



POLITECHNIKA KRAKOWSKA im. T. Kościuszki
Wydział Mechaniczny
Katedra Pojazdów Szynowych i Transportu



PRACA DOKTORSKA

**Badanie wybranych czynników wpływających na trwałość
obręczy kół tramwajowych**

mgr inż. Tymoteusz RASIŃSKI

Promotor naukowy: **dr hab. inż. Grzegorz Zając prof. PK**

Promotor pomocniczy: **dr inż. Augustyn Lorenc**

Kraków, 2024

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń.....	5
1. Wstęp.....	7
2. Problem badawczy	9
2.1. Charakterystyka tramwajowych zestawów kołowych.....	9
2.2. Stosowane profile obręczy kół tramwajowych	12
2.3. Tramwajowa nawierzchnia toru.....	16
2.4. Współpraca elementów w układzie koło-szyna	20
2.5. Zagadnienia związane z bezpieczeństwem	25
2.6. Modyfikatory tarcia.....	27
2.6.1. Systemy smarowania zabudowane w układzie torowym	30
2.6.2. Systemy smarowania zabudowane w pojeździe	32
2.6.3. Piasecznice	35
2.7. Charakterystyczne procesy zużycia występujące na obręczach kół tramwajowych.....	36
2.8. Klasyfikacja stanów technicznych obiektów	41
2.9. Analiza stanu wiedzy	45
3. Cel i zakres pracy	52
4. Badania probabilistyczne w zakresie trwałości obręczy eksploatowanych w wagonach tramwajowych	53
4.1. Cechy geometryczne układu biegowego tramwaju zalecane do monitoringu ...	53
4.2. Określenie trwałości umownej dla eksploatowanych obręczy tramwajowych ...	59
5. Badania laboratoryjne wybranych modyfikatorów tarcia występujących w układzie koło – szyna.....	71
5.1. Obiekty badań.....	72
5.2. Statystyczna ocena wyników badań.....	74
5.3. Badania modelowych kompozycji badawczych na testerze tribologicznym T-02U	75
5.3.1. Metodyka badawcza	77

5.3.2. Wyznaczenie sił działających na koło tramwajowe.....	78
5.3.3. Przebieg badań oraz analiza uzyskanych wyników.....	79
5.4. Analiza struktury geometrycznej śladów wytarcia powstałych na kulkach pomiarowych	120
6. Podsumowanie i wnioski	171
7. Bibliografia	174
Streszczenie	181
Summary.....	182

Wykaz ważniejszych oznaczeń

- DTR** – dokumentacja techniczno-ruchowa
- PGS** – poziom główki szyny
 - Y** – siła poprzeczna nacisku koła
 - Q** – siła pionowego nacisku koła
 - μ** – współczynnik tarcia
 - f** – współczynnik przyczepności
 - γ** – kąt pochylecia obrzeża koła jezdnego
- RCF** – zużycie zmęczeniowe wywołane kontaktem tocznym
- LCF** – modyfikator o niskim współczynniku tarcia
- HPF** – modyfikator o wysokim współczynniku tarcia
- VHPF** – modyfikator o bardzo wysokim współczynniku tarcia
 - H_w** – twardość koła jezdnego
 - H_r** – twardość szyny
- X(t, a)** – wektor cech struktury wewnętrznej po okresie eksploatacji t w warunkach a
- Y(t, a)** – wektor cech diagnostycznych obiektu po okresie eksploatacji t w warunkach a
 - S_z** – stan zdatności pojazdu szynowego
 - S_{zwm}** – n-ty stan zdatności warunkowej pojazdu szynowego
 - S_{npz}** – stan niepełnej zdatności pojazdu szynowego
 - S_{ncz}** – stan niecałkowitej zdatności pojazdu szynowego
 - S_{nz}** – stan niezdatności pojazdu szynowego
 - d** – długość prowadna zestawu kołowego
 - g** – grubość obrzeża koła
 - h** – wysokość obrzeża koła
 - b** – szerokość obrzeża obręczy
 - p** – rozstaw wewnętrznych płaszczyzn czołowych obręczy
 - D** – średnica toczna koła, odniesienie jej do wartości minimalnej
 - ΔD** – różnica średnicy kół w zestawie kołowym lub osi rozprężonej
 - ΔD_w** – maksymalna różnica średnic kół w wózku
 - ΔD_p** – maksymalna różnica średnic kół w pojeździe
 - d_{sr}** – średnia średnica skaz na powierzchni kulek pomiarowych
 - P_{oz}** – graniczne obciążenie zatarcia
 - p_{oz}** – graniczny nacisk zatarcia
 - P_t** – obciążenie zacierające, które określa trwałość filmu smarowego
- SGP** – struktura geometryczna powierzchni
 - Ra** – średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości
 - Rz** – największa wysokość profilu chropowatości

- Rp** – wysokość najwyższego wzniesienia profilu chropowatości
- Rv** – głębokość najniższego wgłębienia profilu chropowatości
- Rc** – średnia wartość wysokości elementów profilu chropowatości
- Rt** – całkowita wysokość profilu chropowatości pomiędzy szczytem najwyższego wzniesienia, a najniższym wgłębieniem profilu
- Rq** – średnie kwadratowe odchylenie profilu chropowatości
- Rsk** – współczynnik asymetrii profilu chropowatości
- Rku** – współczynnik nachylenia profilu chropowatości
- Rsm** – średnia szerokość rowków profilu chropowatości
- Rdq** – średni kwadratowy wznios profilu chropowatości
- Sa** – średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości powierzchni
- Sz** – maksymalna wysokość chropowatości powierzchni
- Sq** – średnie kwadratowe odchylenie chropowatości powierzchni
- Ssk** – współczynnik asymetrii chropowatości powierzchni
- Sku** – współczynnik nachylenia chropowatości powierzchni
- Sp** – wysokość najwyższego wzniesienia chropowatości powierzchni
- Sv** – głębokość najniższego wgłębienia chropowatości powierzchni

1. Wstęp

Opracowania naukowe jednoznacznie wskazują, iż obecnie to sektor transportu, a zwłaszcza transport drogowy, odpowiada głównie za emisję gazów cieplarnianych, w tym dwutlenku węgla oraz innych zanieczyszczeń do atmosfery. Problem ten istotny jest zwłaszcza w dużych aglomeracjach miejskich, gdzie w warunkach zatorów drogowych, przy niewielkich prędkościach pojazdów, emisja zanieczyszczeń w odniesieniu do jednostki czasu oraz odległości jest największa. Dlatego też miasta starają się wdrażać szereg działań, mających na celu zapewnienie, zgodnie z zasadami zrównoważonego rozwoju, wysokiej jakości mobilności oraz promowanie miejskiego systemu transportowego, którego kluczowym elementem jest komunikacja tramwajowa.

Problem konkurencyjności tramwajowego systemu transportowego wobec samochodów osobowych wiąże się m.in. z zapewnieniem odpowiedniej niezawodności, o której w dużej mierze decyduje stan techniczny taboru oraz jakość nawierzchni torowej. Aspekty te są również kluczowe w przypadku utrzymania odpowiedniego bezpieczeństwa, a także zapewnienia efektywności ekonomicznej. Z punktu widzenia niezawodności realizacji przewozów, jednym z kluczowych obszarów jest miejsce styku koła z szyną, gdzie w wyniku eksploatacji zachodzą zjawiska zużycia elementów współpracujących, które zintensyfikowane są zwłaszcza podczas poruszania się wagonów po łukach o małym promieniu, wynikających z uwarunkowań urbanistycznych. Decydującymi czynnikami w tym zakresie są m.in. typ zastosowanego układu biegowego pojazdu, geometria profilu obręczy koła oraz szyny, materiały z jakich zostały one wykonane, typ styku i jego lokalizacja oraz siły występujące w tym układzie.

Stąd też prowadzone są liczne badania, mające na celu zmniejszenie intensywności tego procesu, z których większość skupia się na jakości współpracy elementów układu koło-szyna w ujęciu geometrycznym, poprzez odpowiedni dobór profilu koła jeźdźnego do eksploatowanych rodzajów szyn. Ważnym aspektem analizowanego zagadnienia jest także dobór materiałów o optymalnych właściwościach na współpracujące elementy układu koło – szyna. Jednakże działania te nie są wystarczające z uwagi, iż miejsce kontaktu koła z szyną stanowi otwarty węzeł tribologiczny, na który istotny wpływ mają również modyfikatory tarcia takie jak środki smarujące (stosowane na obrzeża oraz główki szyn), a także występujące na tramwajowej infrastrukturze torowej zanieczyszczenia zewnętrzne (m.in. woda, piasek, liście). Dlatego też istotnym jest dobór substancji smarujących o odpowiednich właściwościach tribologicznych, które w znaczący sposób wpłyną na zmniejszenie intensywności procesu zużycia, co w konsekwencji przełoży się na wydłużenie czasu eksploatacji obręczy kół tramwajowych, pozwalając tym samym na obniżenie kosztów obsługi tramwajowym operatorom transportu publicznego.

W przypadku badań nad ograniczaniem nadmiernego zużywania się elementów skojarzonych w układzie koło – szyna, koniecznym jest przyjęcie kompleksowego

podejścia do zagadnienia i jednoczesnej weryfikacji wielu czynników decydujących o tym procesie. Stąd w niniejszej pracy podjęto próbę zweryfikowania stosowanych typów rozwiązań konstrukcyjnych układu biegowego, w wybranych wagonach tramwajowych, pod kątem oceny ich wpływu na trwałość obręczy kół jezdnych. Przeprowadzono również, za pomocą modelowego skojarzenia badawczego, badania pozwalające określić właściwości tribologiczne wybranych modyfikatorów tarcia stosowanych w komunikacji tramwajowej. W konsekwencji działania te pozwoliły na opracowanie innowacyjnej substancji smarującej, która mogłaby zostać zastosowana do smarowania obrzeży kół jezdnych, celem ich mniejszego zużycia.

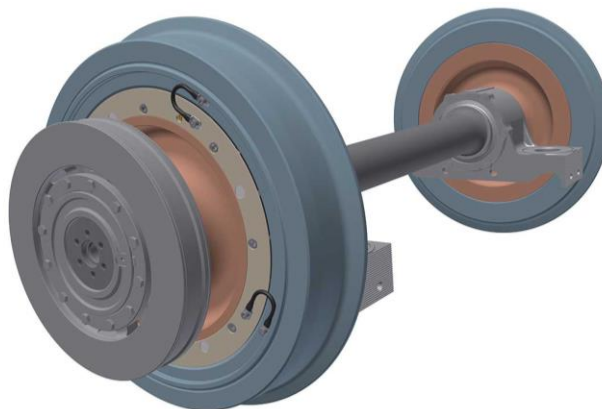
2. Problem badawczy

Wagon tramwajowy to złożony obiekt techniczny, który tworzą systemy układów funkcjonalnych, o określonym celu działania. Podstawowym układem decydującym o bezpiecznym i niezawodnym prowadzeniu pojazdu w torze jest jego układ biegowy (układ jezdny), którego kluczowym elementem konstrukcyjnym jest zestaw kołowy. Odpowiada on za realizację celów użytkowych, które można podzielić na podstawowe i pomocnicze. Do celów podstawowych zalicza się m.in. umożliwienie ruchu pojazdu po infrastrukturze torowej, przenoszenie ciężaru pojazdu wraz z ładunkiem na szyny, prowadzenie pojazdu po torze łukowym oraz prostym. Natomiast cele pomocnicze obejmują m.in. przenoszenie sił obwodowych, które pochodzą od układu napędowego, umożliwienie hamowania, a także przenoszenie obciążeń dynamicznych, będących skutkiem nierówności toru i jednocześnie zależnych od konstrukcji wagonu oraz prędkości jazdy [1].

2.1. Charakterystyka tramwajowych zestawów kołowych

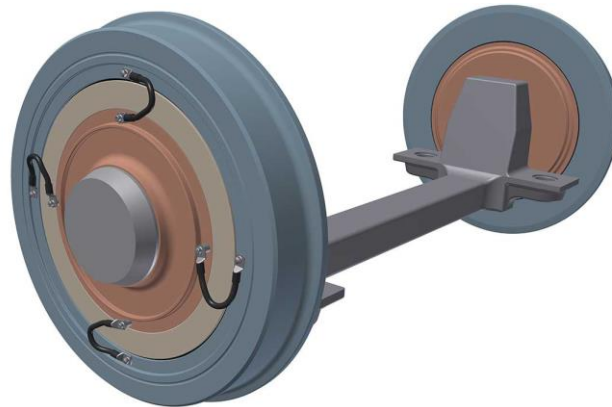
W zależności od zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego układu biegowego pojazdu wyróżniamy zestawy kołowe zabudowywane w wózkach napędowych, na które moment obrotowy jest przekazywany z zespołów napędowych, a także zestawy kołowe zabudowane w wózkach tocznych, które pełnią jedynie funkcję toczną. Ze względu na różnorodność konstrukcji zestawów kołowych, istnieje wiele rozwiązań z zabudowanymi dodatkowymi elementami takimi jak: tarcze hamulcowe, czujniki prędkości, styki uszyniające lub podzespoły mechanizmów napędowych [2], [3].

Obecnie w eksploatowanych wagonach tramwajowych wyróżnić można dwa rodzaje zestawów kołowych. Pierwszym z nich jest klasyczny zestaw kołowy, składający się z dwóch kół jezdnych (kół obręczowych), osadzonych na wspólnym wale osiowym (osi). Przykład takiego rozwiązania został zaprezentowany na rysunku (rys. 2.1). Rozwiązanie to stosowane jest w wózkach jezdnych nowoczesnych niskopodłogowych pojazdów tramwajowych.



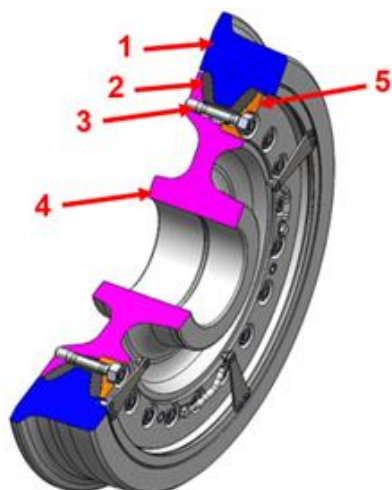
Rys. 2.1. Schemat klasycznego zestawu kołowego z zabudowanymi tarczami hamulcowymi po zewnętrznej stronie kół jezdnych [2]

Drugim powszechnie stosowanym rodzajem są zestawy z niezależnie obracającymi się kołami. W tym przypadku koła jezdne obracają się niezależnie względem siebie – są ułożyskowane i nie są sprzężone mechanicznie (powiązane sztywnym wałem osiowym). Koła jezdne zamontowane są na tzw. osi wykorbionej (portalowej) (rys. 2.2) lub zabudowywane na krótkich osiach łożyskowanych w kadłubach łożyskowych [4]. Zastosowanie tego typu rozwiązania jest konieczne ze względu na konstrukcję obniżonej podłogi w części lub na całej długości pojazdu.



Rys. 2.2. Schemat zestawu kołowego z niezależnie obracającymi się kołami na osi portalowej [2]

Początkowo konstrukcja zestawów kołowych wzorowana była na rozwiązaniach kolejowych, gdzie na wale osiowym (osi) osadzone były koła bosc, a na nie zabudowywano obręcz koła z profilem tocznym, bezpośrednio współpracującym z szyną. W drugiej połowie XX wieku, celem zmniejszenia oddziaływań dynamicznych pojazdu na tor, przy jednoczesnym zmniejszeniu hałasu i drgań, wprowadzono wkładki elastyczne, które umieszczano między kołem bosym, a obręczą [5]. Wkładki te stanowiły podatny element tłumiący, wykonany z gumy syntetycznej lub na bazie naturalnego kauczuku. W wagonach tramwajowych spotyka się układy z krążkami lub segmentami metalowo-gumowymi, pierścieniami gumowymi, a także innego rodzaju wstawkami elastycznymi. Do najczęściej stosowanych zalicza się koła jezdne z elementami elastycznymi typu KONSTAL, typu BOHUM oraz typu SAB [6]. Obecnie w wagonach tramwajowych stosuje się powszechnie koła jezdne typu SAB, gdzie elementem elastycznym jest pierścień gumowy o przekroju litery V, osadzany na odpowiednio ukształtowanym wewnętrznym profilu obręczy koła jezdnego (rys 2.3).



Rys. 2.3. Schemat elastycznego koła jezdnego typu V60, 1 - obręcz, 2 - wkładka elastyczna, 3 - śruba łącząca, 4 - koło base, 5 - pierścień dociskowy (mocujący) [3]

Poszczególne elementy konstrukcyjne zestawu kołowego muszą charakteryzować się właściwą jakością użytkową, która w znacznym stopniu zależy od właściwości fizyko mechanicznych stosowanych materiałów, a także od jakości technologicznej (ich wykonania). Obecnie do produkcji zestawów kołowych stosuje się głównie stale węglowe, ze względu na korzystne wyniki badań eksploatacyjnych i doświadczalnych, które potwierdzają najwyższe wskaźniki jej odporności na różne rodzaje zużycia [7]. Obręcz koła jezdnego wytwarza się metodą kucia i wstępnego kształtowania na prasie hydraulicznej, a następnie w procesie walcowania jest kształtowana powierzchnia toczna. Najczęściej obręcze, eksploatowane w wagonach tramwajowych w Polsce, wykonywane są z gatunków stali takich jak: P54, P60 oraz P70 [8], [9], których składy chemiczne oraz własności mechaniczne zostały przedstawione w tabeli 2.1 i 2.2.

Tabela 2.1. Zestawienie składu chemicznego stali stosowanych na obręcze kół tramwajowych – opracowanie własne na podstawie [9] oraz [10]

Gatunek stali	Skład chemiczny [%]									
	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V
				max.						
P54¹⁾	0,50÷ 0,58	0,60÷ 0,90	0,15÷ 0,40	0,04	0,04	0,30	0,30	0,30	0,05	0,05
P60¹⁾	0,57÷ 0,65	0,60÷ 0,90	0,15÷ 0,40	0,04	0,04	0,30	0,30	0,30	0,05	0,05
P70²⁾	0,65÷ 0,70	0,65÷ 0,95	0,15÷ 0,40	0,04	0,04	–	–	–	–	–

Tabela 2.2. Zestawienie własności mechanicznych stali stosowanych na obręcze kół tramwajowych – opracowanie własne na podstawie [9] oraz [10]

Gatunek stali	Własności mechaniczne						
	Stan obróbki cieplnej	Re [MPa]	Rm [MPa]	A [%]	Z [%]	KCU [J/cm ²]	Twardość HB
		min.		min.	min.		
P54	normalizowany	370	700÷820	14	16	20	201
	ulepszony cieplnie	400	750÷880	15	22	30	221
P60	ulepszony cieplnie	500	920÷1050	12	16	20	262
P70	ulepszony cieplnie	nie określa się	1000÷1200	10	nie określa się	nie określa się	300 ÷ 362

Re – granica plastyczności materiału; Rm – wytrzymałość na rozciąganie; A – wydłużenie procentowe po zerwaniu; Z – Przewężenie procentowe; KCU – udarność próbki z karbem U

Z tabel 2.1 i 2.2 wynika, że najwięcej dodatków ma stal o gatunku P54 i P60, z kolei najwyższą wytrzymałością na rozciąganie i twardością charakteryzuje się stal P70.

2.2. Stosowane profile obręczy kół tramwajowych

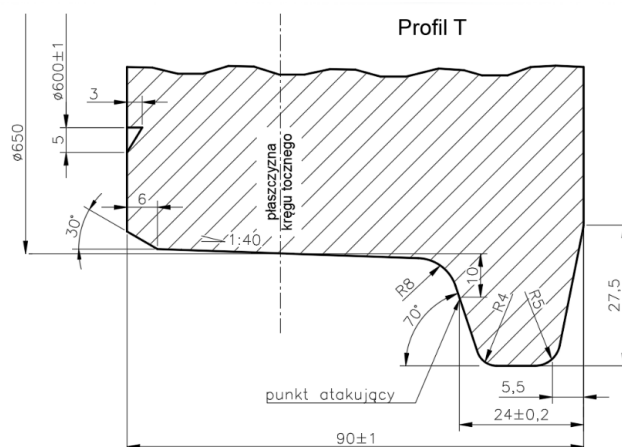
Profil toczny koła kształtuje się tak, aby zapewniał niezawodną i bezpieczną współpracę w układzie koła-szyna. Jego odpowiednie wyprofilowanie wpływa na właściwe prowadzenie wagonu tramwajowego po torze prostym oraz w łukach. Profil toczny (zewnątrzny) obręczy koła jezdnego składa się z [6], [11]:

- płaszczyzny tocznej, czyli części nośnej profilu tocznego (odpowiadającej za przenoszenie obciążeń pionowych), której podstawowym zadaniem jest prowadzenie zestawu kołowego, w trakcie poruszania się pojazdu po torze prostym, a dzięki zastosowaniu odpowiednio wyprofilowanej stożkowej powierzchni ułatwiającej poprzeczne przesunięcie zestawu kołowego, umożliwia prowadzenie zestawu po łukach torowych i zwrotnicach,
- obrzeża, czyli tej części profilu tocznego, która odpowiada za poprzeczne utrzymywanie pojazdu względem toru, co bezpośrednio wpływa na bezpieczeństwo prowadzenia zestawu kołowego zarówno na torze prostym, jak i łukach; natomiast w przypadku przejazdu koła po rozjeździe z krzyżownicami płytkorowkowymi, to obrzeże odpowiada również za przenoszenie obciążeń pionowych.

