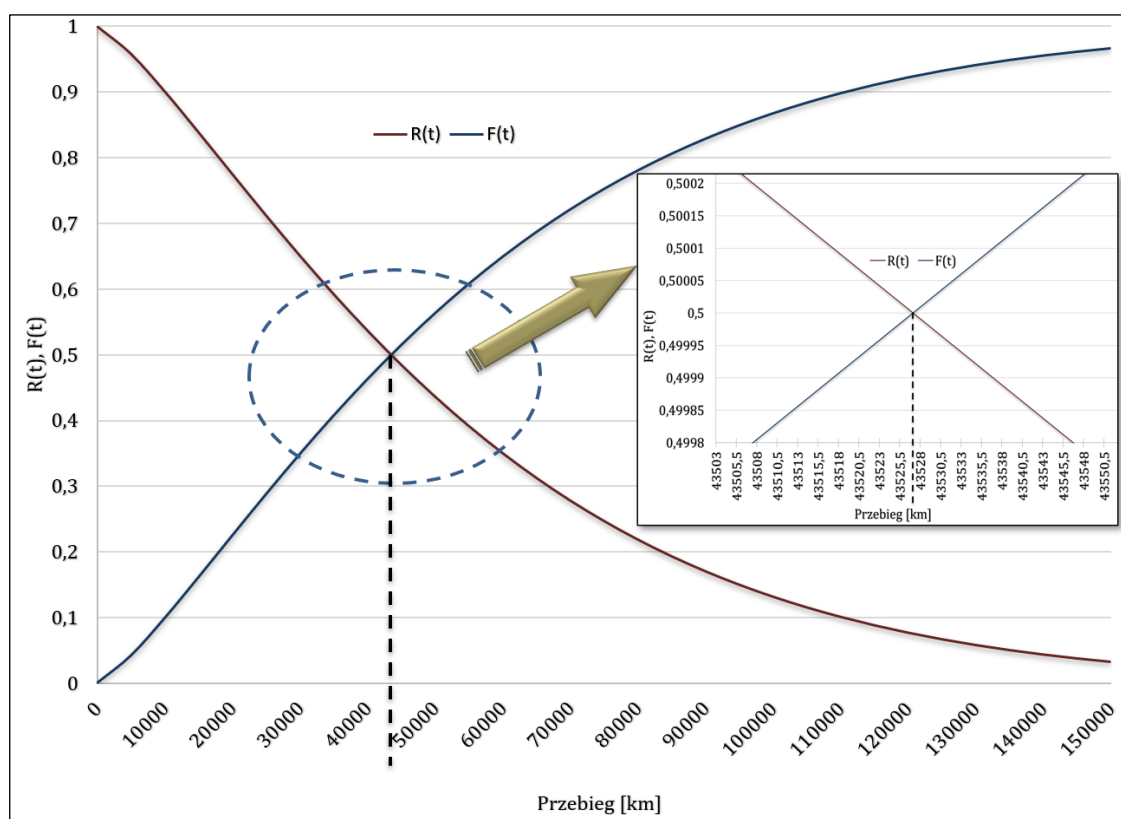
Rysunek 8.7. Mediana czasu zdatości układu zawieszenia pojazdu 3.

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 8.8. Mediana czasu zdatości układu zawieszenia pojazdu 4.

Źródło: opracowanie własne.



Rysunek 8.9. Mediana czasu zdatości układu zawieszenia pojazdu 5.

Źródło: opracowanie własne.

Analizując wykres funkcji prawdopodobieństwa poprawnej pracy układu zawieszenia $R(t)$, można zaobserwować zbliżony przebieg wykresów dla wszystkich 5 pojazdów. Zauważalny jest wpływ warunków eksploatacji pojazdu (związanych zarówno z warunkami drogowymi, jak też środowiskowymi oraz umiejętnościami kierowania pojazdem) na poprawną pracę układu. Jak można odczytać z wykresów, szacunkowo 50-procentowa sprawność układu zawieszenia obserwowana będzie w przedziale 42-48 tys. km, w zależności od badanego pojazdu. Na tę wartości decydujący wpływ mają elementy najbardziej podatne na uszkodzenia, do których można zaliczyć m.in. elementy gumowe w układzie zawieszenia. Pojazd nr 1 osiągnie 10-procentową sprawność układ zawieszenia po przejechaniu ok. 90 tys. km, a pojazd nr 5 taką samą sprawność osiągnie dopiero po przejechaniu ok. 112,5 tys. km. Pojazd ten charakteryzuje się największą niezawodnością układu zawieszenia. Zatem po przejechaniu 90 tys. km zaleca się rozszerzone przeglądy codzienne układu zawieszenia, celem wyeliminowania wadliwych elementów.