W przeciwieństwie do pojazdów kolejowych, kształt profilu zewnętrznego obręczy kół jezdnych, stosowanych w wagonach tramwajowych nie jest znormalizowany. W związku z brakiem ogólnie narzuconych wytycznych, co do właściwego doboru profili kół oraz szyn, wykorzystuje się różne profile, bardzo często powstałe w wyniku doświadczeń eksploatacyjnych, dostosowane do specyfiki eksploatacji (wliczając w to,

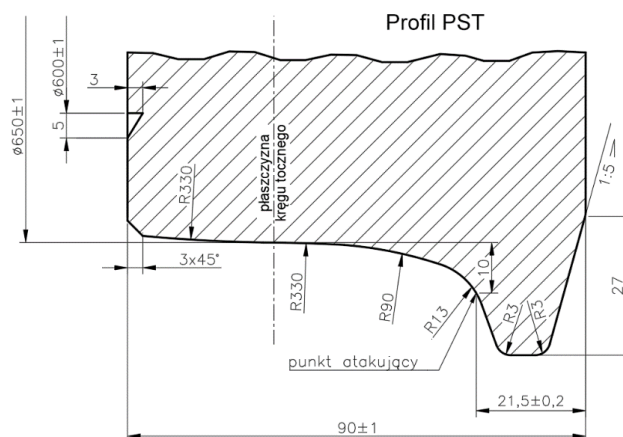
infrastrukturę, konkretne typy pojazdów, a także inne warunki ruchu). Obecnie dobrą praktyką jest zamawianie wagonów tramwajowych z profilem koła jezdneho, dostosowanym do infrastruktury istniejącej w miejscu eksploatacji pojazdów przez danego operatora tramwajowego. W Polsce, w tramwajowych zestawach kołowych, powszechnie stosuje się koła obręczowe o następujących rodzajach [12]–[14]:

- profil typu T – najstarszy stożkowy profil obręczy, stosowany przez wiele lat w Polsce, dostosowany do tramwajowych szyn rowkowych typu 180S, który charakteryzuje się bieżnią koła o pochyleniu 1:40, wyokrągloną na styku z obrzeżem koła krzywą o promieniu 8 [mm] (rys. 2.4);



Rys. 2.4. Zarysu profilu obręczy tramwajowej typu T – opracowanie własne wg [15]

- profil typu PST – profil opracowany w latach 80. XX wieku, przez Instytut Pojazdów Szynowych "Tabor" w Poznaniu dla potrzeb Poznańskiego Szybkiego Tramwaju, znormalizowany w latach 90; profil ten posiada bieżnię o charakterze krzywoliniowym, z wyokrągleniem tak zwanym pachwinowym obręczy i promieniem 13 [mm], który jest identyczny z wyokrągleniem szyny 49E1; ma on zdolność do przyjmowania środkowego położenia pojazdu na torze, na skutek powstawania siły centrującej geometrycznie zestaw, pochodzącej od siły grawitacji, w związku z czym jest on korzystny dla pojazdów z niezależnie obracającymi się kołami; w przypadku tego profilu zużycie ścierne występuje w środkowej części tego profilu, dlatego też jego stożkowatość w trakcie jazdy na odcinku prostym ulega zmniejszeniu, natomiast na łukach ma miejsce częstszy kontakt obrzeża z powierzchnią wewnętrzną rowka lub szyny, co w konsekwencji oprócz zużycia, powoduje również zwiększenie hałasu (rys. 2.5);



Rys. 2.5. Zarysu profilu obręczy tramwajowej typu PST – opracowanie własne wg [16]

- profil typu TW – profil ten stanowi modyfikację profilu typu T w zakresie pochylenia obrzeża oraz promienia łuku przejściowego; obecnie jest on eksploatowany jedynie przez Tramwaje Warszawskie;

Podstawowe wymagania odnośnie profili obręczy kół tramwajowych są określone w [16]. Obecnie w wagonach tramwajowych stosowane są obręcze wąskie (klasyczne), których szerokość konturu (koła) wynosi 90 [mm], a także obręcze szerokie, wystające poza szerokość główki szyny (szerokość np. 110 [mm]). Obręcze wąskie (klasyczne) mogą być eksploatowane wyłącznie na rozjazdach z krzyżownicami płytkorowkowymi, w przeciwieństwie do obręczy szerokich, które umożliwiają jazdę zarówno po rozjazdach z krzyżownicami płytkorowkowymi, jak i z krzyżownicami głębokorowkowymi [5].

Obręcze kół jezdnych w trakcie ich eksploatacji zużywają się, stąd koniecznym jest przeprowadzanie pewnych czynności odtwarzających profil. Jedną z nich jest tzw. reprofilacja, polegająca na obróbce skrawaniem zewnętrznego profilu obręczy w celu przywrócenia dopuszczalnych wymiarów zarysu koła [17]. Należy jednak pamiętać, że koło na określonej średnicy obręczy ma wymiar graniczny. Stąd obręcze posiadają na obwodzie płaszczyzny zewnętrznej rowek kontrolny, który informuje o dopuszczalnej minimalnej średnicy eksploatacyjnej, po przekroczeniu której należy wymienić obręcz na nową.

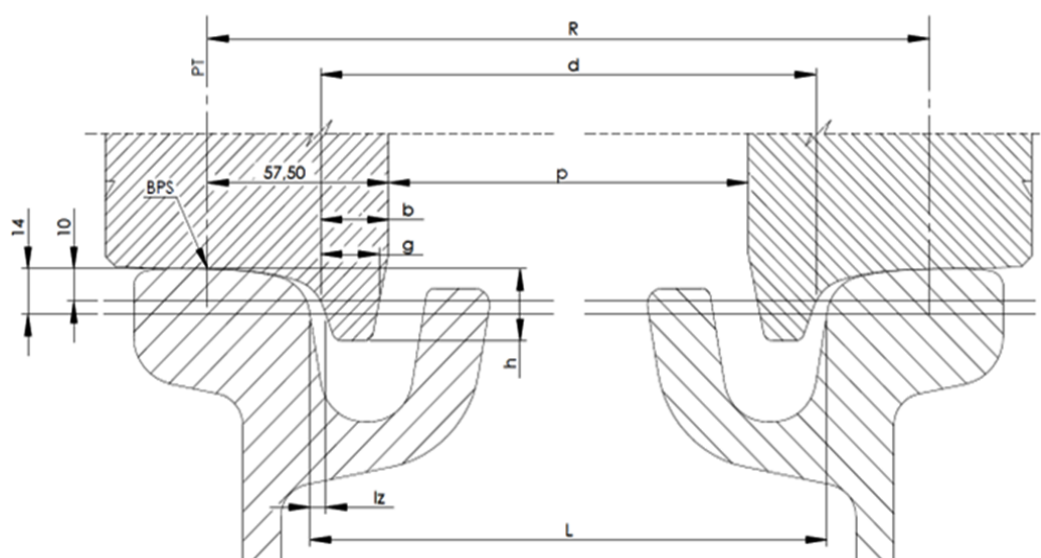
Pomiary zestawów kołowych wykonuje się głównie na zautomatyzowanych stanowiskach, które pozwalają na bezstykowy pomiar istotnych parametrów geometrii kół. Umożliwiają one monitorowanie stanu technicznego układu biegowego wagonu tramwajowego, a w szczególności wymiarów geometrycznych kół, a także zestawów kołowych. Cechami diagnostycznymi, których graniczne wartości stanowią główne kryterium, służące do oceny stanu technicznego są różnice średnic kręgów tocznych zestawu kołowego, bicie promieniowe na kręgu tocznym, szerokość nabiegania (długość prowadną) kół zestawu, a także wysokość oraz grubość obrzeża [11]. Na ich podstawie podejmowane są decyzje o odnowie zarysu koła, czyli reprofilacji zestawów kołowych.

W tabeli 2.3 przedstawiono nominalne wymiary oraz oznaczenia związane z położeniem zestawu kołowego w torze.

Tabela 2.3. Nominalne wymiary związane z położeniem zestawu kołowego w torze – opracowane własne na podstawie [18]

Symbol	Nazwa cechy
d	średnica kręgu tocznego
p	rozstaw wewnętrznych płaszczyzn czołowych obręczy
b	wymiar kontrolny A wg. PN-K-92016 (szerokość obrzeża obręczy wg. PN-91 K-88251)
h	wysokość obrzeża
L	szerokość toru
g	grubość obrzeża
d	długość prowadna zestawu kołowego - 1428±1,9 mm dla tramwajów normalnotorowych - 993±1,4 mm dla wąskotorowych
PT	płaszczyzna kręgu tocznego
BPS	baza pomiaru średnicy
R	rozstaw kręgów tocznych - 1500 mm dla tramwajów normalnotorowych - 1065 mm dla wąskotorowych

Nominalne wymiary oraz oznaczenia związane z położeniem zestawu kołowego w torze zostały przedstawione również na uproszczonym schemacie fragmentu przekroju poprzecznego zestawu kołowego, umiejscowionego w torze zbudowanego z szyn tramwajowych (rys. 2.6).



Rys. 2.6. Wymiary nominalne związane z położeniem zestawu kołowego w torze – opracowanie własne na podstawie [18]

2.3. Tramwajowa nawierzchnia toru

Kluczowym elementem infrastruktury tramwajowej jest torowisko, czyli pas drogi szynowej, po której poruszają się wagony tramwajowe. W zależności od możliwości zagospodarowania terenu wyróżnia się dwa rodzaje nawierzchnie torowej - tory wydzielone oraz tory niewydzielone. Pierwsze z nich stanowią odcinki tras tramwajowych, gdzie tory przebiegają wyłącznie po wydzielonym dla nich terenie. Natomiast torowiska niewydzielone to odcinki tras, zabudowane w jezdni, do których dostęp mają wszyscy uczestnicy ruchu drogowego. W przypadku gdy torowisko znajdujące się w jezdni odseparujemy od innych uczestników ruchu np. za pomocą krawężników, mamy do czynienia z torowiskiem wydzielonym w jezdni. Istnieje możliwość, aby po tak wydzielonym odcinku trasy mogły poruszać się inne pojazdy środków transportu zbiorowego (np. autobusy) czy pojazdy uprzywilejowane [5].

Obecnie stosuje się różne konstrukcje torowisk. Biorąc pod uwagę rodzaj głównej warstwy nośnej, można wyróżnić torowiska o konstrukcji bezpodsypkowej i podsypkowej. Torowiska podsypkowe, to najczęściej wykorzystywana technologia budowy torowiska, szczególnie w przypadku torowisk wydzielonych. Jego głównymi elementami jest podtorze, składające się przede wszystkim z podsypki lub zasypki na ogół występującej w postaci tłucznia kamiennego, a także ramy toru, w której skład wchodzi podkłady (najczęściej strunobetonowe, rzadziej drewniane), szyny oraz elementy mocujące je do podkładów.

W przypadku torowisk bezpodsypkowych nawierzchnię stanowią najczęściej prefabrykaty lub podbudowy betonowe. Ten typ torowiska zazwyczaj spotyka się w przypadku torów biegnących w jezdni lub strefach rozjazdów. Istnieje wiele rozwiązań konstrukcyjnych tych torowisk. Najpopularniejsze spośród nich to torowiska typu węgierskiego, zbudowane z płyt betonowych, które są wyposażone w rowki, służące do umieszczenia w nich tramwajowych szyn blokowych. Obecnie ze względów estetycznych oraz ekologicznych popularnym rozwiązaniem są również torowiska trawiaste.

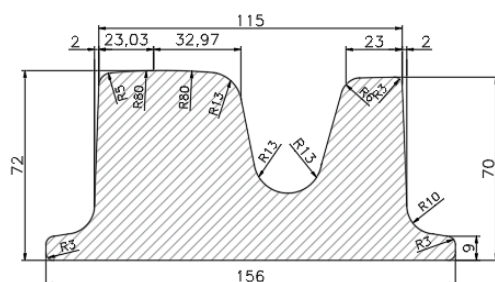
Na polskich, miejskich liniach tramwajowych stosowane są dwie szerokości toru (rozstaw szyn), które mierzy się pomiędzy wewnętrznymi stronami główek szyn toru 14 [mm] poniżej najwyższego punktu powierzchni tocznej główki szyny [19]:

- tor normalny o rozstawie 1435 [mm], stosowany np. w Krakowie, Warszawie, Gdańsku, Wrocławiu,
- tor wąski o rozstawie 1000 [mm], stosowany np. w Łodzi, Bydgoszczy, Toruniu.

Do budowy torów tramwajowych wykorzystuje się trzy główne rodzaje szyn [20], [21]:

- typu tramwajowego / rowkowego – 180S, 60R1 (Ri60), 60R2 (Ri60N) (rys. 2.7), które charakteryzują się rowkiem i kołnierzem rowka, umożliwiającymi znacznie

- szyny blokowe / żłobkowe – LK-1 (rys. 2.10), stosowane w przypadku torowisk bezpodsypekowych (z ciągłym podparciem szyny), charakteryzują się brakiem szynki, a także węższą stopką.



Rys. 2.10. Schemat szyny blokowej LK-1 – opracowanie własne wg [20]

Nawierzchnia toru musi być przystosowana do przenoszenia obciążeń, które pochodzą od przejeżdżających tramwajów, a także wyprofilowana zgodnie z geometrią trasy. Aby zestawy kołowe nie klinowały się, tory na łukach są poszerzone. Ma to miejsce, gdy koła poruszają po łukach o względnie dużej różnicy promieni, biorąc pod uwagę koło wewnętrzne i zewnętrzne. Stopień poszerzenia rozstawu szyn jest zależny od promienia łuku toru na danej trasie (minimalny promień łuku nie powinien być mniejszy niż 18 [m]) [19]. Poszerzanie to stosuje się głównie przy promieniach mniejszych niż 250 [m] – im mniejszy promień, tym większe poszerzenie, które dochodzi nawet do 25 [mm] ponad nominalny wymiar toru. Dodatkowo stosuje się pochylenie szyn w kierunku osi toru, co w znaczący sposób zapobiega powstawaniu zjawiska takiego jak wężykowanie zestawów kołowych.

Obecnie według znormalizowanych przepisów [22], [23] do produkcji szyn, zarówno kolejowych, jak i tramwajowych używa się gatunków stali m.in. takich jak: R200, R260, R260Mn, R320Cr, R350HT oraz R350LHT. W tabelach 2.4 oraz 2.5 przedstawiono zestawienie składu chemicznego oraz własności mechanicznych stali stosowanych do produkcji szyn, z których budowane są torowiska tramwajowe.

Tabela 2.4. Zestawienie składu chemicznego stali stosowanych do produkcji szyn z których budowane są torowiska tramwajowe – opracowanie własne na podstawie [23]

Gatunek stali	Skład chemiczny [%]									
	próba	C	Si	Mn	S	Cr	P	Al	V	N
							max.			
R200	ciekła	0,40÷ 0,60	0,15÷ 0,58	0,70÷ 1,20	0,008÷ 0,035	max. 0,15	0,035	0,004	0,030	0,009
	stała	0,38÷ 0,62	0,13÷ 0,60	0,65÷ 1,25	0,008÷ 0,040	max. 0,15	0,040	0,004	0,030	0,010
R260	ciekła	0,62÷ 0,80	0,15÷ 0,58	0,70÷ 1,20	0,008÷ 0,025	max. 0,15	0,025	0,004	0,030	0,009
	stała	0,60÷ 0,82	0,13÷ 0,60	0,65÷ 1,25	0,008÷ 0,030	max. 0,15	0,030	0,004	0,030	0,010

Tabela 2.4. cd. Zestawienie składu chemicznego stali stosowanych do produkcji szyn z których budowane są torowiska tramwajowe – opracowanie własne na podstawie [23]

Gatunek stali	Skład chemiczny [%]									
	próba	C	Si	Mn	S	Cr	P	Al	V	N
							max.			
R260Mn	ciekła	0,55÷ 0,75	0,15÷ 0,60	1,30÷ 1,70	0,008÷ 0,025	max. 0,15	0,025	0,004	0,030	0,009
	stała	0,53÷ 0,77	0,13÷ 0,62	1,25÷ 1,75	0,008÷ 0,030	max. 0,15	0,030	0,004	0,030	0,010
R320Cr	ciekła	0,60÷ 0,80	0,50÷ 1,10	0,80÷ 1,20	0,008÷ 0,025	0,80÷ 1,20	0,020	0,004	0,180	0,009
	stała	0,58÷ 0,82	0,48÷ 1,12	0,75÷ 1,25	0,008÷ 0,030	0,75÷ 1,25	0,025	0,004	0,200	0,010
R350HT	ciekła	0,72÷ 0,80	0,15÷ 0,58	0,70÷ 1,20	0,008÷ 0,025	max. 0,15	0,020	0,004	0,030	0,009
	stała	0,70÷ 0,82	0,13÷ 0,60	0,65÷ 1,25	0,008÷ 0,030	max. 0,15	0,025	0,004	0,030	0,010
R350LHT	ciekła	0,72÷ 0,80	0,15÷ 0,58	0,70÷ 1,20	0,008÷ 0,025	max. 0,30	0,020	0,004	0,030	0,009
	stała	0,70÷ 0,82	0,13÷ 0,60	0,65÷ 1,25	0,008÷ 0,025	max. 0,30	0,025	0,004	0,030	0,010

Tabela 2.5. Zestawienie własności mechanicznych stali stosowanych do produkcji szyn z których budowane są torowiska tramwajowe – opracowanie własne na podstawie [23]

Gatunek stali	Własności mechaniczne		
	Rm [MPa]	A [%]	Twardość HB
	min.	min.	
R200	680	14	200 ÷ 240
R260	880	10	260 ÷ 300
R260Mn	880	10	260 ÷ 300
R320Cr	1080	9	320 ÷ 360
R350HT	1175	9	350 ÷ 390
R350LHT	1175	9	350 ÷ 390

Rm – wytrzymałość na rozciąganie;
A – wydłużenie procentowe po zerwaniu;

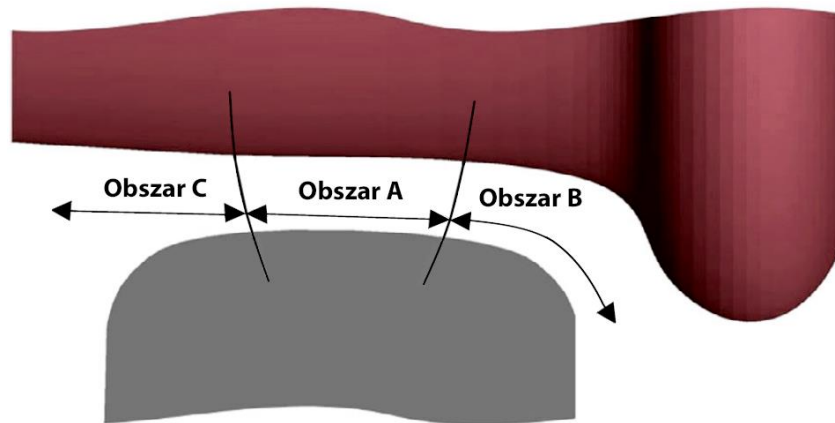
Zazwyczaj szyny produkuje się ze stali średniowęglowych, niskostopowych zaliczanych do materiałów trudnospawalnych. W skład stali oprócz żelaza wchodzi również węgiel, mangan, krzem, a także w śladowych ilościach fosfor oraz siarka.

2.4. Współpraca elementów w układzie koło-szyna

Współpraca w układzie koło-szyna to interdyscyplinarne zagadnienie, łączące wiele dziedzin nauki takich jak metaloznawstwo, tribologia, wytrzymałość materiałów, podstawy niezawodności oraz dynamika pojazdów, związana z zastosowanym układem biegowym wagonu tramwajowego. Duża złożoność w tym skojarzeniu ciernym wynika z jego otwartego charakteru oraz stale zmieniających się warunków środowiskowych. Wagony tramwajowe poruszają się wskutek toczenia się stalowych kół po stalowych szynach, ruchem złożonym, na który składa się: ruch postępowy (wzdłuż szyn) oraz ruch obrotowy (względem osi koła). W miejscu kontaktu w wyniku odkształceń sprężystych zarówno kół jak i szyn, powstają obszary w obrębie których przenoszone są siły normalne oraz styczne, które reprezentują wzajemne oddziaływania toru i zestawów kołowych. Wyznaczenie tych sił ma duże znaczenie w badaniu dynamiki układu koło-szyna.

W trakcie użytkowania powierzchnia toczna koła ściśle współpracuje z powierzchnią główki szyny, przenosząc tym samym siły pionowe, poprzeczne, a także wzdłużne. O jakości tej współpracy, w otwartym węźle tribologicznym, jakim niewątpliwie jest układ koło-szyna, decyduje wiele parametrów między innymi: decyduje wiele parametrów, między innymi: geometryczne dopasowanie profilu obręczy koła oraz szyny, materiały z jakich zostały one wykonane (twardość, chropowatość powierzchni), typ styku i jego lokalizacja oraz siły występujące w tym układzie, które warunkują powstawanie zjawisk kontaktowych w węźle tarcia. Jednak głównie punkt styku szyny oraz koła decyduje o trakcyjnych właściwościach pojazdów szynowych.

W teoretycznych rozważaniach (modelowaniu) powierzchnia styku pomiędzy kołem a szyną (w przypadku nominalnie nowych profili kół oraz szyn), przyjmuje kształt eliptyczny o powierzchni nieprzekraczającej $1 \text{ [cm}^2\text{]}$. Stąd w miejscu tym występują naprężenia kontaktowe (wynikające z ciężaru pojazdu i prowadzenia zestawu kołowego w torze) o bardzo dużych wartościach, dochodzących nawet do 1500 [MPa] [24]. Powierzchnia ta w trakcie eksploatacji będzie zmieniała się w sposób ciągły, ze względu na występowanie zużycia, zmieniającego kształt (profile) elementów współpracujących, jak również lokalizację punktu styku, w zależności od poruszania się pojazdu po torze prostym lub po łukach torowych. Stąd też zdefiniowano trzy możliwe obszary kontaktu koła z szyną, co przedstawione zostało na rysunku 2.11:

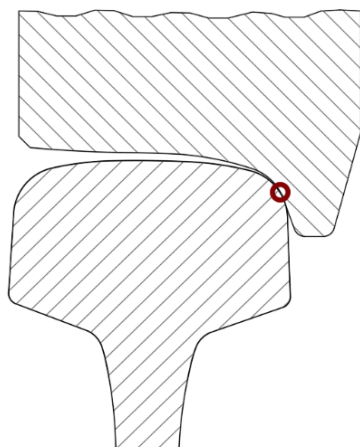


Rys. 2.11. Obszary kontaktu w układzie koło-szyna – opracowanie własne wg [25]

- obszar A – środkowa część powierzchni toczonej obręczy koła oraz główki szyny; do kontaktu koła z szyną dochodzi najczęściej w tym rejonie i zwykle występuje on podczas jazdy pojazdu szynowego po prostym torze lub łukach o bardzo dużym promieniu; w tym regionie występują najniższe naprężenia kontaktowe i siły boczne, co skutkuje mniejszym zużyciem elementów w tym układzie;
- obszar B – obrzeże obręczy koła i wewnętrzna powierzchnia główki szyny; do kontaktu w tym obszarze dochodzi najczęściej, gdy pojazd porusza się po łukach o małym promieniu; kontakt w tym obszarze elementów współpracujących występuje rzadziej niż w obszarze A; obszar ten charakteryzują znacznie wyższe naprężenia kontaktowe oraz wskaźniki zużycia;
- obszar C – kontakt pomiędzy zewnętrznymi powierzchniami obręczy koła oraz główki szyny; kontakt w tym obszarze zachodzi rzadko, głównie w przypadku nieprawidłowego funkcjonowania układu biegowego np. w wyniku granicznego zużycia kół lub szyn.

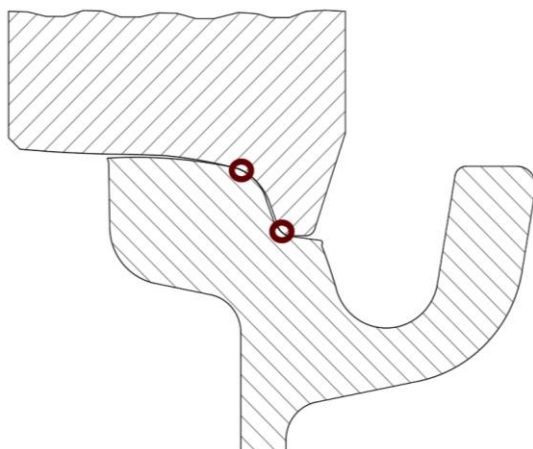
Warunki współpracy elementów skojarzonych w tym układzie, zależą głównie od kształtów geometrycznych ich profili poprzecznych. Biorąc pod uwagę wzajemną relację pomiędzy nimi w obszarze B, można wyróżnić trzy charakterystyczne typy kontaktu [14], [26]:

- kontakt koła z szyną w jednym punkcie tzw. styk jednopunktowy (rys. 2.12) – w tym przypadku duże naprężenia kontaktowe wynikające ze skupienia obciążenia na małej powierzchni styku, skutkują intensyfikacją zużycia zmęczeniowego (RCF) w obszarze wewnętrznej powierzchni główki szyny, jak również obrzeża koła;



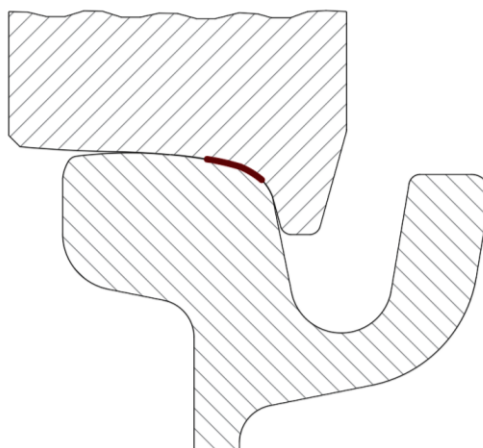
Rys. 2.12. Schemat styku jednopunktowego – opracowanie własne wg [14], [26]

- kontakt koła z szyną w dwóch i więcej punktach tzw. styk wielopunktowy (rys. 2.13) – ma miejsce, gdy występuje dodatkowy obszar styku pomiędzy obrzeżem, a wewnętrzną częścią główki szyny (np. w wyniku intensywnego zużycia szyny na skutek poruszania się po łukach o małym promieniu); ten rodzaj styku to niekorzystna forma współpracy, gdyż punkty styku znajdują się na różnych promieniach tocznych obszarów kontaktowych, co skutkuje zwiększonymi wartościami poślizgu względnego, a także zwiększoną emisją hałasu;



Rys. 2.13. Schemat styku dwupunktowego – opracowanie własne wg [14], [26]

- kontakt konforemny (rys. 2.14) – ten rodzaj styku można zaobserwować w przypadku występowania podobieństwa geometrycznych profili, których powierzchnia styku jest rozłożona na znacznym obszarze, co wynika z jednoczesnego zużycia elementów współpracujących w układzie; kontakt ten charakteryzuje się niewielką intensywnością zużywania się przez cały okres eksploatacji, ze względu na stosunkowo małe naciski kontaktowe; jednakże w tym przypadku pogarszają się właściwości dynamiczne pojazdu, co wpływa na obniżenie prędkości poruszania się wagonu tramwajowego.



Rys. 2.14. Schemat styku konforemnego – opracowanie własne wg [14], [26]

Zjawiskiem tarcia nazywa się powstawanie siły przeciwdziałającej ruchowi, która skierowana jest przeciwnie do kierunku poruszania się ciała, w tym przypadku pojazdu. Pomiędzy kołem, a szyną występuje zjawisko tarcia przy zmiennym współczynniku tarcia, który zależy m.in. od jakości współpracujących powierzchni, prędkości poruszania, a także obecności w obszarze styku różnego rodzaju modyfikatorów tarcia lub zanieczyszczeń (np. piasku, wody, śniegu, liści). Siła tarcia jest wprost proporcjonalna do siły nacisku oraz zależy od parametrów powierzchni trących, takich jak: chropowatość powierzchni, rodzaj materiału, temperatura otoczenia, środowisko zewnętrzne (czyli czynniki wpływające na zmniejszenie lub zwiększenie tarcia), a także od stanu ruchu (tarcie toczne i ślizgowe) [27]. Zjawisko tarcia w układzie koło-szyna jest bardzo istotne, gdyż odgrywa kluczową rolę w punkcie styku elementów współpracujących. Wpływa bowiem na procesy, takie jak: zużycie, przyczepność, zmęczenie w obszarze styku tocznego oraz emisja hałasu. Wyróżnia się następujące cechy, które charakteryzują tarcie w ruchu tocznym: siła, moment, opór toczenia, a także współczynnik tarcia tocznego.

W przypadku ruchu koła po szynie, mamy do czynienia z toceniem, na który składa się ruch postępowy i obrotowy. W rzeczywistości w układzie tym nie zachodzi zjawisko czystego toczenia. W związku z tym, iż prędkość ruchu wagonu tramwajowego nie jest taka sama jak prędkość obrotowa koła jezdnego w miejscu styku z szyną, toczeniu towarzyszy poślizg – możliwe jest występowanie całkowitego poślizgu lub jednoczesnego poślizgu i sczepienia (adhezji) o różnym udziale. Wyróżnia się również pojęcie mikropoślizgu, które nie należy mylić z poślizgiem, gdyż poślizg jest realizowany w procesie tarcia zewnętrznego, natomiast mikropoślizg występuje w obszarze adhezji, ze względu na zachodzące odkształcenia materiału toczących się po sobie elementów [14].

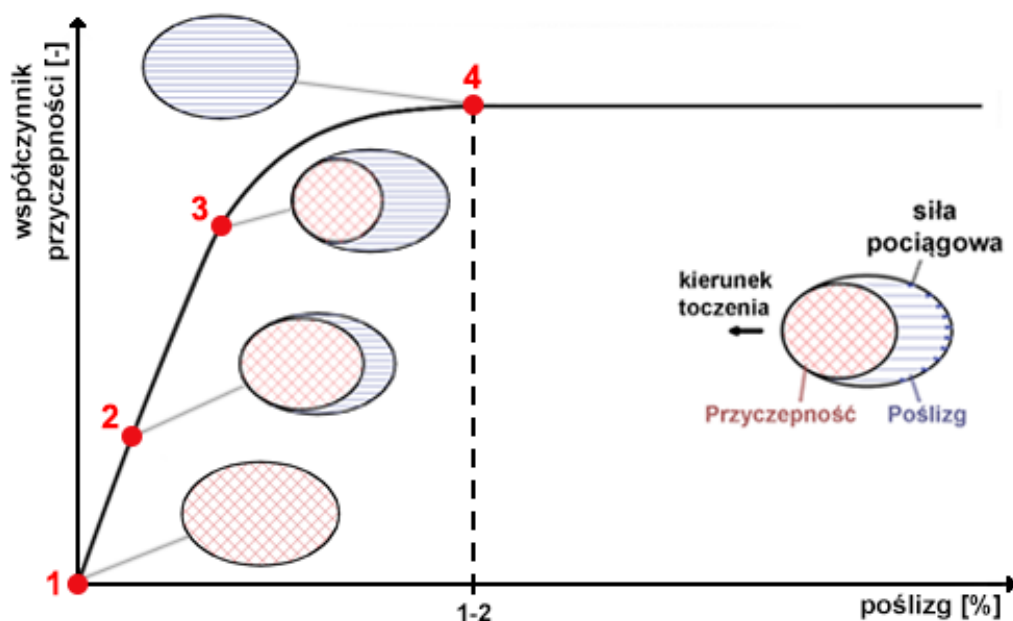
Opór tarcia można wyrazić za pomocą współczynnika tarcia μ , który stanowi stosunek siły tarcia F_t do siły normalnej F_n w miejscu kontaktu (wzór 2.1).

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \quad (2.1.)$$

Zdolność do przenoszenia siły pociągowej z koła na szynę wyraża się współczynnikiem przyczepności f , który stanowi stosunek siły stycznej (siły pociągowej) F_T i siły normalnej F_n (wzór 2.2).

$$f = \frac{F_T}{F_n} \leq \mu \quad (2.2.)$$

Różnicę między współczynnikiem tarcia, a współczynnikiem przyczepności można zilustrować teoretyczną krzywą przyczepności, którą opracował Carter [28]. Charakteryzuje się ona zależnością pomiędzy współczynnikiem przyczepności, a poślizgiem (rys. 2.15).



Rys. 2.15. Teoretyczna krzywa trakcyjna według Cartera – opracowanie własne wg [29], [30]

Z analizy rysunku 2.15, wynika że w obszarze koło-szyna można wyróżnić trzy charakterystyczne strefy o różnym udziale zjawiska adhezji oraz poślizgu [30], [31]:

- w przypadku, gdy w obszarze styku występuje wyłącznie zjawisko adhezji (brak poślizgu) mamy do czynienia z tzw. czystym toczeniem, co ilustruje punkt 1; zazwyczaj jest to sytuacja czysto teoretyczna, gdyż nie występuje w trakcie poruszania się pojazdu;
- w punkcie 2 i 3 przedstawiono obszar styku koła z szyną w warunkach toczoślizgowych, gdzie jednocześnie występuje zarówno zjawisko adhezji (sczepiania), jak i poślizgu;
- w przypadku, gdy pomiędzy współpracującymi elementami nie występuje zjawisko adhezji, układ funkcjonuje w warunkach całkowitego poślizgu, co ilustruje punkt 4 (np. podczas zablokowania kół pojazdu szynowego w trakcie hamowania); w tym obszarze współczynnik przyczepności jest równy współczynnikowi tarcia.

Przy dalszym wzroście poślizgu, współczynnik przyczepności pozostaje teoretycznie stały. Oznacza to, że maksymalna wartość siły pociągowej, jaka może

zostać przeniesiona z koła na szynę, jest ograniczona przez aktualną wartość współczynnika tarcia. Należy jednak zauważyć, że istotny wpływ na współczynnik tarcia mają czynniki zewnętrzne, takie jak zanieczyszczenia naturalne, a także warunki środowiskowe. W rzeczywistych warunkach maksymalna siła pociągowa występuje zwykle przy poślizgu między 1%, a 2%. Przeprowadzone badania i analizy m.in. przez [29] i [32], wykazały że po osiągnięciu stanu całkowitego poślizgu, wartość współczynnika tarcia maleje na skutek wzrostu temperatury, w wyniku tarcia współpracujących elementów w obszarze styku.

2.5. Zagadnienia związane z bezpieczeństwem

Istotnymi elementami wpływającymi na bezpieczne prowadzenie zestawów kołowych w torze, jest bez wątpienia jakość współpracujących elementów w tym skojarzeniu ciernym, jak również stopień zużycia jaki następuje w trakcie ich eksploatacji. Determinującymi czynnikami mogącymi doprowadzić do wykolejenia wagonu tramwajowego, bez ingerencji innych uczestników ruchu, są przede wszystkim nadmierne zużycie, powodujące zmianę profilu kół oraz szyn, duża poprzeczna nierówność toru, nieprawidłowa szerokość i przechyłka toru, a także nadmierne wężykowanie zestawu kołowego, wskutek nieprawidłowego funkcjonowania układu biegowego pojazdu [33]. Obecnie stosowanymi kryteriami do oceny prawdopodobieństwa wystąpienia wykolejenia zestawu kołowego są [34]:

- kryterium Nadala – oparte na obliczaniu stosunku sił poprzecznych Y oraz sił pionowych Q , które działają pomiędzy kołem, a szyną w przypadku kontaktu jednopunktowego współpracujących elementów;
- kryterium Weinstocka – pozwala ustalić wartość graniczną sumy bezwzględnych wartości stosunku sił poprzecznych Y do sił pionowych Q dla kół, które znajdują się na wspólnej osi;
- kryterium pozwalające oszacować tzw. „współczynnik wykolejenia”, na podstawie wartości chwilowego obciążenia pionowego toru; stanowi stosunek sumy wypadkowych sił poprzecznych oraz pionowych, w przypadku jednej strony wózka jezdnego; kryterium stosowane jest głównie w Stanach Zjednoczonych;
- kryterium granicznej siły poprzecznej wywieranej przez zestaw kołowy na tor – sformułowane celem zminimalizowania wystąpienia ryzyka przemieszczenia się toru, co jest istotne w przypadku zwiększonych prędkości poruszających się pojazdów szynowych.

Przedstawione kryteria odnoszą się do dynamicznych aspektów, związanych z poruszaniem się pojazdu szynowego względem toru. Wyróżnia się również kryteria opierające na zagadnieniach kinematycznych, które ustalają maksymalne przyśpieszenie w wybranych punktach pojazdu, co ma na celu oszacowanie wystąpienia granicznych cykli użytkowania, jak również utratę stateczności poprzecznej [34].

W celu uzyskania świadectwa dopuszczenia do eksploatacji wagonu tramwajowego, konieczne jest przeprowadzenie oceny własności dynamicznych za pomocą kryterium Nadala, które wyznacza się za pomocą wzoru 2.3 [35].

$$\frac{Y}{Q} = \frac{\operatorname{tg}(\gamma) - \mu}{1 + \mu \cdot \operatorname{tg}(\gamma)} \quad (2.3.)$$

gdzie:

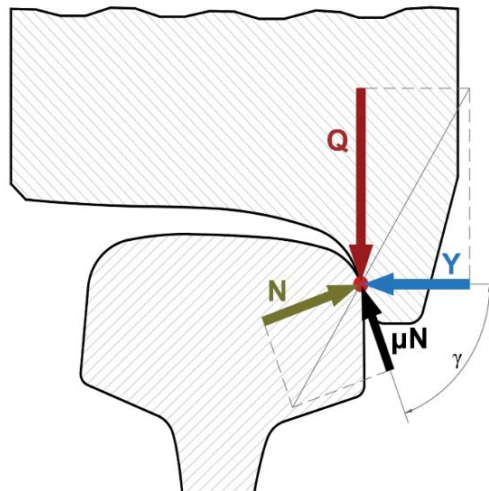
Y – siła pionowa,

Q – siła poprzeczna,

γ – kąt pochylenia obrzeża,

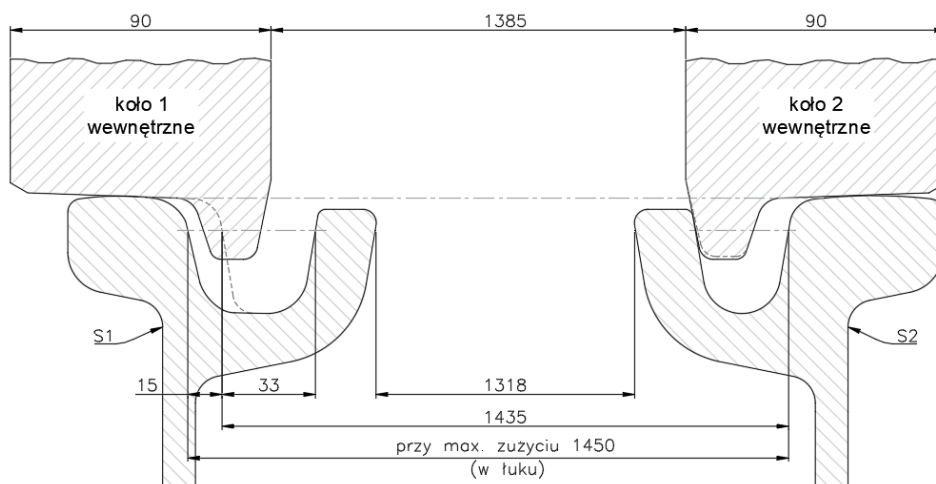
μ – współczynnik tarcia między kołem a szyną.

Prawdopodobieństwo wykolejenia występuje w chwili przekroczenia wartości kryterium Nadala, którą wyznacza się ze stosunku sił poprzecznych do sił pionowych działających w tym punkcie. Metoda ta uwzględnia cechy, takie jak: siła pionowego nacisku koła Q, działająca w kierunku prostopadłym do powierzchni toru, siła poprzeczna koła Y, działająca w kierunku prostopadłym do linii środkowej toru, kąt pochylenia obrzeża γ oraz współczynnik tarcia μ między kołem, a szyną [19]. Na rysunku 2.16 przedstawiono siły kontaktowe, występujące na powierzchni styku pomiędzy kołem, a szyną, które zależą od warunków ruchu, jak również od profilu współpracujących elementów oraz stopnia zużycia tych elementów.



Rys. 2.16. Rozkład sił w kontakcie koła z szyną – opracowanie własne wg [35]

Ze względu na poruszanie się tramwajów po torach ułożonych z szyn tramwajowych z rowkiem lub kolejowych, przebiegi współpracy kół z torem na odcinkach prostych i w łukach są różne. Pomimo tego, że cechą sztywnego sprzężenia kół z osią jest tendencja do samonaprowadzania się zestawu kołowego w torze [19], [36], to jednak trudnym do wyeliminowania jest zjawisko wężykowania oraz poślizgów, powodujących ścierne zużywanie się główek szyn i kół na powierzchni tocznej.



Rys. 2.17. Współpraca koła z tramwajową szyną rowkową w stanie granicznego zużycia – opracowanie własne wg [19], [37]

W trakcie poruszania się tramwaju po łukach torów z szynami rowkowymi, w miarę zużywania się boku główki szyny S1 oraz zewnętrznego boku obrzeża koła 1, zmniejsza się luz pomiędzy bokiem prowadnicy S2 oraz wewnętrznym bokiem obrzeża koła 2. W sytuacji, gdy wystąpi graniczny stan zużycia trących bocznych powierzchni, ma miejsce równoczesny styk obrzeży obu kół z szynami. Opisaną sytuację zaprezentowano w [19] oraz na rysunku 2.17, na którym bok główki szyny S1 przedstawiony został w stanie największego zużycia, co skutkowało zwiększeniem szerokości rowka, a tym samym szerokości toru do 1450 [mm] (dopuszczalna wartość) [15]. W kołach tramwajowych zużyciu ulegają nie tylko obydwie boki obrzeży, ale także zmniejsza się wysokość obrzeża wskutek tarcia o elementy rozjazdów. W tym przypadku obrzeże przenosi obciążenia pionowe, które na normalnych odcinkach torów przenosi płaszczyzna toczna koła tramwajowego. Zjawisko przenoszenia obciążeń pionowych z płaszczyzny tocznej na obrzeże i odwrotnie staje się głównym źródłem hałasu, wibracji, a także przyczyną zużywania się infrastruktury torowej oraz kół.

2.6. Modyfikatory tarcia

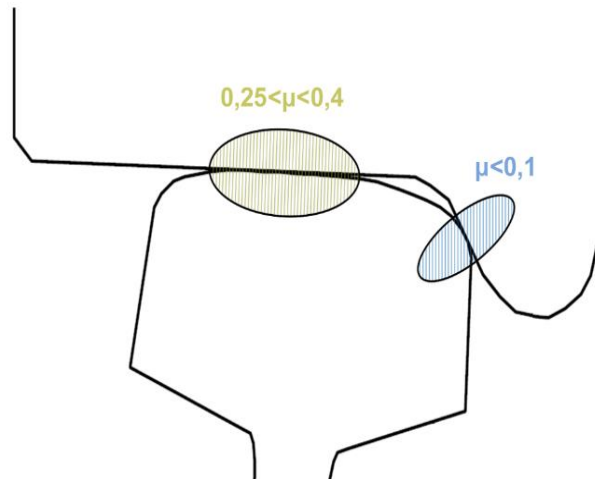
Odrębnym zagadnieniem jest występowanie w obszarze styku koła z szyną zanieczyszczeń, takich jak: woda, liście, śnieg, piasek, produkty zużycia czy celowo zastosowane modyfikatory tarcia. Zanieczyszczenia te mogą wpływać na zmianę warunków tarcia, a co za tym idzie intensyfikację zużycia elementów współpracujących, a w przypadkach ekstremalnych do ich uszkodzenia.

W zależności od lokalizacji miejsca styku w układzie koło-szyna, współczynnik tarcia powinien charakteryzować się różną wartością [31], [33], co przedstawia rys. 2.18:

- w obszarze pomiędzy boczną (wewnętrzną) krawędzią główki szyny, a obrzeżem koła jeźdźnego powinien przyjmować niższe wartości, czyli $\mu < 0,1$, aby przeciwdziałać zjawisku wspinania się obrzeża koła na szynę, które może finalnie

doprowadzić do wykolejenia się pojazdu, jak również ograniczyć emisję hałasu w trakcie pokonywania łuków torowych;

- w obszarze pomiędzy powierzchniami tocznymi koła i szyny powinien przyjmować wartości wyższe, czyli w zakresie $0,25 < \mu < 0,40$, celem zachowania odpowiednich właściwości biegowych pojazdu, zapewniających właściwe hamowanie i napędzanie pojazdu (zdolność trakcyjna).