Parametr kształtu α dla wszystkich badanych pojazdów ma wartość powyżej jeden, dlatego też funkcja intensywności uszkodzeń w każdym z tych przypadków będzie funkcją rosnącą. Potwierdzeniem tego założenia są zaprezentowane wcześniej wykresy funkcji intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$. Analizując wspomniane wykresy, można zauważyć szybki wzrost intensywności uszkodzeń układu zawieszenia w początkowej okresie pracy układu. Testowane pojazdy były nowe fabrycznie, dlatego też szybki wzrost tej intensywności należy tłumaczyć okresem docierania. Z wykresów wynika, że trwał on przez pierwsze 8000-9000 km eksploatacji pojazdów. Uszkodzenia w tym okresie wynikały nie tylko z warunków eksploatacji pojazdu, ale również powstawały

w wyniku dogładowania i dopasowywania się współpracujących elementów. Po tym okresie eksploatacji pojazdu rzeczywiste powierzchnie styku powiększają się, co powoduje, że intensywność zużywania się elementów maleje, a także stabilizuje się stan naprężeń oraz odkształceń w warstwie wierzchniej. Wykresy w tym przypadku charakteryzują się równomiernym i stabilnym wzrostem. Jest to okres normalnej pracy układu zawieszenia. Uszkodzenia w tym okresie mają charakter losowy, ich częstotliwość jest przypadkowa i wynika z przeciążeń związanych z warunkami eksploatacji. Trzeciego okresu eksploatacji, tj. okresu przyspieszonego zużywania się układu zawieszenia, należy spodziewać się po osiągnięciu przebiegu 100-150 tys. km.

Na podstawie wykresów gęstości rozkładu prawdopodobieństwa czasu poprawnej pracy $f(t)$ można wnioskować, że prowadzona baza danych zawiera informacje o wysokiej jednorodności hipotetycznej reprezentacji statystycznej. Można stwierdzić również, że wiarygodne jest przyjęte założenie, że hipotetyczny rozkład uszkodzeń układu zawieszenia jest rozkładem Weibulla. Najwcześniej maksymalną wartość krzywej gęstości uszkodzeń uzyskał pojazd nr 5. Wartość ta została osiągnięta po przejechaniu ok. 14,5 tys. km. Najpóźniej natomiast maksymalną wartość krzywej gęstości uszkodzeń uzyskuje pojazd nr 1 i pojazd nr 3. Wartość tę pojazdy osiągają po przejechaniu ok. 34,5 tys. km. Na podstawie tych wykresów można wnioskować, że systematyczny serwis układu zawieszenia co odpowiednią jednostkę czasu pozwoli wyeliminować lub zmniejszyć problem występowania awarii układu zawieszenia. Sugeruje się też profilaktyczną wymianę wybranych elementów układu zawieszenia podczas przeglądów serwisowych lub diagnostycznych.

Z analizy wykresów mediany czasu zdatności wynika, że układ zawieszenia pojazdów eksploatowanych w warunkach opisanych w niniejszej pracy posiadał będzie 50-procentową niezawodność po przejechaniu od 40 tys. do 50 tys. km. Następnie niezawodność ta będzie sukcesywnie spadać, osiągając wartość bliską zeru po przejechaniu od 140 tys. do 145 tys. km.

9. Podsumowanie i wnioski

Ocena stanu technicznego układów zawieszenia jest niezwykle istotnym zagadnieniem ze względu na bezpieczeństwo i komfort jazdy. Pojazdy dostawcze pokonują rocznie wiele tysięcy kilometrów często w trudnych warunkach, co przekłada się na pogorszenie stanu technicznego układu zawieszenia. Nierozpoznanie na czas uszkodzeń w tym układzie niejednokrotnie kończy się zdarzeniem drogowym, co zostało zasygnalizowane na wstępie niniejszej pracy. Z tego też względu celem pracy była ocena wpływu warunków eksploatacji pojazdu na zaistnienie uszkodzeń oraz inicjację i rozwój zużycia elementów układu zawieszenia.

Przedmiotem badawczym w pracy były układy zawieszenia samochodów dostawczych, które rozwożąc przesyłki kurierskie do różnych miejscowości, poruszały się po zróżnicowanym ze względu na stan i rodzaj nawierzchni terenie. Samochody te jeździły również w różnych warunkach środowiskowych. Po każdym dniu pracy pojazdu monitorowano stan techniczny jego układu zawieszenia, tworząc bazę danych dotyczącą rodzaju uszkodzenia i liczby kilometrów, przy których doszło do uszkodzenia. Jeśli uszkodzenie nie pozwalało na dalszą eksploatację, wadliwy element demontowano z pojazdu i poddawano szczegółowej analizie laboratoryjnej. Po zakończeniu testów eksploatacyjnych, które trwały ok. 100 tys. km, ze wszystkich badanych pojazdów zdemonstrowano układ zawieszenia i poddano kolejnym badaniom w celu rozpoznania stanu technicznego. Wykonano m.in. obserwacje makro- i mikroskopowe, pomiary twardości i profilu powierzchni oraz analizę składu chemicznego produktów zużycia.

Problemem naukowym niniejszej pracy, który według Autora udało się zrealizować, było kompleksowe podejście do oceny stanu technicznego układu zawieszenia. Z przeglądu literatury wynika, że dotychczas prowadzono jedynie szczątkowe badania poszczególnych elementów, a wyjątek stanowią amortyzatory, którym poświęcono wiele pozycji literaturowych. W tym przypadku badania polegały głównie na wyznaczaniu różnych charakterystyk. Nie badano tych elementów pod względem uszkodzeń mechanicznych wynikających z eksploatacji.

Badania przeprowadzone w pracy pozwoliły odpowiedzieć na pytanie, jakie uszkodzenia i zużycia belki zawieszenia, wahacza, drążka stabilizatora i sprężyny McPhersona występują podczas intensywnego eksploataowania samochodu w różnych warunkach i z różnym obciążeniem.