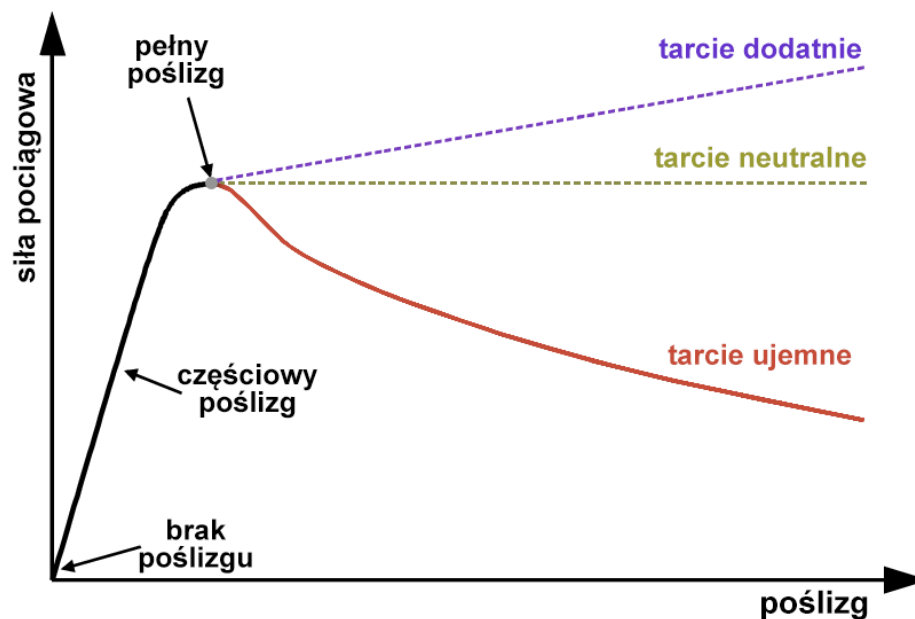
Rys. 2.18. Współczynniki tarcia w obszarze styku koło-szlina – opracowanie własne wg [31]

Współczynnik przyczepności można poprawić poprzez kontrolę poślizgu oraz modyfikację współczynnika tarcia w układzie koło-szlina. W tym celu stosuje się w miejscu styku modyfikatory tarcia, które według Kalouska i Magela [38] można podzielić na trzy typy:

- modyfikatory o niskim współczynniku tarcia – $\mu < 0,2$ (ang. LCF low-coefficient friction modifier) – stosowane na styku obrzeża koła jezdnego z boczną krawędzią główki szyny; występujące w postaci ciał stałych, olejów oraz smarów; nakładane na boczną powierzchnię główki szyny, aby przeciwdziałać zjawisku wspinania się koła na szynę podczas poruszania się wagonu tramwajowego po łuku; ważne jest, aby ten modyfikator nie migrował na powierzchnię toczną główki szyny, gdyż w tym obszarze musi być utrzymywana wysoka wartość współczynnika tarcia;
- modyfikatory o wysokim współczynniku tarcia – $0,2 < \mu < 0,4$ (ang. HPF high-positive friction modifier) – stosowane na styku powierzchni tocznej koła oraz szyny; w celu utrzymywania właściwego współczynnika tarcia (niezależnie od warunków atmosferycznych), co w konsekwencji również wpływa na zmniejszenie zużycia oraz emisji hałasu;
- modyfikatory o bardzo wysokim współczynniku tarcia (ang. VHPF very-high-positive friction modifier) – służące do przywracania przyczepności w warunkach chwilowej jej utraty, celem zapewnienia bezpiecznej eksploatacji pojazdu; ich zastosowanie skutkuje intensyfikacją zużycia elementów w układzie koło-szlina; powszechnie wykorzystywanym modyfikatorem tego typu jest piasek.

Właściwa kontrola współczynnika tarcia poprzez zastosowanie odpowiednich modyfikatorów tarcia jest niezwykle korzystna, aczkolwiek proces ten wymaga odpowiedniego podejścia, gdyż należy przestrzegać wytycznych co do utrzymania właściwej wartości współczynnika tarcia, tak aby zachować odpowiednie zdolności trakcyjne pojazdu [30], [39].

Stosowane modyfikatory tarcia mogą również zostać sklasyfikowane według ich wpływu na przebieg tarcia, po osiągnięciu stanu całkowitego poślizgu w kontakcie koła z szyną, co ilustruje rysunek 2.19 [40]. W przypadku gdy tarcie wzrasta po osiągnięciu pełnego poślizgu, mówi się, że modyfikator ma tzw. dodatnie właściwości. Jeśli natomiast tarcie maleje, modyfikator ma właściwości ujemne.



Rys. 2.19. Zachowanie się modyfikatorów tarcia [40]

Wysokie współczynniki tarcia występują głównie w miejscu styku obrzeża koła z wewnętrzną częścią główki szyny, przede wszystkim podczas poruszania się pojazdu po łukach. Wtedy też mamy do czynienia ze wzrastającymi warunkami obciążenia, a także z większym poślizgiem, co w konsekwencji skutkuje intensyfikacją zjawiska zużycia i zmęczeniem w obszarze styku tocznego. Stąd też, aby przeciwdziałać tym zjawiskom, można zastosować modyfikatory tarcia, takie jak smary lub powłoki samosmarujące [18], [41]. Wpływają one na redukcję zużycia zarówno obręczy kół, jak i szyn, a także zmniejszenie zużycia energii ze względu na mniejszy opór toczenia oraz obniżają emisję generowanego hałasu.

Wyróżnia się kilka rodzajów systemów wykorzystywanych do aplikacji modyfikatorów tarcia w układzie koło-szyna [33]:

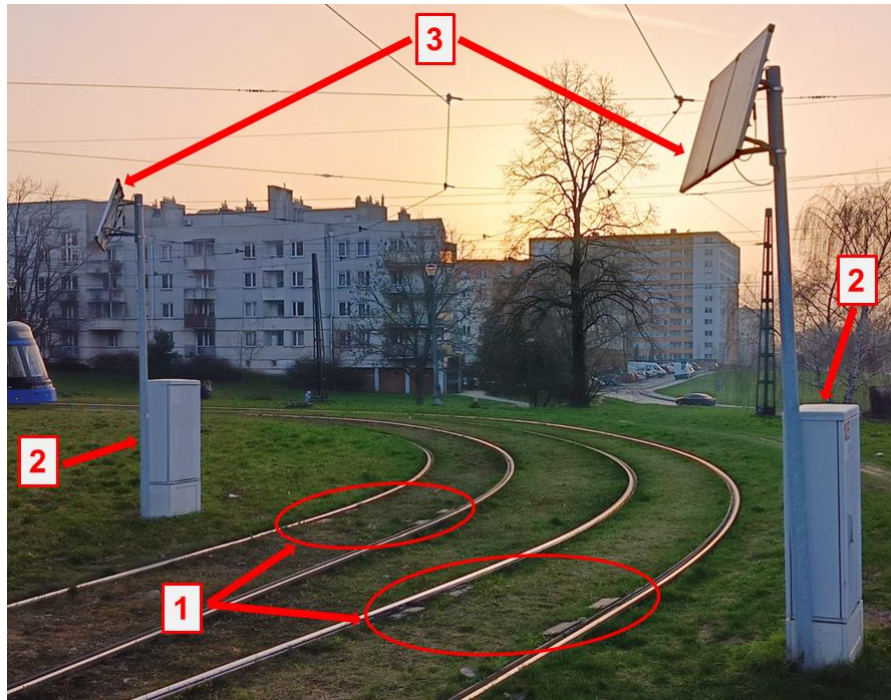
- systemy mobilne, czyli pojazdy szynowe, których zadaniem jest nakładanie modyfikatora tarcia zarówno na wewnętrzną powierzchnię główki szyny, jak również na jej powierzchnię toczną;

- systemy przytorowe, czyli zabudowane w infrastrukturze torowej, służące do nakładania modyfikatora tarcia zarówno na wewnętrzną powierzchnię główki szyny, jak również na jej powierzchnię toczną;
- systemy pokładowe, czyli zabudowane w pojeździe, służące do nakładania modyfikatora tarcia na obrzeże koła jezdne, skąd jest on przenoszony w trakcie poruszania się pojazdu na boczną (wewnętrzną) powierzchnię główki szyny; do tej grupy systemów należą również piasecznice zainstalowane w pojeździe.

Istotnym jest ciągle kontrolowanie systemów smarowania, celem uniknięcia aplikacji modyfikatorów tarcia w nieodpowiednich obszarach styku koło-szyna. Właściwości cierne w tym otwartym węźle tribologicznym, jakim jest obszar styku koło-szyna są trudne do scharakteryzowania oraz określenia ilościowego, gdyż są w dużej mierze zależne od wielu czynników zewnętrznych, takich jak warunki atmosferyczne czy zanieczyszczenia. Przyjmuję się, że współczynnik tarcia może wahać się w granicach od 0,08, aż do 0,50, co w znacznym stopniu wpływa na siły napędowe i hamujące, występujące w tym układzie [39]. Niski współczynnik tarcia na powierzchniach tocznych skutkuje ślizganiem się kół, a co za tym idzie powstawaniem uszkodzeń (tzw. płaskich miejsc na obręczach i wgłębień szyn), co ma miejsce w przypadku pojazdów bez lub z niesprawnym zabezpieczeniem przed poślizgiem. Natomiast wysoki współczynnik tarcia może prowadzić do intensyfikacji zużycia elementów układu koło-szyna, a także zwiększonego zużycia energii.

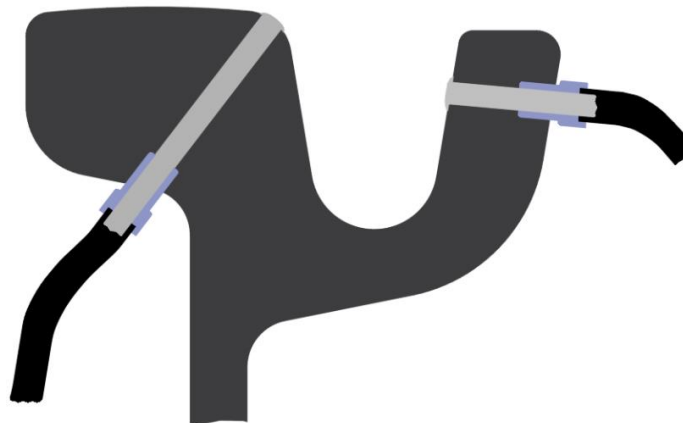
2.6.1. Systemy smarowania zabudowane w układzie torowym

Smarownice torowe to urządzenia, służące do automatycznej aplikacji środka smarującego na koło jezdne wagonu tramwajowego, w trakcie jego przejazdu po szynie, celem ograniczenia negatywnego zjawiska, jakim jest nadmierne zużycie elementów współpracujących [42]. Zazwyczaj zabudowywane są w układzie torowym na łukach o promieniach mniejszych niż 150 [m]. Dodatkowo smarownice korzystnie wpływają na redukcję hałasu, dlatego stosuje się je również w lokalizacjach, wymagających ograniczenia jego emisji ze względu na bliskość zabudowy mieszkaniowej, czy też ukształtowanie terenu [43]. Urządzenia te zabudowuje się tuż przed łukiem albo na początku łuku torowego. Na rysunku 2.20 przedstawiono miejsce zabudowy elementów systemu smarowania na łuku pętli tramwajowej.



Rys. 2.20. Lokalizacja zabudowy elementów systemu smarowania na pętli tramwajowej
 1 - dysze smarujące zabudowane w szynach, 2 - szafy techniczne, 3 - panele fotowoltaiczne do zasilania systemu smarowania – opracowanie własne

Aplikacja środka smarnego realizowana jest poprzez dysze, umiejscowione w główkach szyn, jak również w kołnierzach szyn rowkowych w postaci otworów, do których doprowadzone są przewody hydrauliczne, wprowadzające smar z układu hydraulicznego smarownicy [44]. Z uwagi na minimalizację tarcia, koniecznym jest wprowadzanie smarowania w miejscu styku obrzeża koła z główką szyny, co jest możliwe dzięki odpowiedniej lokalizacji dysz na krawędzi główki szyny [45]. W przypadku szyn tramwajowych (rowkowych) np. typu Ri60, dysze znajdują się nie tylko w główkach szyn, ale również w kołnierzach (rys. 2.21), co umożliwia smarowanie wewnętrznego boku obrzeża koła jeźdźnego.



Rys. 2.21. Lokalizacja zabudowy dysz smarujących w szynie tramwajowej typu Ri60
 – opracowanie własne na podstawie [6]

W skład systemu smarowania wchodzi także szafa techniczna, w której zabudowane są m.in.: układy sterowania, pompa hydrauliczna wraz ze zbiornikiem na smar (o pojemności, pozwalającej na bezobsługowe, nawet miesięczne użytkowanie), manometry, zawory. Dodatkowo w zależności od rozwiązania w szafie urządzenia mogą zostać zabudowane moduły GSM (pozwalające na ciągły monitoring wysokości słupa smaru w zbiorniku) oraz moduły GPRS (umożliwiające zdalne sterowanie i regulację urządzenia). Smarownice mogą być zasilane za pomocą przetwornicy z sieci trakcyjnej (600 V DC), zasilania klasycznego (np. 230 V AC, 110 V AC, 24 V DC) lub z wykorzystaniem paneli fotowoltaicznych, zamontowanych na odpowiednich, w zależności od rozwiązania konstrukcjach [46].

W poszczególnych rozwiązaniach technicznych dozowanie środka smarującego realizowane jest przy użyciu, zabudowanych przy szynie, czujników akustycznych (wykrywających dźwięk, pochodzący ze zbliżającego się wagonu tramwajowego) lub wibracyjnych (wykrywających drgania, spowodowane nadjeżdżającym pojazdem). Wysyłają one sygnał elektryczny do układu sterowania systemem smarowania, co skutkuje odpowiednim uruchomieniem działania urządzenia [45], [47].

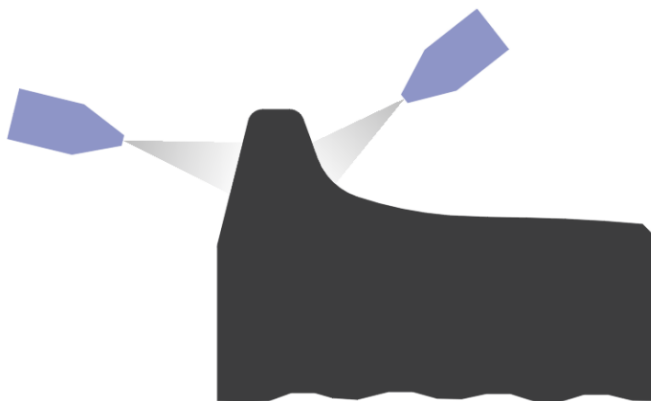
Odpowiednie dawkowanie środka smarującego, jak również liczba cykli użytkowania, jest zaprogramowana w sterowniku układu sterującego systemem smarowania. Nieprawidłowo skalibrowany system smarujący, który aplikuje dużą ilość substancji smarującej, może powodować występowanie zjawiska poślizgu, co niekorzystnie wpływa na bezpieczeństwo oraz trwałość elementów współpracujących w układzie koło-szyna. Stąd też strefa styku obrzeża koła z szyną powinna być właściwie smarowana, aby ograniczyć tarcie oraz emisję hałasu, przy jednoczesnym zachowaniu właściwości trakcyjnych.

2.6.2. Systemy smarowania zabudowane w pojeździe

W nowoczesnych eksploatowanych wagonach tramwajowych, powszechnym rozwiązaniem konstrukcyjnym są pokładowe systemy smarowania obrzeży kół. Mają one za zadanie, zredukować emisję hałasu, jak również wpłynąć na zmniejszenie zużycia skojarzonych elementów w układzie koło-szyna, spowodowanych nadmiernym poprzecznym nabieganiem koła jezdnego na główkę szyny, co obserwuje się zwłaszcza w trakcie pokonywania łuków o małym promieniu [48].

Z uwagi na różnorodność wykorzystywanych rozwiązań, w systemach tych stosuje się różne techniki smarowania. Jedną z nich jest smarowanie obrzeży kół jezdnych za pomocą ciekłego środka smarnego. Polega ono na precyzyjnym naniesieniu mieszaniny powietrzno-olejowej, poprzez odpowiednio skierowane dysze rozpylające, na obrzeże obracającego się koła jezdnego [49]. Dysze smarujące zabudowywane są głównie przed atakującym zestawem kołowym, pierwszego wózka jezdnego, patrząc w kierunku przemieszczania się pojazdu. Natomiast na pozostałe koła jezdne, substancja smarująca przenoszona jest w sposób pośredni, wskutek współpracy atakującego zestawu z szynami, w trakcie poruszania się tramwaju [50]. Ze względu na

to, że koła jezdne bardzo często poruszają się po torowiskach, do konstrukcji których wykorzystano szyny tramwajowe (rowkowe), w układzie biegowym pojazdu zabudowuje się dwustronny system smarowania obrzeża (rys. 2.22), za pomocą którego możliwe jest dozowanie smaru zarówno na zewnętrzną, jak i wewnętrzną stronę obrzeża [6].



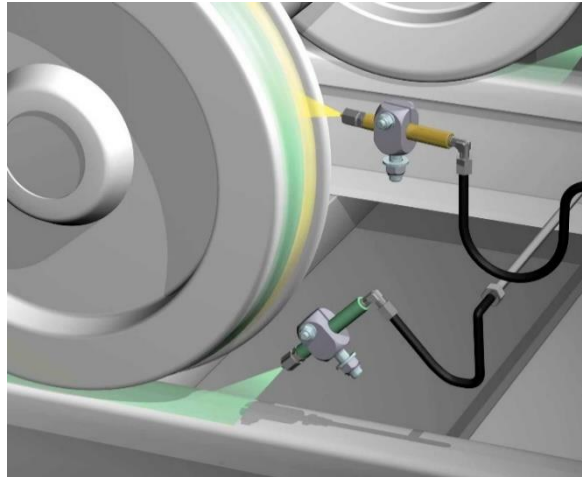
Rys. 2.22. Schemat dwustronnego układu smarowania obrzeża koła tramwajowego – opracowanie własne na podstawie [6]

Środek smarujący tłoczony jest za pomocą pompy systemu smarowania do bloku mieszającego, gdzie powstaje mieszanina powietrzno-olejowej, która za pośrednictwem instalacji tego układu, przekazywana jest do dysz rozpylających [50]. Jednakże ze względu na brak standardowego układu pneumatycznego (jaki występuje w pojazdach kolejowych) w wagonach tramwajowych, dokonuje się zabudowy pneumatycznej sprężarki wraz ze zbiornikiem, celem zasilania systemu smarowania obrzeży kół. Istnieją również takie instalacje tego systemu, które pozwalają na dozowanie środka smarującego bez użycia sprężonego powietrza np. za pomocą pompy elektromagnetycznej [45].

Za aplikację warstwy smarującej na obrzeże koła jezdne odpowiedzialny jest system sterowania pojazdem. W zależności od wymagań operatora szynowej komunikacji miejskiej, jak również od zastosowanego rozwiązania konstrukcyjnego, możliwe jest ustalenie dokładnego momentu dozowania smaru np. poprzez ustalenie konkretnych odstępów czasowych, lokalizacji wg GPS, przebytej drogi, bądź wskutek działania zabudowanych czujników, wykrywających obrót wózka jezdne w trakcie pokonywania łuków torowych [6].

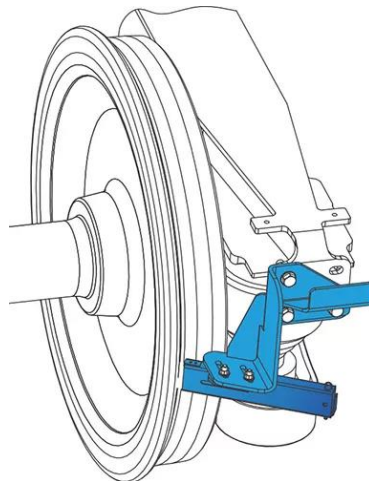
Dodatkowo, z uwagi na różnorodność systemów smarowania kół stosowanych w pojazdach szynowych, możliwe jest nanoszenie substancji smarującej nie tylko na pierwszy zestaw kołowy w wózku, ale również oba zestawy jednocześnie. Ponadto po zastosowaniu odpowiedniego systemu sterowania, istnieje możliwość indywidualnego dozowania powłoki smarującej na każde koło bądź zestaw kołowy zabudowany w wózku jezdny [45]. Istnieją także pokładowe systemy smarowania, pozwalające na aplikację substancji smarującej na powierzchnię toczną koła lub główkę szyny, jak również na powierzchnię główki szyny (zielona dysza rozpylająca) oraz obrzeża koła

(żółta dysza rozpylająca), co przedstawiono na rysunku 2.23. Ostatnie z rozwiązań umożliwia dozowanie dwóch różnych warstw smarujących, o odmiennych charakterystykach tribologicznych, wpływających na zmniejszenie zużycia elementów współpracujących w tym skojarzeniu ciernym, a także ograniczenie emisji hałasu, przy jednoczesnym zachowaniu prawidłowych własności trakcyjnych pojazdu [51].



Rys. 2.23. Układ przedstawiający umiejscowienie dysz pozwalających na aplikację warstwy smarującej na powierzchnię główki szyny oraz obrzeże koła jezdnego [51]

Dość powszechnie stosowaną techniką smarowania obrzeży kół jest aplikacja warstwy smarującej za pomocą smaru stałego. Polega ona na zabudowaniu w wózku jezdnym tuż przed kołem specjalnego aplikatora, w którym umieszczony jest wkład smarujący tzw. sztyft. Na rysunku 2.24 przedstawiono schemat umiejscowienia aplikatora z wkładką smarującą na ramie wózka jezdnego.



Rys. 2.24. Lokalizacja zabudowy sztyftu smarnego na ramie wózka jezdnego [52]

Dozowanie powłoki smarującej następuje poprzez dociskanie wkładu do powierzchni obrzeża koła za pomocą sprężyn zabudowanych w aplikatorze. Rozwiązanie to pozwala na ciągłą aplikację warstwy smarującej, aż do momentu całkowitego zużycia tych wkładów. Współpraca smarowanych kół jezdnych z szynami, w sposób pośredni powoduje przenoszenie środka smarującego na pozostałe koła [52].

2.6.3. Piasecznice

Jednym z podstawowych podzespołów, wchodzących w skład systemu przeciwpoślizgowego nowoczesnych wagonów tramwajowych, są piasecznice. Wykorzystuje się je do zwiększenia tarcia w momencie utraty przyczepności pomiędzy powierzchnią toczną koła, a główką szyny, która może wystąpić zarówno w przypadku rozruchu, w postaci tzw. rolowania kół, jak również podczas hamowania, w momencie zablokowania się kół i jazdy z poślizgiem po szynach [53]. Zjawisko niedostatecznej przyczepności może występować, gdy zmniejsza się współczynnik tarcia w układzie koło-szyna, np. w przypadku zaistnienia niekorzystnych warunków topograficznych (duże nachylenie terenu) lub śliskiej szyny na skutek m.in. dużej wilgotności powietrza atmosferycznego, bądź też zanieczyszczeń powstających w porze jesiennej z opadających liści, które osiadają na główkach szyn (tzw. czarna mada) [54].

Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje piasecznic – sterowane ręcznie przez motorniczego poprzez naciśnięcie specjalnego przycisku oraz sterowane automatycznie, przez system przeciwpoślizgowy, wykrywający różnice prędkości pomiędzy osiami napędzonymi znajdującymi się w pojeździe [55].



Rys. 2.25. Lokalizacja zabudowy dyszy piasecznicy w wagonie tramwajowym [źródło własne]

Piasecznice zabudowywane są tylko na wózkach napędzanych. W ich skład wchodzi dysze, zbiorniki piasku, elektrozawory, a także urządzenia odpowiedzialne za prawidłowe sterowanie systemem. Zbiorniki piasku montuje się wewnątrz nadwozia pojazdu w ścianach bocznych bądź też pod siedzeniami. Wyposażone są w moduły, odpowiadające za dozowanie piasku przez przewody zakończone dyszami, które zamontowane są przed powierzchniami tocznymi kół jezdnych [6].