Jak już wspomniano, w ramach badań laboratoryjnych w pierwszej kolejności wykonano obserwacje makroskopowe, które pozwoliły ocenić charakter i wielkość uszkodzeń lub zużyć. Badania te wykazały w głównej mierze obecność ognisk korozyjnych, które niejednokrotnie były przyczyną pęknięć zmęczeniowych.

Odnotowano też uszkodzenia mechaniczne w postaci wgnieceń materiału i odkształceń plastycznych.

Miejsca belki zawieszenia zajęte przez ogniska korozyjne poddano obserwacjom mikroskopowym i analizie składu chemicznego produktów zużycia. Badania te wykazały obecność atomów tlenu odpowiedzialnych za utlenianie powierzchni oraz obecność atomów chloru i krzemu, które sugerują jazdę samochodem po drodze nieutwardzonej i po drodze pokrytej materiałami uszorstniającymi nawierzchnię.

Pomiar profilu powierzchni belki i drążka stabilizatora pozwolił ocenić wpływ zaobserwowanych uszkodzeń na wartość chropowatości powierzchni. Badania wykazały wzrost parametrów chropowatości powierzchni zajętej przez zużycie w stosunku do powierzchni prawidłowej.

Podobnie pomiar twardości powierzchni belki pozwolił ocenić wpływ warunków eksploatacji oraz wynikających z niej uszkodzeń na zmianę wartości twardości. Na podstawie przeprowadzonych badań należy wnioskować, że różnica wartości twardości pomiędzy obszarem zajęтым przez zużycie a obszarem bez zmian zużyciowych jest niewielka i nie wpływa znacząco na pogorszenie stanu technicznego elementu. Badania mikroskopowe złącza spawanego znajdującego się na belce nie wykazały pęknięć ani innych wad, zaś pomiar twardości złącza nie ujawnił dużych różnic wartości między spoiną a materiałem rodzimym. Należy zatem wnioskować, że połączenie spawane zostało wykonane prawidłowo i charakteryzuje się dużą odpornością na zużycie.

Badania makroskopowe tulei metalowo-gumowych wahacza wykazały liczne uszkodzenia i zużycia zarówno części metalowej, jak i gumowej. W części metalowej uwidoczniono ogniska korozyjne oraz wykruszenia materiału, a w części gumowej zauważono różnej wielkości pęknięcia i procesy starzenia się gumy. Charakterystyki promieniowe i osiowe tulei metalowo-gumowych wykazały mniejszą sztywność nowych tulejek w stosunku do sztywności tulejek eksploatowanych.

Obserwacje makro- i mikroskopowe sprężyny McPhersona wykazały pęknięcia zmęczeniowe na pierwszym zwoju, których przyczyną były ogniska korozyjne tworzące się na powierzchni niezabezpieczonej warstwą ochronną.

W pracy nie badano wpływu zachowania kierowców na uszkodzenia i zużycia elementów układu zawieszenia. Uwzględniając wieloletnie doświadczenie zawodowe Autora, rzeczoznawcy samochodowego wykonującego analizy rekonstruuje od strony technicznej drogowe zdarzenia komunikacyjne, a także bezpośrednią obserwację kierujących podczas prowadzenia egzaminów kierowców i kandydatów na kierowców można wnioskować, że istotny wpływ na rozpoznane w czasie przeprowadzonych badań uszkodzenia oraz zużycia elementów układu zawieszenia mają umiejętności prowadzenia pojazdu przez kierowcę. Nieodzownym elementem kierowania pojazdem jest jazda z prędkością bezpieczną, która zapewnia panowanie nad pojazdem z uwzględnieniem warunków, w jakich ruch się odbywa. Należy uwzględniać stan i widoczność drogi, ładunek pojazdu, warunki środowiskowe oraz natężenie ruchu. Zachodzą wtedy możliwości reagowania na zmienny stan nawierzchni czy rozpoznanie niespodziewanych przeszkód, jak dziury w drodze, kałuże o nierozpoznawalnym podłożu, elementy kruszywa, gruntu wwieszonego przez inne pojazdy na drogę. Zachowanie tych zasad ograniczy uszkodzenia i zużycia elementów układu zawieszenia.

9.1. Wnioski o charakterze poznawczym

Celem pracy była ocena wpływu warunków eksploatacji pojazdu na zaistnienie uszkodzeń oraz inicjację i rozwój zużycia elementów układu zawieszenia. Na podstawie przeprowadzanych obserwacji oraz badań można wyciągnąć następujące wnioski o charakterze poznawczym:

- 1) Decydujący wpływ na stan techniczny układu zawieszenia w pojeździe mają warunki drogowe i środowiskowe oraz umiejętność kierowania pojazdem.
- 2) Rozwijające się uszkodzenia elementów układu zawieszenia mogą doprowadzić do nagłego pęknięcia zmęczeniowego elementu, a w efekcie do zdarzenia drogowego.
- 3) Powierzchnia belki zawieszenia narażona jest na uszkodzenia mechaniczne wynikające z braku umiejętności kierowania pojazdem lub najechania na nieoczekiwaną przeszkodę znajdującą się na jezdni.
- 4) Na belce zawieszenia widoczne są ogniska korozyjne zlokalizowane w głównej mierze w miejscu połączenia z drążkiem stabilizatora. Zużycie to powoduje zmianę parametrów chropowatości, podwyższając ich wartość i wpływając niekorzystnie na stan techniczny elementu.
- 5) Analiza składu chemicznego produktów zużycia znajdujących się w miejscu łączenia belki z drążkiem stabilizatora wykazała obecność takich pierwiastków jak: tlen, chlor i krzem. Obecność tych pierwiastków świadczy o kontakcie powierzchni z powietrzem atmosferycznym, środkami uszorstniającymi jezdnię oraz piaskiem.
- 6) Złącza spawane łączące wytłoczki belki po długim czasie eksploatacji wykazują brak pęknięć i innych wad, a także charakteryzują się dużą trwałością i niezawodnością.
- 7) Głównym zużyciem drążków stabilizatora są ogniska korozyjne zlokalizowane w miejscu łączenia z belką zawieszenia. Powierzchnie te charakteryzują się znacznym wzrostem parametrów chropowatości.
- 8) Na uszkodzenia wahaczy składają się w głównej mierze odkształcenia plastyczne losowo rozmieszczone na całej powierzchni. Przyczyną tworzenia się tych odkształceń są nieczystości znajdujące się na drodze oraz jazda po drodze żwirowej.
- 9) Tuleje metalowo-gumowe wahacza charakteryzują się uszkodzeniami w postaci ognisk korozyjnych oraz naturalnego starzenia się gumy i licznych pęknięć na jej powierzchni o zróżnicowanej wielkości.
- 10) Pomiar charakterystyk osiowych i promieniowych tulei metalowo-gumowych wykazał mniejszą sztywność nowych tulejek gumowych w stosunku do tulejek eksploatowanych w całym cyklu badawczym.
- 11) Mechanizm pękania sprężyn McPhersona polega na zniszczeniu warstwy ochronnej, następnie inicjacji ognisk korozyjnych prowadzących z czasem do rozwoju zużycia zmęczeniowego i w konsekwencji do pęknięcia sprężyny. Miejsmem najbardziej narażonym na pęknięcie sprężyny jest pierwszy zwój sprężyny.

9.2. Wnioski o charakterze użytkowym

Układ zawieszenia jest jednym z najważniejszych elementów konstrukcyjnych odpowiedzialnych za komfort i bezpieczeństwo jazdy, a jego stan techniczny istotnie zależy od czynników zewnętrznych występujących podczas jazdy samochodu.

Wyniki badań potwierdzają konieczność przeprowadzania wnikliwych ocen stanu technicznego tego układu, podczas napraw doraźnych, a w szczególności w trakcie obowiązkowych badań diagnostycznych, ponieważ pozwalają wykryć uszkodzenia elementów układu zawieszenia będące przyczyną rozwoju pęknięć zmęczeniowych.

Nieoczekiwane uszkodzenie elementów układu zawieszenia podczas jazdy może doprowadzić do zdarzenia drogowego.

9.3. Wnioski dotyczące dalszych badań

W niniejszej pracy ograniczono się jedynie do zbadania wpływu warunków eksploatacji pojazdu na rozwój zużycia elementów układu zawieszenia.

Dalsze badania obejmujące problematykę eksploatacji elementów układu zawieszenia powinny obejmować następujące zagadnienia:

- 1) Ocenę rodzajów zużycia belki zawieszenia w miejscu łączenia drążka stabilizatora pod kątem możliwości występowania zużycia frettingowego.
- 2) Dobór odpowiednich procesów technologicznych, właściwości materiałowych lub powłok ochronnych w celu ograniczenia rozwoju uszkodzeń i zużycia w strefie łączenia elementów, głównie w miejscu łączenia belki z drążkiem stabilizatora.
- 3) Zastawanie niekonwencjonalnych materiałów inżynierskich bądź ulepszenie obecnie stosowanych elementów gumowych w tulei metalowo-gumowej drążka stabilizatora.
- 4) Zastosowanie inhibitorów korozji podczas przeglądów technicznych oraz serwisowych pojazdu w celu ograniczenia rozwoju ognisk korozyjnych na elementach układu zawieszenia.