Wykorzystywany piasek musi spełniać wymagania stawiane przez europejskie normy branżowe, aby zapewnić odpowiednie bezpieczeństwo poruszających się pojazdów. Zwykle stosowany jest piasek o określonych cechach, takich jak granulacja (od 0,6 do 1,6 [mm]), wilgotność (nie wyższa niż 0,5%), czy zawartość kwarcu (powyżej 90%) [56]. Duże znaczenie ma również miejsce przechowywania piasku,

ponieważ należy zapewnić odpowiednią wilgotność, aby nie zbrylał się, a w konsekwencji nie powodował zatykania przewodów i dysz piasecznic. Stąd też często tramwaje wyposaża się w układy osuszania piasku. Obecnie stosowanym rozwiązaniem jest aplikowanie piasku pod koła jezdne, przy użyciu sprężonego powietrza, ze zbiornika pneumatycznego, zasilanego przez sprężarkę tego układu.

Piasecznice muszą być odpowiednio skalibrowane pod kątem dozowania odpowiedniej ilości piasku pod koła jezdne. Zdarza się jednak, że w wyniku nieprawidłowych ustawień systemu przeciwpoślizgowego, obserwuje się znacznie większą aplikację piasku, niż wymaga tego dana sytuacja ruchowa. Powoduje to niekorzystne zjawisko nadmiernego odkładania się piasku na szynach (rys. 2.26), który wraz ze substancją smarującą koła jezdne oraz z innymi zewnętrznymi zanieczyszczeniami, negatywnie wpływa na właściwości trakcyjne, w efekcie doprowadzając do intensyfikacji zużycia elementów współpracujących w układzie koło-szyna.



Rys. 2.26. Nadmierne zgromadzony piasek przy szynach [źródło własne]

2.7. Charakterystyczne procesy zużycia występujące na obręczach kół tramwajowych

Współdziałanie szyn z kołami skutkuje tym, że na ich powierzchni obserwuje się różne objawy zużycia. Zestawy kołowe poddawane są działaniu wielu zmiennych w czasie obciążeń dynamicznych (poprzecznych i pionowych), które stanowią źródło kontaktowego zużycia elementów układu koło-szyna.

Zgodnie z definicją podaną w [57] zużycie elementów obiektu technicznego to trwałe, niepożądane zmiany jego stanu, które zachodzą w czasie eksploatacji w sposób ciągły lub skokowy, kumulujący się, co skutkuje tym, że okres spełniania przez element określonej funkcji użytkowej powoli wyczerpuje się. Natomiast zużycie tribologiczne to rodzaj zużycia powierzchni (proces niszczenia i usuwania materiału), powstały wskutek procesów tarcia, w wyniku którego dochodzi do zmian masy i/lub

wymiarów oraz kształtów, a także struktury oraz właściwości fizycznych trących elementów. Najczęściej przyczyny zużycia mają charakter mechaniczny. Rzadziej spotyka się zużycie o charakterze mechanicznym, połączonym z oddziaływaniem chemicznym, wynikającym z otoczenia. Punktem wyjściowym do badania procesów zużycia jest równanie Archarda (wzór 2.4) [26][41]:

$$\frac{V}{L} = k \frac{N}{H} \quad (2.4.)$$

gdzie:

V – objętość zużytego materiału [m³],

L – droga poślizgu [m],

k – współczynnik zużycia [-],

N – obciążenie pionowe w punkcie styku [N],

H – twardość bardziej miękkiego materiału [Pa].

Zużycie tribologiczne klasyfikuje się poprzez różne kryteria, gdyż jest to proces złożony, zależny od wielu czynników zewnętrznych. Stąd też, w warunkach rzeczywistej eksploatacji nie występuje wyłącznie jeden rodzaj zużycia. Analizując procesy zachodzące w danym węźle tribologicznym, zazwyczaj wskazuje się dominujący proces, który decyduje o rodzaju i wielkości zużycia [58]. Biorąc pod uwagę sposób zainicjowana, zużycia można podzielić na trzy kategorie [18]:

- zużycia, które postępują w sposób ciągły, jawny, a także bez silnego, dodatniego sprzężenia zwrotnego; nie powodują one katastrofalnych skutków; charakteryzują się ciągłym tworzeniem cząstek zużycia: adhezyjnego, ściernego, erozyjnego i frettingu;
- zużycia, które postępują w sposób ciągły i niejawny; są wynikiem kumulacji w warstwie wierzchniej energii, która po przekroczeniu pewnej wartości uwidacznia się w postaci wykruszeń powstających na skutek zużycia zmęczeniowego np. spallingu, pittingu lub zużycia kawitacyjnego;
- zużycia o charakterze katastroficznym, o silnym sprzężeniu zwrotnym powstałym w wyniku wystąpienia procesu zacierania, czyli scuffingu.

W przypadku obręczy kół stosowanych w wagonach tramwajowych, obserwuje się tendencję do występowania zużycia, które postępują w sposób ciągły i jawny. W eksploatowanych obręczach identyfikuje się takie podstawowe procesy zużycia jak [58][59]:

- zużycie ściernie – wiąże się z ubytkiem objętości materiału (mechaniczny proces zużycia); polega na oddzieleniu małych cząstek materiału z warstwy wierzchniej poprzez tarcie nierówności powierzchni (wskutek mikroskrawania, rysowania lub bruzdowania), a także na skutek obecności w strefie tarcia innych elementów twardszych od materiałów powierzchni trących (produkty zużycia i inne elementy, spełniające rolę ścierniwa), co powoduje ubytki materiału w skojarzonych elementach;

- zużycie adhezyjne – występuje zazwyczaj w miejscu styku dwóch powierzchni metalicznych, na skutek powstawania połączeń adhezyjnych na styku tych powierzchni, a także ich ścinania przy ruchu względnym; zachodzi głównie w mikroobszarach plastycznego odkształcenia warstwy wierzchniej, zwłaszcza na wierzchołkach nierówności;
- zużycie zmęczeniowe – występuje, gdy w warstwie wierzchniej ma miejsce cykliczne oraz długotrwałe oddziaływanie naprężeń kontaktowych (sprężysto-plastycznych), które powodują powierzchniowe uszkodzenia w postaci: pęknięć, wykruszeń (wżerów) oraz łuszczenia; jest ono spowodowane głównie zmęczeniem powierzchniowym/stykowym warstwy wierzchniej; zachodzi podczas współpracy dwóch obiektów sprężystych o prostej oraz krzywoliniowej powierzchni tarcia w warunkach tarcia tocznego lub toczenia z poślizgiem.

W trakcie eksploatacji obręczy kół tramwajowych, od samego początku dochodzi do zużycia ściernego i plastycznego, co w konsekwencji prowadzi do zniekształcenia nominalnego konturu profilu koła oraz szyny [60]. Najczęściej obserwuje się zmiany związane z kątem pochylenia obrzeża, a także jego wysokością oraz szerokością. W konsekwencji prowadzi to do nierównomiernego zużycia materiału, zwłaszcza w centralnej części powierzchni tocznej obręczy koła i wzrostu stożkowatości ekwiwalentnej płaszczyzny tocznej, która stanowi stosunek różnicy promieni wewnętrznych i zewnętrznych kół do przemieszczenia poprzecznego zestawu kołowego [61]. Na rysunku 2.27, przedstawiono efekty zużycia powstałe na wewnętrznej powierzchni obrzeża obręczy koła tramwajowego, gdzie wiodącymi procesami było zarówno zużycie ściernie, jak i plastyczne.



Rys. 2.27. Przykład zużycia powstałego na wewnętrznej części obrzeża koła tramwajowego [źródło własne]

Kolejnym istotnym przykładem zużycia są tzw. płaskie miejsca i narosty, które wynikają z poślizgu obręczy koła jezdnego po szynie, na skutek nieprawidłowego funkcjonowania układu hamulcowego i/lub niewłaściwego prowadzenia pojazdu (np. zbyt późne rozpoczęcie hamowania, nieprawidłowy rozruch) [62]. Do poślizgu mogą przyczynić się również niewłaściwe modyfikatory tarcia znajdujące się na powierzchni

tocznej szyny, takie jak: lód, śnieg, liście lub inne zanieczyszczenia, wpływające na obniżenie współczynnika tarcia. Płaskie miejsca zlokalizowane są na płaszczyźnie tocznej koła, powodując ubytek materiału (rys. 2.28). Bezpośrednio za nim tworzy się narost, którego materiał objętościowo odpowiada ubytkowi materiału [63].



Rys. 2.28. Płaskie miejsce na powierzchni tocznej obręczy koła [64]

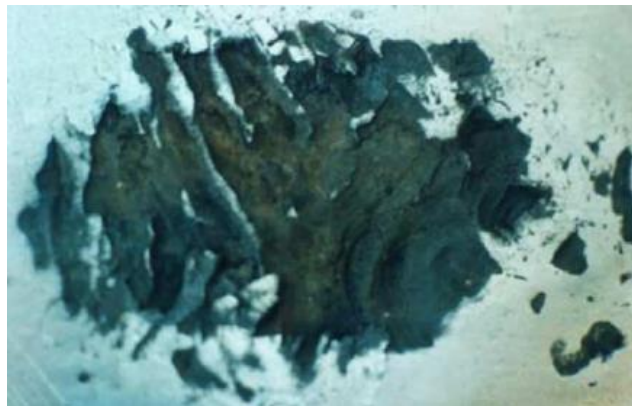
Przykładem zużycia zmęczeniowego wywołanego kontaktem tocznym (RCF – ang. Rolling Contact Fatigue) jest zużycie, które może rozwinąć się w dwie formy typu spalling lub shelling [65]. W praktyce ich rozróżnienie jest bardzo trudne, aczkolwiek przyczyny ich powstawania są różne. RCF wynikają z cyklicznego obciążenia skojarzonych elementów, co w konsekwencji skutkuje powstawaniem pęknięć, a finalnie wykruszeń zmęczeniowych. Do najczęstszych przyczyn, które inicjują zużycie typu spalling i shelling zalicza się poślizg koła na łukach, intensywne hamowanie, a także nierówności na powierzchni toru [66], [67]. Zużycia zmęczeniowe wywołane kontaktem tocznym mogą mieć źródło na, jak również pod powierzchnią toczną obręczy koła [68].

W zużyciu typu spalling (rys. 2.29), podczas poślizgu koła po szynie, energia tarcia może doprowadzić do gwałtownego wzrostu temperatury (minimum 730°C przez co najmniej kilka sekund) na powierzchni tocznej stykających się elementów, co powoduje metalurgiczną przemianę perlitu w kruchy martenzyt [69]. Następnie w wyniku cyklicznego kontaktu powierzchni tocznej z szyną, dochodzi do wykruszania martenzytu w postaci ubytków materiału tzw. łusek, których rozmieszczenie na obręczy nie ma jednorodnego charakteru [62]. Elementem charakteryzującym spalling są ślady poślizgu obok wykruszeń, a także obecność rozwalcowanych produktów zużycia. Łuszczenie poprzez spalling ma charakter powierzchniowy, stąd nie prowadzi do gwałtownego zużycia płaszczyzny tocznej koła [68].



Rys. 2.29. Przykład zużycia zmęczeniowego typu spalling na płaszczyźnie tocznej koła [65]

Zużycie typu shelling (rys. 2.30) powstaje na skutek poślizgu koła po szynie, w wyniku którego dochodzi do nagrzewania się warstwy wierzchniej koła do temperatury powyżej 300°C , przez dłuższy czas (co najmniej kilka minut) [69]. W konsekwencji powoduje to osłabienie płaszczyzny tocznej i zwiększa jej podatność na pęknięcia termiczne w obszarze styku z szyną. Elementem charakteryzującym shelling jest występowanie uszkodzeń na całym obwodzie koła, a także brak martenzytu, jaki obserwuje się w spallingu. Propagacji pęknięć w głąb warstwy wierzchniej koła sprzyja obecność zanieczyszczeń zewnętrznych, takich jak: pył, piasek, woda [66]. W ekstremalnych przypadkach dochodzi do tzw. makropęknięć, co skutkuje wyeliminowaniem koła z eksploatacji [68].



Rys. 2.30. Przykład zużycia zmęczeniowego typu shelling na płaszczyźnie tocznej koła [65]

Kolejnym przykładem jest zużycie faliste (zjawisko korrugacji), występujące zarówno na płaszczyznach tocznych kół, jak i na główkach szyn, w postaci regularnych nierówności (ciemnych zagłębień oraz jasnych grzbietów fal) w odstępach od 30 do 80 [mm] [70]. Zjawisko ma różnorodny przebieg, ze względu na dużą liczbę czynników sprzyjających ich powstawaniu, do których zaliczyć można rodzaj prowadzonego ruchu, jednorodność prowadzonego ruchu, zmienną prędkość jazdy wagonów tramwajowych, a także różnice w twardości szyn oraz obręczy kół. Jednakże główną jego przyczyną są drgania o częstotliwości 800 [Hz], które powstają w określonych warunkach hamowania [62]. Na rysunku 2.31 przedstawiono zużycie faliste powstałe na powierzchni tocznej szyny na prostym odcinku torowiska.



Rys. 2.31. Przykład zużycia falistego powstałego na powierzchni główki szyny kolejowej [źródło własne]

W przypadku szyn zużycie faliste występuje głównie na odcinkach prostych, gdzie przyjmuje kształt falisty, o długości fali od 30 do 100 [mm], a także na łukach torowych, jako zużycie faliste wewnętrzne, zwane falistym poślizgiem, o długości fali w zakresie od 100 do 200 [mm] [71]. Zastosowanie złej jakości podsypki, jak również jej degradacja w trakcie eksploatacji, stanowi czynnik sprzyjający powstawaniu tego zjawiska, na skutek zwiększenia sprężystości układu koło-szyna w kierunku pionowym [72].

2.8. Klasyfikacja stanów technicznych obiektów

Stan techniczny złożonego obiektu technicznego, jakim jest pojazd szynowy, określamy za pomocą właściwości jego elementów składowych. Oceniane są one na podstawie cech struktury wewnętrznej, które według różnych zależności zmieniają się w trakcie eksploatacji. W związku z powyższym, a także na podstawie prac [57], [73], [74], [75], przyjmuje się wektorową interpretację stanu technicznego pojazdu szynowego. Podstawowym pojęciem stosowanym w diagnostyce jest stan techniczny, determinowany przez wektor cech struktury wewnętrznej pojazdu szynowego, który można określić za pomocą wzoru 2.5 [57]:

$$X(t, a) = \left[x_1[f_{1,a}(t)], x_2[f_{2,a}(t)], \dots, x_n[f_{n,a}(t)] \right] \quad (2.5.)$$

gdzie:

$X(t, a)$ – wektor cech struktury wewnętrznej po okresie eksploatacji t w warunkach a ,
 n – liczba cech struktury wewnętrznej.

Cechami struktury wewnętrznej są cechy fizyczne, które odnoszą się do elementów danego obiektu. Jednakże nie zawsze cechy tego rodzaju można użyć w trakcie przeprowadzanych badań diagnostycznych (np. ze względu na brak dostępności pomiarowej cech, określających ten element). Stąd też oprócz dostępnych cech struktury wewnętrznej, wykorzystuje się inne cechy, charakteryzujące określone procesy robocze, które przebiegają w strukturze danego obiektu oraz są wynikiem funkcji użytkowych, realizowanych przez ten obiekt, a także niektóre cechy towarzyszące [75], [76]. Zaniedbując genezę tych cech, a także przyjmując wspólne

literowe oznaczenie, wartości wymienionych cech mogą tworzyć wektor cech diagnostycznych określony za pomocą poniższego wzoru 2.6 [57]:

$$Y(t, a) = [y_1[\varphi_{1,a}], y_2[\varphi_{2,a}], \dots, y_g[\varphi_{g,a}]] \quad (2.6.)$$

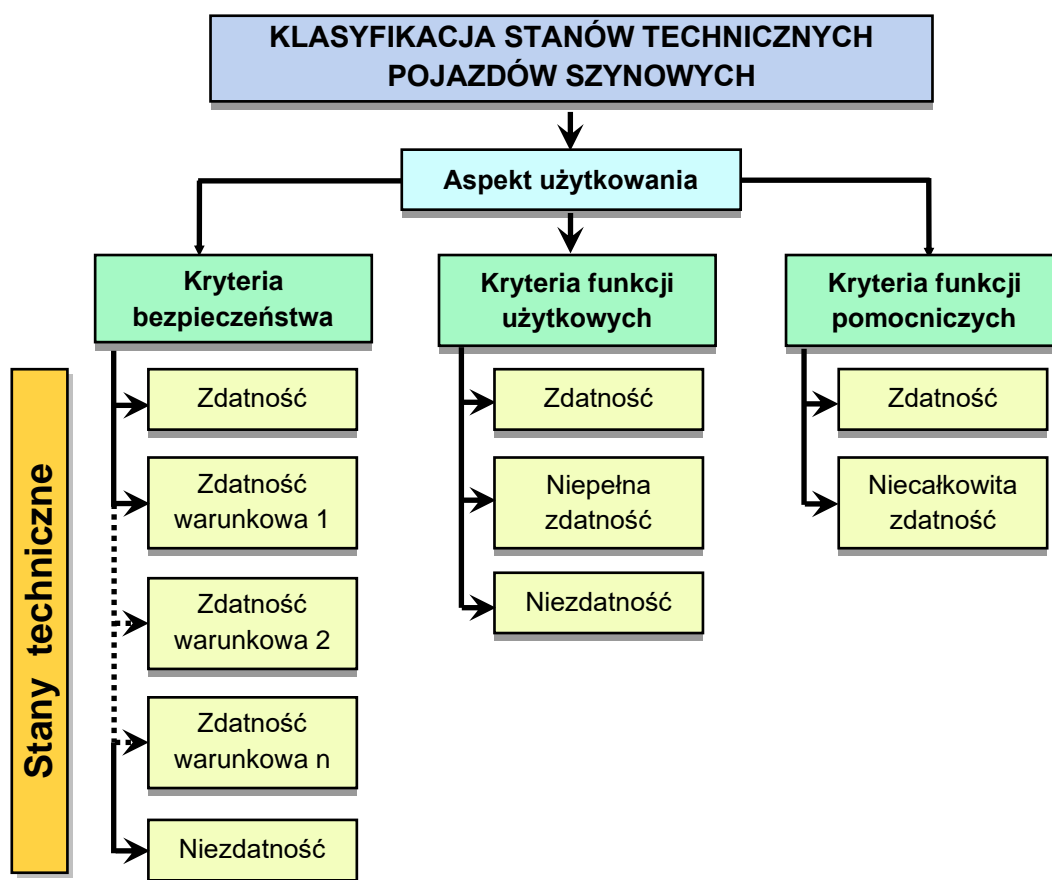
gdzie:

$Y(t, a)$ – wektor cech diagnostycznych obiektu po okresie eksploatacji t w warunkach a ,

y_1, \dots, y_g – cechy diagnostyczne obiektu,

$\varphi_{1,a} \dots \varphi_{g,a}$ – funkcje odwzorowujące cechy diagnostyczne w warunkach eksploatacji a .

Głównym kryterium klasyfikacji stanów technicznych w systemie użytkowania jest zapewnienie zgodności wartości konkretnych cech diagnostycznych obiektu technicznego z wymaganiami, które zawarte są obowiązujących przepisach, dotyczących bezpieczeństwa użytkowania tego obiektu. Kolejnymi kryteriami w systemie użytkowania są kryterium funkcji użytkowych, a także kryterium funkcji pomocniczych [76]. Poszczególne stany techniczne mogą być zidentyfikowane za pomocą warunków zgodności z wymaganiami cech diagnostycznych, należących do trzech zbiorów: cech bezpieczeństwa, cech zasadniczych oraz cech drugorzędnych [57]. Na rysunku 2.32 przedstawiono strukturę klasyfikacji stanów technicznych dla systemu użytkowania.



Rys. 2.32. Klasyfikacja stanów technicznych dla systemu użytkowania pojazdów szynowych [76]

Wyodrębnienie poszczególnych klas stanu technicznego jest możliwe na podstawie określonych zakresów wartości granicznych poszczególnych cech diagnostycznych. W najprostszej postaci zidentyfikowanie klas stanu technicznego uzyskać można, gdy istotna z technicznego punktu widzenia, cecha diagnostyczna nie przekracza pierwszego przedziału wartości granicznych. Stan ten określany jest stanem zdatności S_z [57]:

$$S_z \Leftrightarrow Y^1 = \{y_i: \forall_i [(y_i)_{\min} \leq y_i \leq (y_i)_{\max}]\} \quad (2.7.)$$

gdzie:

Y^1 – wektor cech diagnostycznych w przestrzeni zdatności,

y_i – wartość bieżąca i-tej cechy diagnostycznej,

$(y_i)_{\dots}$ – wartości graniczne dowolnej cechy diagnostycznej.

W sytuacji, gdy cechy diagnostyczne dotyczą cech bezpieczeństwa, niekiedy wyróżnia się poza stanem zdatności i niezdatności, także stany zdatności warunkowej, których liczba zależy od liczby przedziałów wartości granicznych, określonych w stosownych przepisach z zakresu bezpieczeństwa użytkowania danego obiektu technicznego. Przykładowo dla dwóch przedziałów wartości można określić stan zdatności warunkowej S_{zw1} , co nastąpi w sytuacji, gdy co najmniej jedna cecha zbioru cech bezpieczeństwa znajdzie się w drugim przedziale wartości dopuszczalnych [57]. W takim przypadku będzie to wymagało wdrożenia działań takich jak np. ograniczenie maksymalnej prędkości pojazdu.

$$\forall_{v \leq v_1} S_{zw1} \Leftrightarrow Y_b^2 = \left\{ y_{b_i}: \exists_{i \in I_1} \left[\begin{array}{l} (y_{b_i})_{\min 1} < [(y_{b_i})_{\max 1} = (y_{b_i})_{\min 2}] < y_{b_i} \leq (y_{b_i})_{\max 2} \vee \\ (y_{b_i})_{\max 1} > [(y_{b_i})_{\min 1} = (y_{b_i})_{\max 2}] > y_{b_i} \geq (y_{b_i})_{\min 2} \end{array} \right] \right\} \quad (2.8.)$$

gdzie:

Y_b^2 – wektor cech bezpieczeństwa w pierwszej przestrzeni zdatności warunkowej,

$i \in I_1$ – indeks cech ograniczających,

y_{b_i} – wartość bieżąca i-tej cechy bezpieczeństwa,

$(y_{b_i})_{\dots}$ – wartości graniczne cech bezpieczeństwa pierwszego i drugiego zakresu wartości.