Bibliografia

- ABC – Active Body Control – co to jest? Pobrano z: lokalizacji www.autocentrum.pl.
- Agharkali, A., Sabet, G.S., Barouz, A. (2012). Simulation and analysis of passive and active suspension system using quarter car model for different road profile. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 3, 636-644.
- Anandakumar, C., Timmaraju, M.V., Velmurugan, R. (2021). Development of efficient short/continuous fiber thermoplastic composite automobile suspension upper control arm. *Materials Today: Proceedings*, 39, 1187-1191.
- Andrade, C.A., Jesus, A.C., Vimieiro, C.B.S. (2015). Stress analysis at the critical points of a stabilizer bar. *European International Journal of Science and Technology*, 4(6), 105-112.
- Balamurugan, L., Jancirani, J., Eltantawie, M.A. (2014). Generalized magnetorheological (MR) damper model and its application in semi-active control of vehicle suspension system. *International Journal of Automotive Technology*, 15(3), 419-427.
- Balasubramaniam, B.P.R., Mahapatra, S., Dwivedi, G. (2009). Fretting and fretting corrosion behavior of novel micro alloyed rail steels. *Wear*, 267(9-10), 1702-1708.
- Berthier, Y., Vincent, L., Godet, M. (1989). Fretting fatigue and fretting wear. *Tribology International*, 22(4), 235-242.
- Burdzik, R., Konieczny, Ł., Adamczyk, B. (2014). Automatic control systems and control of vibrations in vehicles car. *Communications in Computer and Information Science*, 471, 120-129.
- Burdzik, R., Sobczak, P. (2008). Methods of defects classification of passenger cars shock-absorbers. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej. Seria Transport*, 85-92.
- Carvalho, L., Santos, S., Ferreira, C. (2018). A new methodology for detection of a loose or worn ball joints used in vehicles suspension system. Proceedings of the 1st Iberic Conference on Theoretical and Experimental Mechanics and Materials. Porto.
- Chin, C.H., Abdullah, S., Singh, S.S.K., Ariffin, A.K., Schramm, D. (2020). Durability assessment of suspension coil spring considering the multifractality of road excitations. *Measurement*, 158, 107697.
- Chmielik, I.P., Czarnecki, H. (2015). Evaluation of gear tooth 3D surface topography. *Mechanik*, 101-110.
- Curà, F., Mura A. (2017). Evaluation of the fretting wear damage on crowned splined. *Procedia Structural Integrity*, 5, 1393-1400.
- Czarna, M. (2013). Przegląd środków chemicznych stosowanych w zimowym utrzymaniu dróg w Polsce. *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Zielonogórskiego*, 31, 18-25.
- Dahiphale, M., Chopade, Y., Patil, C., Pathan, F.U. (2016). Active body control suspension. *International Journal of Advanced Technology in Engineering and Science*, 3, 389-395.
- Dąbrowski, K. (2018). Algorytmizacja adaptacyjnego sterowania tłumieniem zawieszenia samochodu dla uwzględnienia zmienności warunków eksploatacji. Poznań: Rozprawa doktorska. Politechnika Poznańska.
- Devdutt, Aggarwal, M.L. (2015). Fuzzy control of passenger ride performance using MR shock absorber suspension in quarter car model. *International Journal of Dynamics and Control*, 3, 463-469.
- Diagnostowanie układu zawieszenia pojazdu samochodowego. (cz. 3). Pobrano z: <https://warsztat.pl/artykuly/diagnostowanie-ukladu-zawieszenia-pojazdusamochodowego-cz-3>.
- Dishant, Er., Parminder, Singh, Er. Mohit Sharma. (2017). Suspension Systems: A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology*, 04, 1377-1382.

- Drozd, K. (2003). Causes of leaf spring's damages verifiable analysis. *Eksploracja i Niezawodność*, 2, 24-27.
- Feng, I.M., Rightmire, B.G. (1953). The mechanism of fretting. *Lubrication Engineering*, 9, 158-160.
- Floreán-Aquino, K.H., Arias-Montiel, M., Linares-Flores, J., Mendoza-Larios, J.G., Cabrera-Amado, A. (2021). Modern semi-active control schemes for a suspension with. *Actuators*, 10(22), 1-23.
- Gabrylewicz, M. (2015). *Podwozia i nadwozia pojazdów samochodowych. Podstawy budowy, diagnozowania i naprawy*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności.
- Galluzzi, R., Circosta, S., Amati, N., Tonoli, A. (2021). Rotary regenerative shock absorbers for automotive suspensions. *Mechatronics*, 77, 102580.
- Gardulski, J., Warczek, J. (2003). *Identyfikacja stanu technicznego hydraulicznego amortyzatora teleskopowego na podstawie analizy jego charakterystyki*. XXX Jubileuszowe Ogólnopolskie Sympozjum Diagnostyka Maszyn. Węgierska Górka.
- Grzesik, W. (2015). Effect of the machine parts surface topography features on the machine service. *Mechanik*, 8-9, 587-593.
- He, H., Li, Y., Jiang, J.Z., Burrow, S., Neild, S., Conn, A. (2021). Using an inerter to enhance an active-passive-combined vehicle suspension. *International Journal of Mechanical Sciences*, 204, 106535.
- Ho, C.M., Tran, D.C., Ahn, K.K. (2021). Adaptive sliding mode control based nonlinear disturbance observer for active suspension with pneumatic spring. *Journal of Sound and Vibration*, 509, 116241.
- Holliday, J.S., Hirst, W. (1956). *The fretting corrosion of mild steel* (vol. 236). Londyn: Proc. of the Roy. Soc. Ser. A.
- Jankowski, L.J., Reksa, M. (2019). Application of the Photoelastic Coating Technique in Car. *Experimental Mechanics of Solids*, 12, 65-70.
- Jaśkiewicz, M., Więckowski, D. (2018). Constructional solutions for active suspensions used. *Autobusy*, 9, 225-229.
- Jirenga, I., Sirata, G. (2020). A review of the vehicle suspension system. *Journal of Mechanical and Energy*, 4(44), 109-114.
- Junik, K., Lesiuk, G., Barcikowski, M., Błazejewski, W., Niemiec, A., Grobelny, M., Otczyk, K., Correia, J.A.F.O. (2021). Impact of the hardness on the selected mechanical properties of rigid polyurethane elastomers commonly used in suspension systems. *Engineering Failure Analysis*, 121, 105201.
- Kaczor, G., Lorenc, A. (2012). Application of Reliability Phase Diagrams to Determine the Reliability. *Problemy eksploatacji*, 3, 29-37.
- Kelly, V.R., Lovett, G.M., Weathers, K.C., Findlay, S.E., Strayer, D.L., Burns, D.J., Liekens, G.E. (2008). Long-term sodium chloride retention in a rural watershed: Legacy effects of road salt on stream water concentration. *Environmental Science and Technology*, 42, 410-415.
- Kong, Y., Bennett, C.J., Hyde, C.J. (2022). A computationally efficient method for the prediction of fretting wear in practical engineering applications. *Tribology International*, 165, 107317.
- Konieczny, Ł., Burdzik, R. (2017). Modern suspension systems for automotive vehicles and their test methods. *VIBROENGINEERING PROCEDIA*, 14, 233-237.
- Kowalski S. (2016). Application of dimensional analysis in the fretting wear studies. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 22(4-I), 3823-3835.
- Kowalski, S. (2018). Assessment of the possibility of the application of a CrN+ OX multi-layer coating to mitigate the development of fretting wear in a press-fit joint. *Wear*, 398, 13-21.
- Kowalski, S. (2018). Fretting wear in selected elements of rail vehicles. *Tehnicky Vjesnik*, 481-486.