W warunkach rzeczywistych operatorzy komunikacji miejskiej posługują się zazwyczaj dwoma zakresami wartości dopuszczalnych, które decydują o możliwości realizacji funkcji użytkowych przez obiekt techniczny [18]. Z kolei zakresy te określane są przez trzy wartości graniczne: maksymalna $(y_{z_i})_{\max}$, dopuszczalna $(y_{z_i})_{\text{dop}}$ i minimalna $(y_{z_i})_{\min}$. W zależności od zaistniałego trendu zmian cechy zasadniczej, można wyróżnić następujące zakresy, określone przez pary wartości granicznych [77]:

- dla trendu malejącego: pierwszy $\langle (y_{z_i})_{\max}, (y_{z_i})_{\text{dop}} \rangle$, a drugi $\langle (y_{z_i})_{\text{dop}}, (y_{z_i})_{\min} \rangle$,
- dla trendu rosnącego: pierwszy $\langle (y_{z_i})_{\min}, (y_{z_i})_{\text{dop}} \rangle$, a drugi $\langle (y_{z_i})_{\text{dop}}, (y_{z_i})_{\max} \rangle$.

W przypadku gdy nie wszystkie warunki są spełnione, występuje stan niepełnej zdatności S_{npz} , w którym ma miejsce przekroczenie środkowej wartości granicznej przez dowolną cechę zasadniczą, co w [57] zdefiniowano następująco:

$$S_{npz} \Leftrightarrow Y_Z^2 = \left\{ y_{z_i} : \exists_i \left[\begin{array}{l} (y_{z_i})_{dop} < y_{z_i} < (y_{z_i})_{min} < (y_{z_i})_{max} \vee \\ (y_{z_i})_{dop} > y_{z_i} > (y_{z_i})_{max} > (y_{z_i})_{min} \end{array} \right] \right\} \quad (2.9.)$$

gdzie:

Y_Z^2 – wektor cech zasadniczych w przestrzeni niepełnej zdatności,

y_{z_i} – wartość bieżąca i-tej cechy zasadniczej,

$(y_{z_i})_{...}$ – wartości graniczne cech zasadniczych (maksymalna, dopuszczalna, minimalna).

Natomiast w sytuacji, gdy cechy diagnostyczne pojazdu zakwalifikowane jako drugorzędne, czyli niemające wpływu na bezpieczeństwo oraz realizację podstawowych funkcji użytkowych, przekroczą jedną z wartości granicznych (minimalnej lub maksymalnej) ma miejsce stan niecałkowitej zdatności pojazdu szynowego S_{ncz} [57].

$$S_{ncz} \Leftrightarrow Y_d^2 = \left\{ y_{d_i} : \exists_i \left[y_{d_i} < (y_{d_i})_{min} \vee y_{d_i} > (y_{d_i})_{max} \right] \right\} \quad (2.10.)$$

gdzie:

Y_d^2 – wektor cech drugorzędnych w przestrzeni niecałkowitej zdatności,

y_{d_i} – wartość bieżąca i-tej cechy drugorzędnej,

$(y_{d_i})_{...}$ – wartości graniczne cech drugorzędnych.

Z kolei stan niezdatności S_{nz} występuje w sytuacji, kiedy po badaniu diagnostycznym okaże się, że jakakolwiek cecha bezpieczeństwa bądź zasadnicza, przekracza jedną ze skrajnych wartości granicznych, pod warunkiem, że wartością dopuszczalną cech bezpieczeństwa jest wartość minimalna $(y_{b_i})_{dop\ min}$ lub maksymalna $(y_{b_i})_{dop\ max}$, ostatniego przedziału wartości granicznych. W zależności od liczby zakresów danej cechy bezpieczeństwa lub zasadniczej. Stan ten można zdefiniować za pomocą poniższego wzoru 2.11 [57]:

$$S_{nz} \Leftrightarrow Y_Z^0 \vee Y_b^0 = \left\{ y_i : \exists_i \left[\begin{array}{l} y_{z_i} < (y_{z_i})_{dop} < (y_{z_i})_{min} < (y_{z_i})_{max} \vee \\ y_{z_i} > (y_{z_i})_{dop} > (y_{z_i})_{max} > (y_{z_i})_{min} \vee \\ y_{b_i} > (y_{b_i})_{dop\ max} \vee y_{b_i} < (y_{b_i})_{dop\ min} \end{array} \right] \right\} \quad (2.11.)$$

gdzie:

Y_Z^0 – wektor cech zasadniczych w przestrzeni niezdatności,

Y_b^0 – wektor cech bezpieczeństwa w przestrzeni niezdatności,

$(y_{b_i})_{dop\ max}$ – wartość maksymalna ostatniego zakresu wartości przy rosnącym trendzie zmian cech bezpieczeństwa,

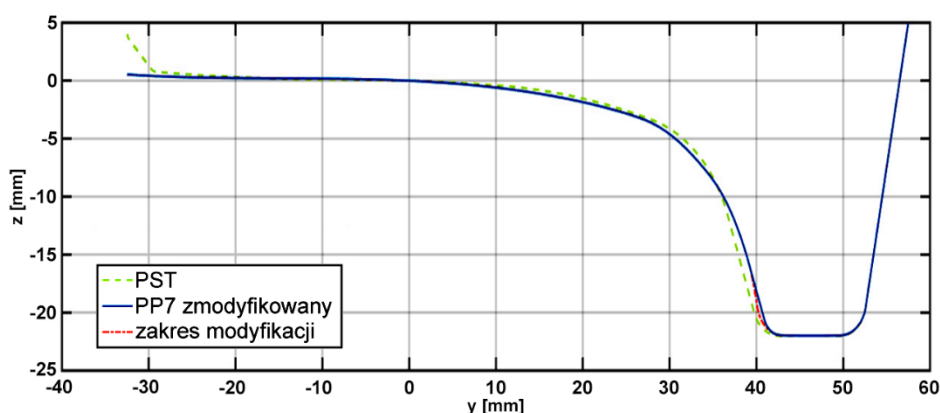
$(y_{b_i})_{dop\ min}$ – wartość minimalna ostatniego zakresu wartości przy spadkowym trendzie zmian cech bezpieczeństwa.

Wymienione trzy grupy kryteriów bezpieczeństwa użytkowania, spełnienia funkcji użytkowych, jak również pomocniczych, dotyczą pojazdów szynowych jako całość oraz są w pełni wystarczające w procesie podejmowania decyzji w systemie użytkowania [18], [57], [76].

2.9. Analiza stanu wiedzy

Zjawiska, które zachodzą obszarze koło-szyna od lat stanowią przedmiot badań teoretyczno-doświadczalnych. Prace powstałe na ten temat obejmują swoim zakresem zjawiska kontaktowe kół i szyn z ukierunkowaniem m.in. na: opracowanie optymalnych profili kół i szyn, ograniczenie zjawiska zużycia, jak również występowanie pęknięć zmęczeniowych, a także tworzenie algorytmów obliczeniowych do wyznaczania sił kontaktowych w tym układzie.

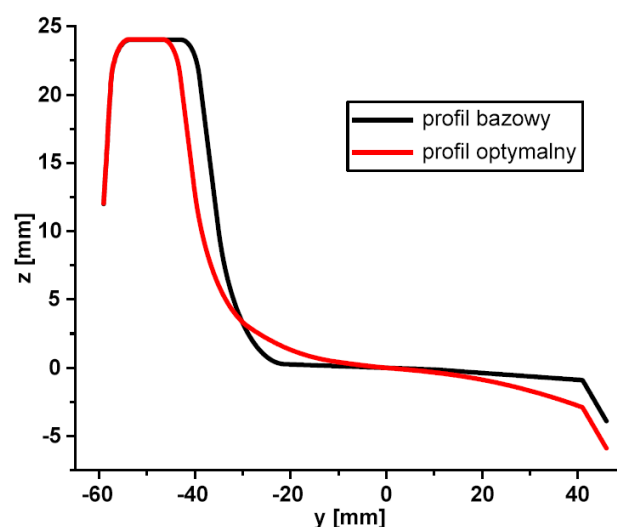
Obecnie w literaturze spotyka się badania dotyczące optymalizacji profili obręczy kół stosowanych w wagonach tramwajowych, jak i szyn, po których te pojazdy się poruszają. W pracy [78] przedstawiono badania w zakresie optymalizacji profilu koła. Profil koła został tam wygenerowany przy użyciu algorytmu genetycznego. Autorzy zaproponowali profil koła (PP7), który charakteryzuje się lepszymi parametrami niż obecnie eksploatowane profile kół w Poznaniu. W porównaniu do profilu PST otrzymany profil zapewnia większą powierzchnię styku obu kół w trakcie jazdy po łuku, a także zmniejszenie wskaźnika zużycia o 28% oraz wartości kryterium Nadala (Y/Q) o nawet 55%, co w konsekwencji korzystnie wpływa również na zmniejszenie zużycia. Aby wskaźniki te zostały osiągnięte w rzeczywistości, koła o profilu PP7 powinny być użytkowane na liniach o nowej infrastrukturze torowej, gdyż z uwagi na zużycie szyn starej infrastruktury torowej, może prowadzić do nieoptymalnego dopasowania. Rysunek 2.33 przedstawia porównanie zmodyfikowanego profilu PP7 (linia ciągła koloru niebieskiego) z profilem PST (linia przerywana koloru zielonego) wraz z zakresem modyfikacji końcówki kołnierza (linia przerywano-kropkowana koloru czerwonego).



Rys. 2.33. Zarzyski profili kół: PST (bazowy) i PP7 (zoptymalizowany) [78]

Kolejny przykład optymalizacji profilu koła przedstawiony został w pracy [79], w której autorzy przeprowadzili badania, zmierzające do zmniejszenia zużycia obrzeży

kół tramwajowych w trakcie poruszania się po łukach o małym promieniu. Zaproponowany profil charakteryzował się mniejszą grubością obrzeża, co wpływało na zwiększenie powierzchni styku, a w efekcie znacznie poprawiało nośność kół poruszających się po szynach oraz zmniejszało możliwość kontaktu obrzeża koła z szyną. Wyniki badań numerycznych potwierdziły, że opracowany profil nie tylko poprawiał charakterystykę dynamiczną pokonywania łuków, ale również pozwalał zmniejszyć zużycie kół pojazdu tramwajowego. Na rysunku 2.34 przedstawiono porównanie profilu bazowego (linia ciągła koloru czarnego), wykorzystanego do modelowania, a także profilu otrzymanego w wyniku symulacji (linia ciągła koloru czerwonego).



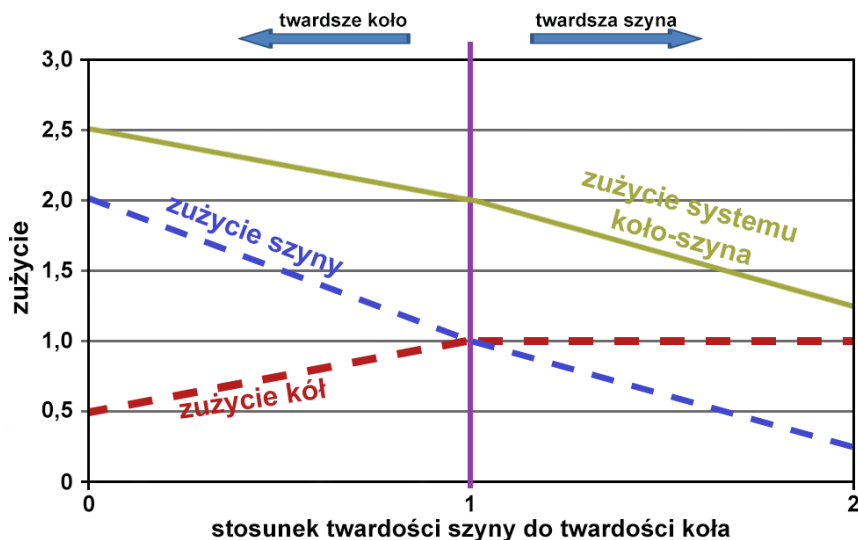
Rys. 2.34. Zarysy profili kół tramwajowych, bazowy (czarny), optymalny (czerwony) [79]

Z kolei w pracy [80] zaproponowano optymalizację profilu koła kolejowego za pomocą funkcji rozkładu Weibulla, celem zwiększenia ogólnego współczynnika przyczepności występującego w różnych punktach styku na powierzchni koło-szyna. Autorzy przeprowadzili analizę geometryczną profili kół i szyn, a także oszacowanie kontaktu nieeliptycznego, w celu weryfikacji zoptymalizowanego profilu, pod kątem zapewnienia odpowiedniego kontaktu, współpracujących elementów w tym układzie ciernym. Zrealizowane badania potwierdziły, że optymalizacja profilu koła nie wpływa niekorzystnie na właściwości dynamiczne pojazdu szynowego, takie jak stabilność podczas jazdy, aczkolwiek mniejszy nacisk w strefie styku, większa powierzchnia styku, a także wyższy współczynnik przyczepności mogą prowadzić do intensyfikacji zużycia w układzie koło-szyna.

Crosbee i Allen w swojej pracy [81], podjęli się zadania opracowania nowego profilu koła, wykorzystywanego w pojazdach, które mogą się poruszać zarówno po infrastrukturze kolejowej, jak i tramwajowej. W przeciwieństwie do wcześniej opisanych optymalizacji, w tym przypadku autorzy skupili się wyłącznie na zapewnieniu kompatybilności koła z dwoma typami infrastruktury torowej, po której będzie się ono poruszać. Podobne zadanie podjęli Vinkó i Bocz [82], których głównym celem było opracowanie koła o odpowiedniej geometrii profilu z uwzględnieniem aktualnych

standardów na Węgrzech, przeznaczone do użytkowania zarówno po infrastrukturze kolejowej, jak i tramwajowej.

Z tribologicznego punktu widzenia niezwykle ważny jest dobór materiałów stosowanych na obręcze kół i szyny. Dotyczy to szczególnie składu chemicznego, wytrzymałości na rozciąganie oraz twardości. Badania w warunkach eksploatacyjnych, przeprowadzone przez Steel i Reiff [83], pozwoliły na sformułowanie zależności pomiędzy zużyciem kół, szyn i całego systemu koło-szyna oraz stosunkiem twardości szyny do twardości koła (rys. 2.35). Analiza wyników wykazała, że gdy stosunek twardości szyny do twardości koła jest mniejszy od 1, szyna jest bardziej miękka niż koło, ale wraz ze wzrostem jej twardości, zużycie szyny będzie maleć, przy jednoczesnym wzroście zużycia się kół. Natomiast gdy stosunek twardości szyny do twardości koła jest większy lub równy 1, zużycie szyny zmniejsza się wraz ze wzrostem jej twardości, podczas gdy zużycie koła jest stabilne. Z kolei całkowite zużycie całego systemu koło-szyna zmniejsza się wraz ze wzrostem H_R/H_W w obu przypadkach.



Rys. 2.35. Zużycie w układzie koło/szyna a stosunek twardości szyna do twardości koła [84]

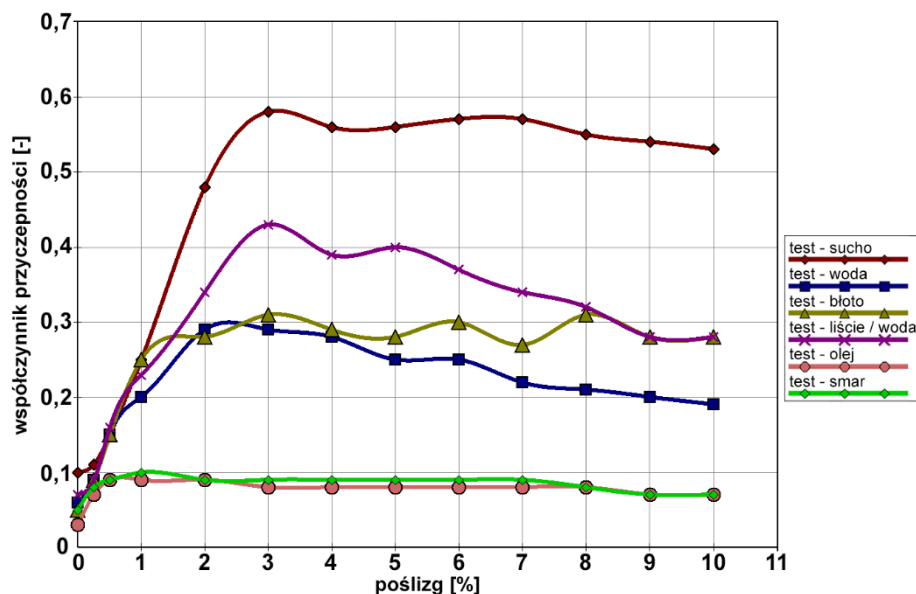
Należy zwrócić uwagę, że w wyniku eksploatacji elementy skojarzone w układzie koło-szyna, ulegają wzmocnieniu w wyniku zgniotu, co skutkuje wzrostem początkowych twardości powierzchni kół i szyn, nawet o 70% w stosunku do twardości materiału rdzenia [14]. Natomiast z badań przeprowadzonych przez Prinza wynika, że w przypadku gdy twardość materiału obręczy jest większa (ok. 20%) od twardości szyny, wówczas zużycie obu współpracujących elementów jest najmniejsze [8].

W pracy [85] poddano ocenie właściwości materiałowe, a także charakterystykę zmęczeniową elementów układu koło-szyna oraz zbadano ich wpływ na występowanie zużycia zmęczeniowego, wywołanego kontaktem tocznym (RCF). Analiza badań wykazała, że tempo wzrostu pęknięć, a także twardość były istotnymi czynnikami, które wpływały na inicjację zużycia zmęczeniowego w styku tocznym. Z kolei w pracy [86] autorzy również zbadali właściwości materiałowe stali o różnych wartościach twardości, które powszechnie wykorzystywane są do produkcji kół oraz szyn. Otrzymane wyniki

pozwalają dobrać materiały o odpowiednim stosunku twardości szyny do twardości koła, pod kątem większej trwałości w trakcie ich eksploatacji. Podobne zagadnienie poruszono w pracy [87], w której przeprowadzone badania potwierdziły, że przy stosunku twardości koła (H_w), do twardości szyny (H_r) w zakresie od 0,927 do 1,218 ma miejsce najmniejsze zużycie kół. Natomiast w przypadku, gdy H_w/H_r wynosi 1,218 tempo zużycia szyn wykazuje tendencję wzrostową. Wykazano również, że na wskaźnik zużycia elementów w układzie koło-szyna istotny wpływ mają warunki sprzyjające intensywności występowania poślizgów, w trakcie poruszania się pojazdu po torze. Z kolei w pracy [88] skupiono się głównie na ograniczeniu zjawiska zużycia, poprzez propozycje wprowadzenia nowego gatunku stali przeznaczonego do produkcji szyn tramwajowych (rowkowych).

Kolejnym zagadnieniem poruszonym przez badaczy, w kontekście układu koło-szyna są modyfikatory tarcia. W zależności od warunków eksploatacji pojazdu potrzebne są różne współczynniki przyczepności – np. niska przyczepność wpływa negatywnie na prowadzenie pojazdu w trakcie hamowania (wydłużenie drogi hamowania) oraz następuje intensyfikacja zużycia na powierzchni tocznej. Z drugiej strony niska przyczepność jest pożądana w trakcie pokonywania łuków o małym promieniu, co zapobiega zjawisku wpinania się obrzeża koła na główkę szyny.

W pracy [31] poruszono zagadnienie związane ze zjawiskami adhezji. Autor opracował model numeryczny, służący do przewidywania przyczepności w układzie koło-szyna na podstawie odwzorowanych rzeczywistych warunków współpracy powierzchni. Badania wykazały, że modyfikatory tarcia lub zanieczyszczenia, znajdujące się w tym otwartym węźle tribologicznym (m.in. woda, olej, liście, produkty zużycia, piasek) w znaczący sposób wpływają na wartość współczynnika tarcia, a co za tym idzie na właściwości jezdne pojazdu. Podobne zagadnienie poruszyli w swojej pracy [89] Tsadik i Tilahun, którzy analizowali zakres utraty przyczepności w styku koło-szyna pod wpływem zanieczyszczeń, takich jak: wody, błota, liści, oleju i smaru. Wyniki badań wykazały, że liście znajdujące się na szynie, w przeciwieństwie wody, olejów bądź smarów, w znaczący sposób obniżają współczynnik przyczepności. Dlatego też istotnym jest odpowiednie wykonywanie zabiegów oczyszczania szyn, szczególnie w okresie jesiennym. Na rysunku 2.36 przedstawiono wpływ poślizgu na współczynnik przyczepności w różnych warunkach istniejących na powierzchni szyn.



Rys. 2.36. Wpływ poślizgu na współczynnik przyczepności w różnych warunkach istniejących na powierzchni szyn [89]

Natomiast w pracy [90] zaprezentowano wyniki badań, wpływu na przyczepność w układzie koło-szywa zanieczyszczeń, takich jak sól oraz piasek, które są aplikowane na przejazdy kolejowo-drogowe, jako metoda zapobiegania tworzeniu się lodu w miesiącach zimowych.

W pracy [30] przedstawiono wyniki przeprowadzonych eksperymentalnych badań, zarówno w warunkach laboratoryjnych, jak i rzeczywistych, modyfikatorów typu „top-of-rail”, stosowanych na powierzchni tocznej szyny, w celu optymalizacji przyczepności i zmniejszenia emisji hałasu. Otrzymywane wyniki wykazały, że zastosowane modyfikatory zapewniają korzystne właściwości cierne, aczkolwiek tylko w przypadku odpowiedniej ich ilości. Zbyt duża ilość w obszarze styku obniża przyczepność, co w konsekwencji negatywnie wpływa na bezpieczeństwo, wydłużając drogę hamowania pojazdu. W trakcie badań stwierdzono również, że przy zastosowaniu zaproponowanych w pracy produktów typu „top-of-rail”, trudnym do osiągnięcia jest zmniejszenie zużycia przy jednoczesnym zachowaniu odpowiedniej przyczepności, czyli bez wpływu na właściwości trakcyjne pojazdu.

Z kolei w pracy [91], przedstawiono metody zwiększenia współczynnika przyczepności kół pojazdów kolejowych. Metody te wpływają na zmniejszenie energochłonności pojazdów, znacząco obniżają zużycie powierzchni tocznych kół oraz szyn (przede wszystkim w trakcie pokonywania łuków torowych), a także poprawiają spokojność biegu w trakcie jazdy. Autorzy zaproponowali np. zastosowanie różnych modyfikatorów powierzchni ciernych (piasku, materiałów pochodzenia naturalnego, ściernego proszku magnetycznego), a także mechaniczne oraz chemiczne czyszczenie szyn (iskrowe, plazmowe lub za pomocą strumienia magnetycznego).