- Kowalski, S. (2018). The influence of selected PVD coatings on fretting wear in a clamped joint based on the example of a rail vehicle wheel set. *Eksploatacja i Niezawodność*, 20(1), 1-8.
- Kowalski, S. (2020). Failure analysis of the elements of a forced-in joint operating in rotational bending conditions. *Engineering Failure Analysis*, 118, 104864.
- Kowalski, S. (2021). Assessment of the condition of the finish-rolled shaft top layer for fretting wear development. *Journal of the Balkan Tribological Association*, 27(5), 778-799.
- Kowalski, S. (2021). Influence of diamond-like carbon coatings on the wear of the press joint components. *Wear*, 486-487, 204076.
- Kowalski, S. (2021). The analysis of fretting wear in forced-in joint with the induction-hardened shaft. *Tribologia*, 38(1-2), 11-21.
- Kowalski, S., Cygnar, M. (2019). The application of TiSiN/TiAlN coatings in the mitigation of fretting wear in push fit joints. *Wear*, 426-427, 725-734.
- Kowalski, S., Cygnar, M., Cieślowski, B. (2020). Analysis of the application of ZrN coatings for the mitigation of the development of fretting wear processes at the surfaces of push fit joint elements. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: *Journal of Engineering Tribology*, 234(8), 1208-1221.
- Kowalski, S., Pexa, M., Aleš, Z., Čedík, J. (2021). Failure analysis and the evaluation of forced-in joint reliability for selected operation conditions. *Coatings*, 11(11), 1305.
- Kuśkowska, A., Patyk, R. (2011). Calculations of springs fatigue wear resistance using in McPherson's column. *Autobusy*, 5, 253-258.
- Kuśkowska, A., Patyk, R. (2011). Numerical calculations of leaf spring durability. *Autobusy*, 5, 247-252.
- Kumar, Y., Siddiqui, R.A., Upadhyay, Y., Prajapati, S. (2021). Kinematic and Structural Analysis of Independent type suspension system with Anti-Roll bar for Formula Student Vehicle. Materials Today: Proceedings, str. Article in press.
- Kupiec, A., Kupiec, J., Jęsień, Ł. (2018). Analysis of the causes of failures in trucks. *Autobusy*, 12, 115-120.
- Kuranc, A. (2009). Diagnostic vehicle suspension testing in the aspect of changes in operating parameters. *Inżynieria Rolnicza*, 8(117), 99-106.
- Lawrowski, Z. (2009). *Tribologia. Tarcie, zużywanie i smarowanie*. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Li, H., Li, S., Sun, W., Wang, L., Lv, D. (2020). The optimum matching control and dynamic analysis for air suspension of multi-axle vehicles with anti-roll hydraulically interconnected system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 139, 106605.
- Liss, M., Żółtowski, B. (2014). Modal analysis as method of body car condition diagnosis. *Developments in Mechanical Engineering*, 3(2), 21-28.
- Lozoya-Santos, J., Morales-Menendez, R., Tudón-Martínez, J.C., Sename, O., Dugard, L., Ramirez-Mendoza, R. (2011). *Control strategies for an automotive*. Preprints of the 18th IFAC World Congress Milano (Italy) August 28 – September 2, 1820-1825.
- Macha, E., Niesłony, A. (2010). *Niezawodność systemów mechatronicznych*. Opole: Oficyna wydawnicza Politechniki Opolskiej.
- Matuszewski, M. (2013). *Kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni w transformacji warstwy wierzchniej*. Bydgoszcz: Wydawnictwa Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego.
- Mazur, N. (2015). Wpływ soli do odladzania dróg na środowisko przyrodnicze. *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 18(4), 449-458.
- Melnik, R., Koziak, S., Dižo, J. (2018). Simulation analysis of the selected control algorithms. *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Seria: Transport*, 121, 245-256.