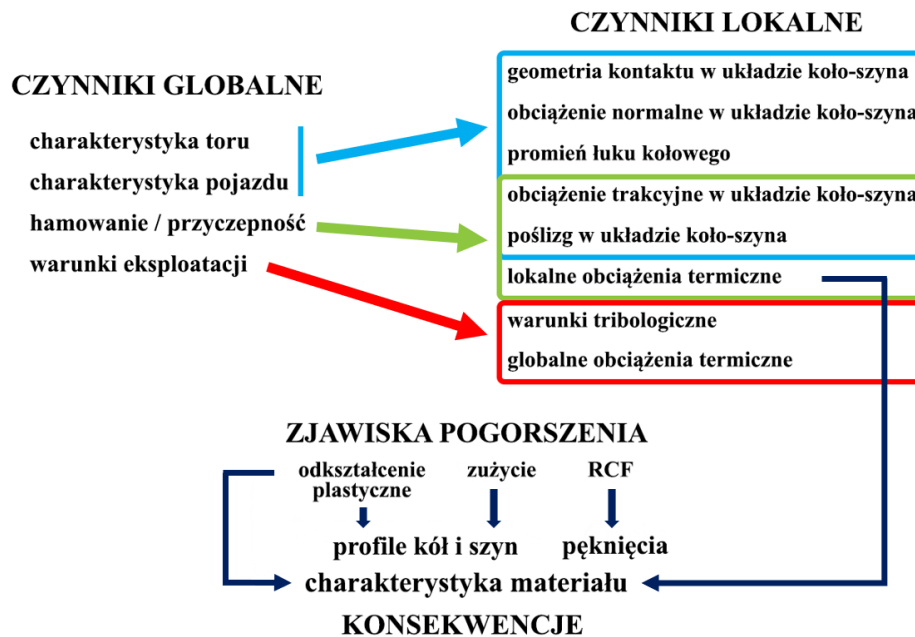
W pracy [92] Bąkowski przeprowadził analizę wpływu wybranych smarów stałych, które stosowane są do smarowania obrzeży kół kolejowych, na powstawanie i rozwój

korozji. Badania porównawcze właściwości antykorozyjnych wybranych smarów stałych z dodatkiem olejów sojowych, grafitu i dwusiarczku molibdenu wykonano w środowisku neutralnym (w wodzie destylowanej) i korozyjnym (w syntetycznej wodzie morskiej). Wyniki wykazały, że w zależności od zastosowanego modyfikatora obserwowano różną intensywność rozwoju korozji na powierzchni szyny, np. smar stały z dodatkiem oleju sojowego zwiększał odporność na korozję, natomiast z dwusiarczkiem molibdenu był najbardziej podatny na korozję.

Alternatywą dla środków smarnych są powłoki samosmarujące. Ich wpływ na właściwości dynamiczne i zużycie elementów układu koło-szyna został przedstawiony w pracy [93]. Z przeprowadzonych badań symulacyjnych wynika, że zastosowanie powłok samosmarujących na powierzchnię toczną kół pojazdów kolejowych, nie wpływa negatywnie na właściwości dynamiczne pojazdów. Zwrócono również uwagę, że koła pokryte powłoką samosmarującą, charakteryzują się co najmniej dwukrotnie mniejszym zużyciem powierzchni, w porównaniu do standardowych kół, szczególnie w przypadku poruszania się pojazdu po łukach o małych promieniach, przy których przewiduje się nawet pięciokrotnie mniejsze zużycie.

Przewidywanie zużycia kół oraz szyn jest istotnym zagadnieniem w dziedzinie badań zjawisk zachodzących w otwartym węźle tribologicznym. Chodzi przy tym o aspekty ekonomiczne, poprawność użytkowania, jak również zapewnienie odpowiedniego bezpieczeństwa. Temat ten poruszono w pracy [94], której celem było wdrożenie elastycznego i predykcyjnego narzędzia do modelowania zużycia kół pojazdów szynowych. Autorzy zaproponowali model obliczeniowy, wykorzystujący kilka scenariuszy symulacyjnych, który poprzez ocenę stanu technicznego pojazdu i infrastruktury, pozwala przewidywać procesy zużycia.

Ważnym aspektem związanym z eksploatacją układu koło-szyna jest właściwe diagnozowanie i utrzymanie stanu podatności pojazdu. Zagadnienie to zostało poruszone w pracy [95], gdzie przedstawiono analizy predykcyjne oraz strategie monitorowania odkształcenia plastycznego, charakterystycznych zużyć oraz zmęczenia w obszarze styku tocznego RCF, które pogorszają jakość współpracujących elementów. W artykule podkreślono istotny wpływ połączenia modelowania fizycznego i analizy danych eksploatacyjnych, a także korzyści, jakie można uzyskać z częściej przeprowadzanych procesów obsługowych, w celu uzyskania większej trwałości skojarzonych elementów układu koło-szyna. Na rysunku 2.37 przedstawiono relacje między globalnymi warunkami eksploatacji i lokalnymi czynnikami, a zjawiskami w układzie koło-szyna oraz wynikającymi z nich konsekwencjami.



Rys. 2.37. Zależności pomiędzy globalnymi warunkami eksploatacji i lokalnymi czynnikami, a zjawiskami w układzie koło-szyna oraz wynikającymi z nich konsekwencjami – opracowanie własne na podstawie [95]

Rysunek 2.37 przedstawia powiązanie istotnych zjawisk pogorszenia jakości współpracujących elementów w układzie koło-szyna, z warunkami eksploatacji pojazdu. Istotnym w eksploatacji układu koło-szyna jest również stosowanie odpowiednich technik diagnozowania zjawisk zużycia w warunkach rzeczywistych. W pracy [96] zaproponowano zastosowanie termowizji do identyfikacji wielkości obszaru styku, miejsca ich lokalizacji oraz intensywności wydzielania ciepła na skutek tarcia, a także odkształcenia materiału pary czarnej, co ma kluczowy wpływ na intensywność zużycia. Autorzy podkreślają, że technika ta odnosi się do rzeczywistych warunków pracy, bez ograniczeń podyktowanych założeniami symulacyjnymi czy warunkami laboratoryjnymi.

Zagadnienia związane ze zjawiskami zachodzącymi w układzie koło-szyna są szeroko poruszane w zagranicznej, jak i krajowej literaturze, aczkolwiek większość z nich dotyczy problematyki pojazdów kolejowych. Niestety nie jest możliwe odniesienie wszystkich wyników przeprowadzonych analiz oraz badań do pojazdów tramwajowych, ze względu na szereg różnic wynikających m.in.: z konstrukcji obręczy koła jezdnego, profilu tocznego, charakteru poruszania po łukach o małym promieniu (około 18 [m]), a także konstrukcji całego pojazdu i infrastruktury torowej.

Przeprowadzona analiza literatury potwierdza wieloaspektowość zjawisk, zachodzących w układzie koło-szyna, odnoszących się do trwałości, użytkowania i niezawodności kół pojazdów szynowych, optymalizacji stosowanych profili obręczy kół tramwajowych, dobór stali o odpowiednich właściwościach materiałowych (głównie pod kątem twardości), zastosowania w określonym miejscu styku modyfikatorów tarcia, jak również właściwych wytycznych dotyczących procesu obsługi.

3. Cel i zakres pracy

Celem naukowym niniejszej pracy doktorskiej jest zbadanie wpływu wybranych cech konstrukcyjnych układu biegowego na niezawodność i trwałość obręczy kół tramwajowych. Sformułowanie tego celu wynikało ze szczegółowo przeprowadzonej analizy obecnego stanu wiedzy z zakresu związanego z tematem pracy, a także pozyskania danych eksploatacyjnych, dotyczących obręczy kół tramwajowych wybranych wagonów użytkowanych przez operatorów komunikacji w Polsce.

Kwantyfikację celu naukowego uzyskano wskazując następujące cele cząstkowe:

- analiza porównawcza wpływu typu konstrukcji układu biegowego na niezawodność i trwałość obręczy kół wybranych typów wagonów tramwajów;
- opracowanie modelowych kompozycji badawczych (15 zestawów badawczych), z wybranych modyfikatorów tarcia, mogących występować w układzie koło – szyna i odzwierciedlających rzeczywiste warunki eksploatacyjne;
- analiza i ocena wpływu wybranych modyfikatorów tarcia na intensywność zużycia i wartość współczynnika tarcia, z wykorzystaniem modelowych kompozycjach badawczych;
- analiza i ocena struktur geometrycznych powierzchni, zaobserwowanych podczas badań modyfikatorów tarcia na modelowym skojarzeniu badawczym.

Celem użytkowym pracy jest opracowanie innowacyjnej substancji smarującej, przez zespół badawczy, pod kierownictwem autora pracy, która mogłaby być z powodzeniem zastosowana do smarowania obrzeży kół tramwajowych, umożliwiając w ten sposób zmniejszenie intensywności procesów zużywania się kół, przy zachowaniu właściwych cech użytkowych wagonu tramwajowego.

Zakres pracy niniejszej rozprawy doktorskiej obejmuje:

- analizę obecnego stanu wiedzy w obszarze współpracy elementów w układzie koło – szyna, a także procesów zużycia tam zachodzących;
- określenie trwałości umownej obręczy koła tramwajowego za pomocą funkcji niezawodności w wybranych wagonach tramwajowych, eksploatowanych w Polsce;
- określenie istotnych właściwości tribologicznych modelowych kompozycji badawczych z wykorzystaniem testera tribologicznego T-02U;
- wyznaczenie parametrów chropowatości na powierzchniach kulek pomiarowych, wykorzystanych do badań tribologicznych modelowych kompozycji badawczych, za pomocą mikroskopu optycznego Keyence serii VHX-7000,
- analizę i ocenę porównawczą otrzymanych wyników badań.

4. Badania probabilistyczne w zakresie trwałości obręczy eksploatowanych w wagonach tramwajowych

W trakcie eksploatacji wagonów tramwajowych istnieje wiele cech, które należy diagnozować ze względów bezpieczeństwa i niezawodności tego obiektu technicznego. Stąd też wszystkie pojazdy podlegają planowym rodzajom obsługi, wykonywanym zgodnie z przyjętymi cyklami profilaktyczno-zapobiegawczymi, w których odstęp pomiędzy kolejnymi działaniami determinuje przebieg pojazdu wyrażony w kilometrach. Zakres wykonywanych czynności jest uwarunkowany przez ogólnokrajowe wymagania prawne w zakresie obsługi, a także przez stan techniczny poszczególnych pojazdów w danym momencie procesu eksploatacji oraz możliwości techniczno-organizacyjne operatora transportu publicznego.

Warunki eksploatacji można zdefiniować jako całokształt zagadnień, które wiążą się zarówno z użytkowaniem wagonu tramwajowego podczas realizacji usługi przewozowej na liniach komunikacyjnych, jak i ze wszystkimi czynnościami obsługowymi, pozwalającymi na utrzymanie wysokiego poziomu wskaźnika gotowości technicznej pojazdu. Z pojęciem warunków eksploatacji ściśle związane są zagadnienia, dotyczące rozwiązań konstrukcyjnych samego pojazdu, jak również z typem i jakością zastosowanych materiałów oraz z szeroko rozumianą infrastrukturą. Infrastruktura to torowiska, sieć trakcyjna oraz urządzenia sterujące ruchem, a także kompleksowo wyposażone stacje obsługi technicznej, wraz ze specjalistycznym sprzętem do diagnozowania stanu technicznego wagonów tramwajowych. Pomędzy tymi dwoma składnikami infrastruktury znajduje się obiekt techniczny, czyli tramwaj, który musi wykorzystać i stać się wspólną ich częścią, aby zapewnić przewóz pasażerów w komfortowych oraz bezpiecznych warunkach, przy założonej punktualności przejazdów.

W głównej mierze niezbędna jest do tego systematyczna kontrola wymiarów geometrycznych układu biegowego, który jest kluczowym zespołem wpływającym na prawidłowe prowadzenie pojazdu w torze. Czynności obsługowe wykonywane w odpowiednich odstępach czasowych, będą bezpośrednio wpływać na wysoką niezawodność i trwałość kół jezdnych w obecnie eksploatowanych niskopodłogowych wagonach tramwajowych, w których dość często obserwuje się różnice w intensywności zużycia pomiędzy wózkami tocznymi, a napędnymi. Daje się to zauważyć w wagonach typu NGT6.

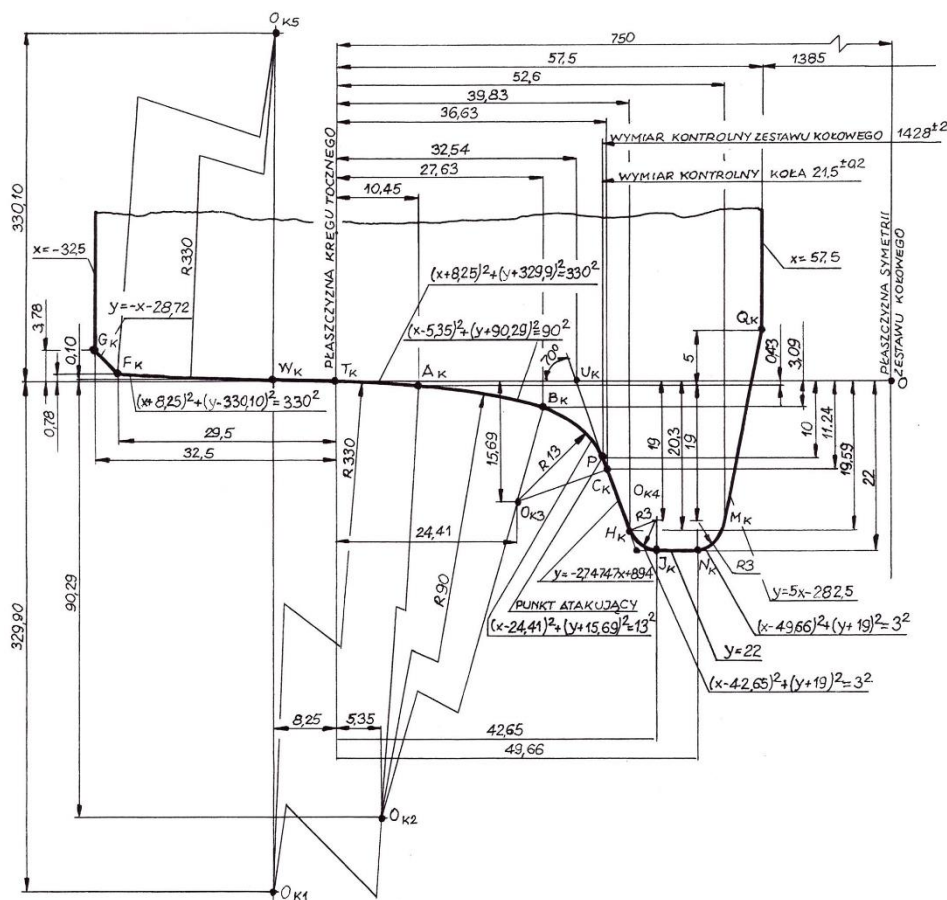
4.1. Cechy geometryczne układu biegowego tramwaju zalecane do monitoringu

W przypadku pojazdów szynowych komunikacji miejskiej ze względu na odmienną konstrukcyjną układu biegowego, a w szczególności zestawów kołowych i zarysów wieńców kół, koniecznym jest indywidualne podejście do analizy cech diagnostycznych monitorowanych w trakcie eksploatacji.

Norma [15] PN-K-88251 „Zestawy kołowe taboru tramwajowego - Kontur bieżni kół elastycznych wagonów tramwajowych” (obecnie nieobowiązująca, jednakże wciąż stosowana w praktyce eksploatacyjnej), wyróżnia istotne określenia, które wykorzystuje się w procesie eksploatacji zestawów kołowych:

- długość prowadna zestawu kołowego d – rozumiana jako odległość między punktami atakującymi, czasami nazywanymi punktami przyporu P, położonymi na obu kołach zestawu kołowego,
- rozstaw kręgów toczyń St – rozumiany jako odległość między płaszczyznami kręgów toczyń obu kół zestawu kołowego.

Na rysunku 4.1 zaprezentowano schemat charakterystycznych punktów współrzędnych geometrycznych zarysu wieńca koła zgodnego z normą [15].



Rys. 4.1. Schemat charakterystycznych punktów współrzędnych geometrycznych konturu bieżni obręczy koła tramwajowego [15]

Obecnie operatorzy komunikacji miejskiej, dzięki wykorzystaniu nowoczesnych stanowisk z bezstykowym pomiarem zarysów wieńców kół, mają możliwość wykonywania bieżących, codziennych pomiarów zestawów kołowych. Dlatego też w celu zapewnienia właściwego stanu technicznego poszczególnych elementów, można wyznaczyć cechy diagnostyczne, które powinny podlegać systematycznemu monitorowaniu. W tabeli 4.1 przedstawiono cechy geometryczne układu biegowego tramwaju, zalecane do identyfikacji w procesie diagnostyki, które w pracy [18]

zestawiono w pod kątem hierarchii ich ważności dla prawidłowego prowadzenia zestawu kołowego w torze.

Tabela 4.1. Cechy geometryczne zalecane do identyfikacji układu biegowego tramwaju [18]

lp.	Nazwa cechy geometrycznej	Symbol
1.	Długość prowadna zestawu kołowego	d
2.	Grubość obrzeża koła	g
3.	Wysokość obrzeża koła	h
4.	Wymiar kontrolny A wg. PN-K-92016 (szerokość obrzeża obręczy wg. PN-91 K-88251)	b
5.	Rozstaw wewnętrznych płaszczyzn czołowych obręczy	p
6.	Średnica toczna koła, odniesienie jej do wartości minimalnej	D
7.	Różnice średnic kół w zestawie kołowym lub osi rozprężonej	ΔD
8.	Maksymalna różnica średnic kół w wózku	ΔD_w
9.	Maksymalna różnica średnic kół w pojeździe	ΔD_p
10.	Różnica przekątnej punktów przyporu w zestawach kołowych w jednym wózku	Δz

Jak wynika z tabeli 4.1 długość prowadna zestawu kołowego, grubość oraz wysokość obrzeża są istotnymi cechami diagnostycznymi, których wartości graniczne identyfikuje się jako podstawowe kryterium wykorzystywane do oceny stanu technicznego, co stanowi podstawę do podjęcia decyzji o reprofilacji (odnowie) zarysów wieńców kół. Obecnie wykorzystuje się w praktyce eksploatacyjnej wymiary graniczne poszczególnych cech wymienione w normach [15], [16], [97], które uzupełnia się o wartości geometryczne, dotyczące właściwego położenia zestawu kołowego w torze, znajdujące się w dokumentacji technicznej (np. Dokumentacji Techniczno-Ruchowej).

W tabelach 4.2 i 4.3 przedstawiono, dla powszechnie wykorzystywanego profilu PST, przyjęte do stosowania zalecane wartości granicznie dotyczące [18]:

- wózka napędnego – zarówno z zestawami kołowymi połączonymi sztywną osią, jak również dla rozprężonych zestawów kołowych z indywidualnym napędem kół,
- wózka tocznego – zarówno wyposażonego w tradycyjne zestawy kołowe połączone osią, jak i z niezależnie obracającymi się kołami połączonymi osią portalową.

W tabeli 4.2 zamieszczono maksymalne, minimalne, jak również zalecane wartości graniczne, geometrycznych cech diagnostycznych zarysu wieńca koła i zestawu kołowego dla wózków napędnych.

Tabela 4.2. Zestawienie wartości granicznych geometrycznych cech diagnostycznych opisujących wózek napędny wagonu tramwajowego [18]

lp.	Nazwa cechy geometrycznej		Minimalna wartość graniczna	Maksymalna wartość graniczna	Zalecana teoretyczna wartość graniczna
			[mm]	[mm]	[mm]
1.	Długość prowadna, d	tor o szer. 1435 [mm]	1426,1	1429,9	1428,0
		tor o szer. 1000 [mm]	991,6	994,4	993,0
2.	Grubość obrzeża, g		11,0	17,0	17,0
3.	Wysokość obrzeża, h		16,0	22,0	22,0
4.	Wymiar kontrolny A, b		15,5	21,7	21,5
5.	Rozstaw wewnętrznych płaszczyzn czołowych obręczy, p	tor o szer. 1435 [mm]	1383,5	1386,5	1385,0
		tor o szer. 1000 [mm]	951,0	949,0	950,0
6.	Średnica toczna koła, odniesienie jej do wartości minimalnej D		520 (nominalna wg DTR dla wagonu NGT8); 510 (nominalna wg DTR dla wagonu NGT6);	600 (nominalna wg DTR dla wagonu NGT8); 590 (nominalna wg DTR dla wagonu NGT6);	600 (nominalna wg DTR dla wagonu NGT8); 590 (nominalna wg DTR dla wagonu NGT6);
7.	Różnice średnic kół w zestawie kołowym lub osi rozprężonej, ΔD		dążyć do wartości < 1,0	1,0	0
8.	Maksymalna różnica średnic kół w wózku, ΔD_w		dążyć do wartości < 1,0	2,0	0
9.	Maksymalna różnica średnic kół w pojeździe, ΔD_p		0	5,0	0
10.	Różnica przekątnej punktów przyporu w zestawach kołowych w jednym wózku, Δz		0	3,0	0

Z kolei w tabeli 4.3 zestawiono maksymalne, minimalne, jak również zalecane wartości graniczne, geometrycznych cech diagnostycznych zarysu wieńca koła i zestawu kołowego dla wózków tocznych.