- Michalski, J., Wojewoda, P. (2015). Wpływ uszkodzeń autobusów oraz ich układów na bezpieczeństwo drogowego systemu transportowego komunikacji miejskiej. *Logistyka*, 4, 4881-4887.
- Modeling the Concord Stage Coach*. Pobrano z: https://modelexpo-online.com/assets/images/documents/MS6001_Stagecoach_Instruction_-_WEB.pdf.
- Nabagło, T. (2006). *Synteza układu sterowania semiaktywnego zawieszenia samochodu z elementami magnetoreologicznymi*. Kraków: Praca Doktorska. Politechnika Krakowska.
- Nagentrau, M., Tobi A.L.M., Jamian, S., Otsuka, Y., Hussin, R. (2021). Delamination-fretting wear failure evaluation at HAp-Ti-6Al-4V interface of uncemented artificial hip implant. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 122, 104657.
- Nagentrau, M., Tobi, A.L.M., Jamian, S., Otsuka, Y., Hussin, R. (2021). Delamination-fretting wear failure evaluation at HAp-Ti-6Al-4V interface of uncemented artificial hip implant. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 122, 104657.
- Neyman, A. (2003). *Fretting w elementach maszyn*. Gdańsk: Wydawnictwa Politechniki Gdańskiej.
- Niemczewska-Wójcik, M. (2018). *Dualny system charakteryzowania powierzchni technologicznej i eksploatacyjnej warstwy wierzchniej elementów trących*. Radom: Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB.
- Niemczewska-Wójcik, M., Pethuraj, M., Uthayakumar, M., Shukry, Abdul Majid, M. (2022). Characteristics of the surface topography and tribological properties of reinforced aluminum matrix composite. *Materials*, 15(1), 358.
- Niemczewska-Wójcik, M., Piekoszewski, W. (2017). The surface topography of a metallic femoral head and its influence on the wear mechanism of a polymeric acetabulum. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(2), 307-317.
- Niewczas A., Iganciuk P., Dmowski A. (2016). The analysis of damages and the costs of the repair of the chosen arrangements of constructional the delivery the truck. *Autobusy*, 11, 122-125.
- Okafor, C.E., Oghenemaero, O.O., Chukwuebuka, M., Isaac, O.O. (2020). Adaptive design of a universal automotive ball joint separating device. *Transportation Engineering*, 2, 100010.
- Omar, M., El-kassaby, M.M., Abdelghaffar, W. (2017). A universal suspension test rig for electrohydraulic active and passive automotive suspension system. *Alexandria Engineering Journal*, 56, 359-370.
- Pawlus, P. (2006). *Topografia powierzchni – pomiar, analiza, oddziaływanie*. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej.
- Pawłowski, B. (2018). Selected aspect of testing of geometric parameters of suspensions and bodies. *Autobusy*, 6, 664-648.
- Piec, P. (2004). *Badania eksploatacyjne elementów i zespołów pojazdów szynowych*. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej.
- Putra, T.E., Husaini, Ikbal, M. (2021). Automotive suspension component behaviors driven on flat and rough. *Heliyon*, 7, e07528.
- Qin, B., Chen, Y., Chen, Z., Zuo, L. (2022). Modeling, bench test and ride analysis of a novel energy-harvesting hydraulically interconnected suspension system. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 166, 108456.
- Reimpell, J., Betler, J. (2008). *Podwozia samochodów. Podstawy konstrukcji*. Warszawa: Wydawnictwo Łączności i Komunikacji.
- Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej w sprawie zakresu i sposobu przeprowadzania badań technicznych pojazdów oraz wzorów dokumentów stosowanych przy tych badaniach.
- Rubach, M., Waluś, K.J. (2018). The system of removing slush in passenger cars – a concept. *Autobusy*, 12, 217-220.

- Ryś, D., Judycki, J., Jaskuła, P. (2016). Influence of road roughness and dynamic effects of commercial vehicles on fatigue life of flexible pavements. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury. Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture*, 63, 291-298.
- Shen, F., Ke, L.-L., Zhou, K. (2021). A debris layer evolution-based model for predicting both fretting wear and fretting fatigue lifetime. *International Journal of Fatigue*, 142, 105928.
- Singh, D. (2018). Passenger body vibration control in active quarter car model using ANFIS based super twisting sliding mode controller. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 89, 100-118.
- Słowiński, B. (2014). *Inżynieria eksploatacji maszyn*. Koszalin: Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej.
- Soliman, A.M.A., Kaldas, M.M.S. (2021). Semi-active suspension systems from research to mass-market – A review. *Journal of Low Frequency Noise, Vibration and Active Control*, 40(2), 1005-1023.
- Szczerek, M. (1997). *Metodologiczne problemy systematyzacji eksperymentalnych badań tribologicznych*. Radom, Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB.
- Szutarski, P. (2006). *Wpływ luzu w układzie zawieszenia przedniego samochodu osobowego na bezpieczeństwo jego ruchu*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- Ślaski, G., Pikosz, H. (2010). The problem of vehicle load changes in vehicle suspension damping ratio choice. *Archiwum Motoryzacji*, 1, 35-44.
- Taksande, S.P., Vanalkar, A.V. (2015). Design and Modeling of Car Front Suspension Lower Arm. *IJIRST – International Journal for Innovative Research in Science & Technology*, 2(2), 249-253.
- Tavares, R., Molina, J.V., Sakka, M.A., Dhaens, M., Ruderman, M. (2019). Modeling of an active torsion bar automotive suspension for ride comfort and energy analysis in standard road profiles. *IFAC-PapersOnLine*, 52-15, 181-186.
- Thesleff, A., Ortiz-Catalan, M., Brånemark, R. (2022). Low plasticity burnishing improves fretting fatigue resistance in bone-anchored implants for amputation prostheses. *Medical Engineering and Physics*, 100, 103755.
- Tomala, A., Łazarz, B., Czech, P., Matyja, T., Witaszek, M. (2015). Impact of road surface on whole-body vibration in a car and a supply of classic suspension. *Technika Transportu Szynowego*, 12, 1546-1150.
- Varma, N., Ahuja, R., Vijayakumar, T., Kannan, C. (2021). Design and analysis of composite mono leaf spring for passenger cars. *Materials Today: Proceedings*, 7090-7098.
- Venkatesh, A.P., Padmanabhan, S., Allen Rufus, C., Mohammed Lukmaan, H., Abdul Rahman, A.R. (2021). Exploration of fatigue and modal analysis on mono leaf suspension made by natural composite materials. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4262-4267.
- Walczak, S. (2003). *Analiza dynamicznych obciążeń różnych typów niezależnego zawieszenia kół samochodu*. Kraków: Praca doktorska. Politechnika Krakowska.
- Walczak, S. (2004). Dynamic loads of front car suspensions when crossing a single cleat. *Czasopismo Techniczne. Mechanika*, 7M, 663-670.
- Walczak, S. (2006). Dynamical loads of rear car suspensions when crossing single cleat. *Zeszyty Naukowe Politechniki Świętokrzyskiej. Mechanika*, 84, 329-337.
- Waterhouse, R.B. (1972). *Fretting corrosion*. Oxford: Pergamon Press Ltd.
- Waterhouse, R.B. (1981). *Fretting fatigue*. Londyn: Applied Science Publishers Ltd.
- Wicher, J. (2012). *Bezpieczeństwo samochodów i ruchu drogowego*. Warszawa: Wydawnictwo Łączności i Komunikacji.
- Wieczorowski, M. (2009). *Wykorzystanie analizy topograficznej w pomiarach nierówności powierzchni*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.

- Wiśniewski, A. (2016). *Modelowanie losowych wymuszeń kinematycznych drogi*. Poznań: Praca dyplomowa. Politechnika Poznańska.
- Witek, A.M., Gaska, D., Łazarz, B., Matyja, T. (2016). Coil springs in passenger cars – general theoretical principles. *The Archives of Automotive Engineering – Archiwum Motoryzacji*, 72(2), 141-158.
- Woropay, M., Bojar, P. (2007). The analysis and the estimation of damages in chosen subsystems of buses and their influence on threats in the urban public transport. *Archiwum Motoryzacji*, 2, 159-168.
- Wysocki, J. (2019). *Resory metalowe w zawieszeniach samochodów ciężarowych. Doskonalenie obliczeń i badania właściwości*. Warszawa: BEL Studio Sp. z o.o.
- Xiao, L., Xu, Y., Sun, X., Xu, H., Zhang, L. (2022). Experimental investigation on the effect of misalignment on the wear failure for spline couplings. *Engineering Failure Analysis*, 131, 105755.
- Yan, G., Fang, M., Xu, J. (2019). Analysis and experiment of time-delayed optimal control for vehicle suspension system. *Journal of Sound and Vibration*, 446, 144-158.
- Zarządzenie nr 31 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 5 września 2017 r. w sprawie wprowadzenia „Wytycznych zimowego utrzymania dróg”.
- Zarządzenie nr 7 Generalnego Dyrektora Dróg Krajowych i Autostrad z dnia 19 stycznia 2018 r. w sprawie wytycznych bieżącego utrzymania oraz prowadzenia czynności utrzymaniowych na drogach krajowych.
- Zdziennicki, Z., Maciejczyk, A. (2011). Unconventional method of automotive vehicles reliability determination. *Logistyka*, 3, 3121-3126.
- Zhang, B., Tan, C.A., Dai, T. (2021). Ride comfort and energy dissipation of vehicle suspension system under non-stationary random road excitation. *Journal of Sound and Vibration*, 511, 116347.
- Zhang, H., Winner, H., Li, W. (2009). Comparison between skyhook and minimax control strategy for semi-active suspension system. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 55, 624-627.
- Zhao, L.H., Zheng, S.L., Feng, J.Z. (2014). Failure mode analysis of torsion beam rear suspension under service conditions. *Engineering Failure Analysis*, 36, 39-48.
- Zhu, T., Yan, Z., Peng, X. (2016). A Weibull failure model to the study of the hierarchical Bayesian reliability. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*, 18(4), 501-506.
- Zhu, Y., Wang, Y., Huang, Y. (2014). Failure analysis of a helical compression spring for a heavy. *Case Studies in Engineering Failure Analysis*, 2, 169-173.
- Zieliński, A. (2009). *Samochody osobowe. Dzieje rozwoju*. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności Sp. z o.o.
- Zou, L., Zeng, D., Wang, J., Lu, L., Li, Y., Zhang, Y. (2020). Effect of plastic deformation and fretting wear on the fretting fatigue of scaled railway axles. *International Journal of Fatigue*, 132, 105371.
- Zwierzycki, W., Grądkowski, M. (red.). (2000). *Fizyczne podstawy doboru materiałów na elementy maszyn współpracujące tarciowo*. Radom: Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB.
- Żebrowski-Kozioł, M., Tarnowski, W. (2009). Diagnostowanie stanu luzów w połączeniach przegubowych przedniego zawieszenia samochodu. *Acta mechanica et automatica*, 3(2), 122-124.