Tabela 4.3. Zestawienie wartości granicznych geometrycznych cech diagnostycznych zestawów kołowych wózka tocznego wagonu tramwajowego [18]

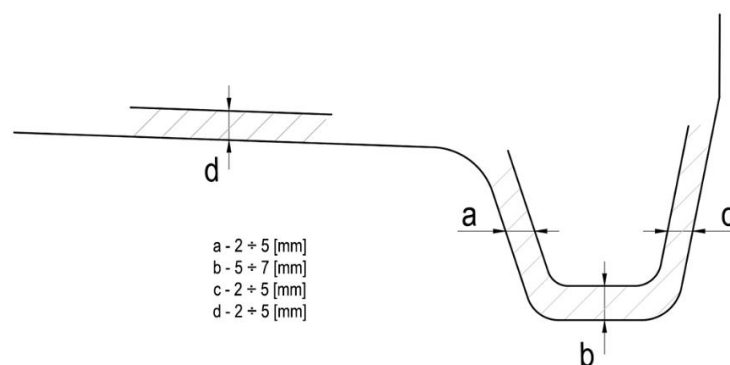
Ip.	Nazwa cechy geometrycznej		Minimalna wartość graniczna	Maksymalna wartość graniczna	Zalecana teoretyczna wartość graniczna
			[mm]	[mm]	[mm]
1.	Długość prowadna, d	tor o szer. 1435 [mm]	1426,1	1429,9	1428,0
		tor o szer. 1000 [mm]	991,6	994,4	993,0
2.	Grubość obrzeża, g		11,0	17,0	17,0
3.	Wysokość obrzeża, h		16,0	22,0	22,0
4.	Wymiar kontrolny A, b		15,5	21,7	21,5
5.	Rozstaw wewnętrznych płaszczyzn czołowych obręczy, p	tor o szer. 1435 [mm]	1383,5	1386,5	1385,0
		tor o szer. 1000 [mm]	951,0	949,0	950,0
6.	Średnica toczna koła, odniesienie jej do wartości minimalnej D		520 (nominalna wg DTR dla wagonu NGT8); 510 (nominalna wg DTR dla wagonu NGT6);	600 (nominalna wg DTR dla wagonu NGT8); 590 (nominalna wg DTR dla wagonu NGT6);	600 (nominalna wg DTR dla wagonu NGT8); 590 (nominalna wg DTR dla wagonu NGT6);
7.	Różnice średnic kół w zestawie kołowym lub osi rozprężonej, ΔD		dążyć do wartości < 1,0	2,0	0
8.	Maksymalna różnica średnic kół w wózku, ΔD_w		dążyć do wartości < 1,0	2,0	0
9.	Maksymalna różnica średnic kół w pojeździe, ΔD_p		0	5,0	0
10.	Różnica przekątnej punktów przyporu w zestawach kołowych w jednym wózku, Δz		0	3,0	0

W przeciwieństwie do kół kolejowych pojazdów szynowych, które podlegają ścisłym przepisom międzynarodowym (przepisy ORE i UIC), a także opracowanym, na ich podstawie normom kolejowym, koła wykorzystywane w wagonach tramwajowych nie są objęte praktycznie żadnymi przepisami międzynarodowymi, w tym normami, a także żadnymi krajowymi, obligatoryjnymi wytycznymi w zakresie eksploatacji. Obecnie producenci, w tym przede wszystkim konstruktorzy taboru tramwajowego, narzucają warunki techniczne w zakresie geometrii i dokładności wykonania kół, kierując się głównie doświadczeniem eksploatacyjnym, a także zaleceniami odnośnie bezpieczeństwa oraz emisji hałasu, które zawarto w publikacjach naukowych na temat

współpracy w układzie koło-szyna. Korzystając z tego, w pracy [11] autorzy przedstawili wymagania stawiane kołom zarówno nowym, jak i zregenerowanym. Są to:

- różnica średnic kół napędowych, wynosząca maksymalnie 0,2 [mm],
- różnica średnic kół tocznych, wynosząca maksymalnie 1,0 [mm],
- bicie promieniowe na okręgu tocznym, wynoszące maksymalnie 0,2 [mm],
- bicie osiowe po przetoczeniu boku obręczy, wynoszące maksymalnie 0,2 [mm],
- owalizacja na okręgu tocznym, wynosząca maksymalnie 0,2 [mm],
- dokładność profilu, wynosząca maksymalnie 0,2 [mm],
- chropowatość powierzchni, wynosząca maksymalnie Rz 40-60 [μm].

Na stacjach obsługi technicznej wagonów, celem przyśpieszenia obróbki, a co za tym idzie skrócenia czasu postoju pojazdu, podane dokładności są często zwiększane nawet do 50%. Na rysunku 4.2 przedstawiono najczęstsze dopuszczalne, przed kolejną obróbką odtworzeniową, zużycie eksploatacyjne kół tramwajowych.



Rys. 4.2. Schemat zarysu profilu najczęściej spotykanego, dopuszczalnego zużycia kół tramwajowych w eksploatacji – opracowanie własne na podstawie [11]

Obecnie, podobnie jak w przypadku profili kół kolejowych, niektórzy operatorzy komunikacji miejskiej stosują przy regeneracji kół tzw. profile oszczędnościowe, w których dopuszcza się w trakcie regeneracji zmianę grubości obrzeża co 1 [mm] do wartości granicznych, określonych na rysunku 4.2 jako a i b. Pozwala to wydłużyć w znaczący sposób trwałość kół w eksploatacji. Wyróżnia się następujące cechy, konieczne do monitoringu wraz z określeniem dokładności wykonywania pomiarów:

- średnica kół w płaszczyźnie kręgów tocznych – dokładność 1 [mm],
- wysokość obrzeża kół – dokładność do 0,1 [mm],
- grubość obrzeża – dokładność do 0,1 [mm],
- wymiar kontrolny A (szerokość obrzeża) – dokładność do 0,1 [mm],
- odległość punktów przyporu (długość prowadna) – dokładność do 0,3 [mm].

4.2. Określenie trwałości umownej dla eksploatowanych obręczy tramwajowych

Zgodnie z normą [98] niezawodność definiuje się jako: „*zdolność elementu do wykonania wymaganej funkcji w danych warunkach i w danym przedziale czasu*”.

Z kolei w monografii [99], podano definicję: „*niezawodność dla danej zbiorowości obiektów określa przewidywaną liczbę egzemplarzy, które będą pracować bez uszkodzeń przez zadany przedział czasu*”, natomiast w odniesieniu do pojedynczego obiektu technicznego niezawodność: „*to określone prawdopodobieństwo, iż obiekt będzie działał sprawnie przez określony czas*”.

W przypadku, gdy wymaganiem jest, aby obiekt był zdatny w określonym przedziale $(0, t)$, którego miarą może być np. czas lub długość przebytej drogi, wtedy zgodnie z [100] „*niezawodność obiektu jest to prawdopodobieństwo, że obiekt jest zdatny (sprawny) w przedziale $(0, t)$* ”, a dokładniej: „*niezawodność obiektu jest to prawdopodobieństwo, że wartości parametrów określających istotne właściwości obiektu nie przekroczą w ciągu okresu $(0, t)$ dopuszczalnych granic w określonych warunkach eksploatacji obiektu*”.

Natomiast autor w pracy [101] definiuje niezawodność obiektu jako „*właściwość, która określa jakość wykonywania przez dany obiekt stawianych mu zadań, przy uwzględnieniu losowych zmian charakterystyk funkcjonalnych danego obiektu. Ilościowo niezawodność obiektu oceniana jest za pomocą pewnych miar zwanych wskaźnikami niezawodności, których rodzaj i liczbę dobiera się adekwatnie do danego obiektu i zadania*”.

W rozumieniu probabilistycznym niezawodność obiektu technicznego $R(t)$ w danej chwili t , wyraża się jako prawdopodobieństwo $P(T \geq t)$, gdzie jego trwałość T jest większa od t . Wartość T (trwałość) można wyrazić w jednostkach odległości (np. w kilometrach) lub jednostkach czasu (np. w godzinach, minutach, sekundach). Dlatego też za każdym razem konieczne jest jednoznaczne wskazanie w odniesieniu do jakiego zdarzenia i jakiej wielkości odnosi się dana funkcja niezawodności $R(t)$. Trwałość określona teoretycznie lub doświadczalnie przy nominalnych warunkach pracy i użytkowania to resurs, czyli okres pracy, gwarantujący bezpieczeństwo oraz zdatność obiektu. Znajomość trwałości obiektu technicznego oraz jego części składowych, pozwala ustalić odpowiedni system obsługi, z optymalnymi okresami przeglądów i napraw, a także z zakresem gospodarowania częściami zamiennymi.

W teorii niezawodności, przyjmuje się że funkcja intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$, jest funkcją najlepiej odzwierciedlającą zmiany niezawodności dowolnego obiektu technicznego. Jej przebieg pozwala wysnuć wiele teoretycznych oraz praktycznych wniosków, a także wyznaczyć [100]:

- funkcję niezawodności $R(t)$ (wzór 4.1.),

$$R(t) = P(T \geq t) = \exp \left[- \int_0^t \lambda(x) dx \right] \quad (4.1.)$$

- funkcję zawodności (dystrybuantę) $Q(t)$ (wzór 4.2.),

$$Q(t) = F(t) = P(T < t) = 1 - R(t) = 1 - \exp \left[- \int_0^t \lambda(x) dx \right] \quad (4.2.)$$

- funkcję gęstości prawdopodobieństwa trwałości $f(t)$ (wzór 4.3.),

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = \lambda(t) \exp \left[- \int_0^t \lambda(x) dx \right] \quad (4.3.)$$

- funkcję wiodącą (skumulowaną intensywność uszkodzeń) (wzór 4.4.).

$$\Lambda(t) = \int_0^t \lambda(x) dx \quad (4.4.)$$

Znajomość przebiegu funkcji intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ umożliwia producentom, jak również użytkownikom podejmowanie decyzji odnośnie:

- ustalenia niezbędnych okresów wstępnego użytkowania produkowanych obiektów,
- ustalenia wielkości i asortymentu części zamiennych,
- zaplanowania optymalnej pracy serwisu technicznego oraz służb remontowych,
- ustalenia okresów wymiany profilaktycznych elementów oraz zespołów,
- ustalania okresów eksploatacji obiektów (teoria odnowy),
- innych działań techniczno-ekonomicznych (okres gwarancji).

Do przeprowadzenia probabilistycznych badań laboratoryjnych w zakresie trwałości obręczy kół jezdnych, wytypowano trzy typy wagonów tramwajowych, eksploatowanych w Krakowie, z uwagi na różnorodność konstrukcyjną układu biegowego:

- wagon tramwajowy typu NGT6,
- wagon tramwajowy typu NGT8,
- wagon tramwajowy typu 2014N.

Wagon tramwajowy typu NGT6 produkcji firmy Bombardier to jednoprzestrzenny pojazd trójczłonowy, przeznaczony do ruchu jednokierunkowego, o długości 26000 [mm], szerokości 2400 [mm], wysokości 3455 [mm] i masie całkowitej 46650 [kg]. Został on przystosowany do poruszania się po torze normalnym, o rozstawie szyn 1435 [mm]. Charakteryzuje się istnieniem części niskopodłogowej

znajdującej się na 65% jego długości [102]. Pudła członów mają odporną na korozję lekką, spawaną konstrukcję stalową.

Nadwozie pojazdu oparte zostało na trzech wózkach jezdnych. Skrajne człony wsparto na wózkach napędnych, w których zabudowano elementy układu hamulcowego, jak również zespoły napędowe, składające się z asynchronicznego silnika prądu trójfazowego, dwustopniowej przekładni napędowej, wału przegubowego z dwoma sprzęgłami podatnymi, wału drażonego przekładni oraz klasycznego zestawu kołowego. Każdy z wózków napędnych połączono z nadwoziem za pomocą czopa skrętu, osadzonego w gnieździe umiejscowionym na środku belki bujkowej, która opiera na ramie wózka za pośrednictwem sprężyn stalowych, wspomaganych tłumikami hydraulicznymi [103]. Rozwiązanie to pozwala na obracanie się wózka w płaszczyźnie poziomej, zgodnie z kierunkiem, w którym poruszają się zestawy kołowe.

Człon środkowy wsparto na wózku tocznym, który jest z nim połączony, bez możliwości obracania się, za pośrednictwem czopa z belką pośrednią (tzw. belką lemniskatową), z cięgłami trakcyjnymi, tłumikami poprzecznymi i odbijakami gumowymi. Rozwiązanie to umożliwia względne pokonywanie łuków torowych oraz absorpcję drgań, które mogą przenosić się na konstrukcję pudła. W tego typu konstrukcji zabudowano zestawy kołowe z niezależnie obracającymi się kołami, z tzw. osią portalową, która umożliwia zastosowanie niskiej podłogi w tym członie pojazdu [6].

W obu typach wózków tego wagonu użyto obręczy o jednakowej nominalnej średnicy tocznej koła wynoszącej 590 [mm]. Dodatkowo każde z kół wyposażono we wkładki tłumiące w postaci elementów podatnych, wykonanych z tworzywa sztucznego. Mają one za zadanie redukcję drgań, wynikających ze współpracy koła z szyną.

Wagon tramwajowy typu NGT8 produkcji firmy Bombardier to jednoprzestrzenny pojazd trójczłonowy, przeznaczony do ruchu jednokierunkowego, o długości 32830 [mm], szerokości 2400 [mm], wysokości 3600 [mm] i masie całkowitej 62400 [kg], który został przystosowany do poruszania się po torze normalnym, o rozstawie szyn 1435 [mm]. Niskopodłogowa część pojazdu obejmuje ok. 68% jego długości [102]. Nadwozie wagonu, wykonane w technologii spawania z odpornej na korozję stali, wspiera się na czterech wózkach jezdnych.

Skrajne człony oparte zostały na wózkach napędnych, w których zabudowano klasyczne zestawy kołowe, jak również elementy układu hamulcowego oraz zespoły napędowe z poprzecznie umieszczonymi silnikami trakcyjnymi. Tak samo, jak w przypadku wagonu NGT6, każdy wózek napędny połączono z nadwoziem za pomocą czopa skrętu, który osadzono w gnieździe umiejscowionym na środku belki bujkowej, opierającej się na ramie wózka za pomocą sprężyn stalowych, wspomaganych tłumikami hydraulicznymi. Rozwiązanie to pozwala na obracanie się wózka w płaszczyźnie poziomej, zgodnie z kierunkiem, w którym poruszają się zestawy kołowe.

Człon środkowy wsparty jest na dwóch wózkach tocznych, różniących się od tych zastosowanych w wagonach typu NGT6, gdzie zamiast belki pośredniej (tzw. belki lemniskatowej), zastosowano belkę bujawkową z czopem skrętu, która umożliwi obrót wózka jezdnego względem pudła wagonu. Dzięki poprzecznemu wyprofilowaniu belki bujawkowej, jak również zabudowaniu zestawów kołowych z osią portalową, możliwe było zastosowanie niskiej podłogi w środkowym członie pojazdu [6].

W obu typach wózków tego wagonu zastosowano obręcze o jednakowej nominalnej średnicy tocznej koła wynoszącej 600 [mm]. Każde z kół jezdnych wyposażono we wkładki tłumiące w postaci podatnych elementów, wykonanych z tworzywa sztucznego. Mają one za zadanie redukcję drgań wynikających ze współpracy koła z szyną.

Wagon tramwajowy typu 2014N produkcji firmy PESA Bydgoszcz to czteroczłonowy, jednoprzestrzenny, częściowo niskopodłogowy pojazd, przeznaczony do ruchu jednokierunkowego, o długości 42830 [mm], szerokości 2400 [mm], wysokości 3600 [mm] i masie własnej 64036 [kg], który został przystosowany do poruszania się po torze normalnym, o rozstawie szyn 1435 [mm] [102]. Szkielet pojazdu stanowi spawaną konstrukcją stalową, z kolei zewnętrzne poszycie wykonano z blach stalowych odpornych na korozję oraz tworzywa sztucznego.

Konstrukcja wagonu wsparta została na pięciu wózkach jezdnych, z czego trzy skrajne wózki (zlokalizowane w pierwszym i czwartym członie) są wózkami napędzonymi, natomiast drugi człon oparty jest na dwóch wózkach tocznych, z kolei człon trzeci jest podwieszony do członów sąsiednich.

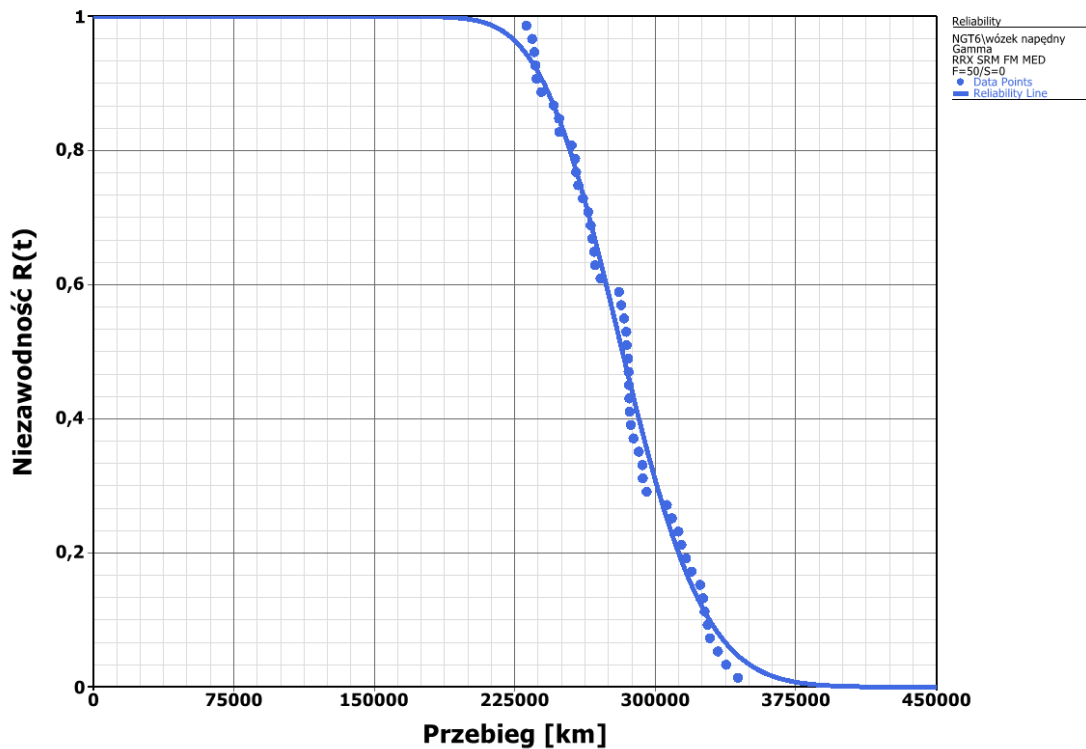
Wózki napędne mają klasyczne zestawy kołowe (koła jezdne osadzone na wale osiowym) i silniki trakcyjne, umiejscowione równolegle do osi zestawów kołowych (poprzecznie do osi wzdłużnej wagonu). Przenoszenie momentu obrotowego z silników trakcyjnych na zestawy kołowe realizowane jest za pomocą przekładni dwustopniowej i dwóch sprzęgieł podatnych, łączących wał dźwony przekładni z wałem przegubowym i osią zestawu kołowego. W wózkach tocznych zastosowano niezależnie obracające się koła jezdne z osią portalową, co pozwoliło na uzyskanie niskiej podłogi w części pojazdu. Zarówno wózki napędne, jak i toczne zostały połączone z nadwoziem za pomocą czopa skrętu i belki bujawkowej, co umożliwi obrót wózków względem pudła wagonu.

W obu rodzajach wózków tego wagonu zastosowano obręcze o jednakowej nominalnej średnicy tocznej koła, wynoszącej 600 [mm]. Każde z kół jezdnych wyposażono we wkładki tłumiące w postaci podatnych elementów, wykonanych z tworzywa sztucznego. Mają one za zadanie redukcję drgań wynikających ze współpracy koła z szyną.

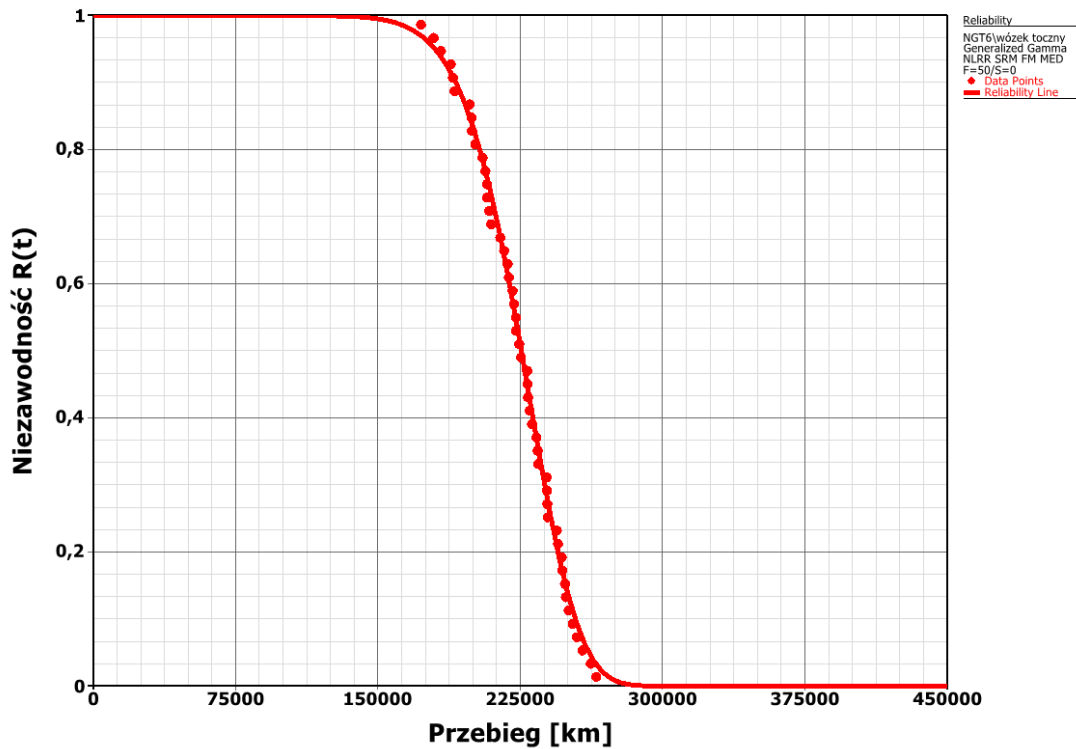
Do badań laboratoryjnych w zakresie trwałości obręczy kół tramwajowych, wykorzystano pozyskane dane eksploatacyjne, które następnie posłużyły jako dane wejściowe do analizy przy użyciu oprogramowania Weibull++. W pierwszej kolejności

dane te poddano wstępnej analizie, celem wytypowania optymalnej metody estymacji rozkładu prawdopodobieństwa. W pracach naukowych do badań na temat trwałości obręczy tramwajowych zwykle wybierano rozkład Weibull'a. Jednakże, aby uzyskać jak największą dokładność zaproponowano metodę największej wiarygodności doboru rozkładu.

Analiza przebiegu funkcji niezawodności dla obręczy kół jezdnych, zabudowanych zarówno w wózkach napędnych, jak i tocznych w badanej liczbie wagonów tramwajowych typu NGT6, NGT8 oraz 2014N, przy określonych warunkach eksploatacji, pozwoliła wyznaczyć trwałość umowną obręczy, odpowiadającą określonej wartości niezawodności $R(t)$. W trakcie badań laboratoryjnych przyjęto kryterium pewności $R(t) = 0,95$, dzięki czemu wyznaczono wartości przebiegu, przy którym nastąpi konieczność wymiany obręczy na nową. Na rysunkach 4.3 oraz 4.4 przedstawiono przebieg funkcji niezawodności w okresie do wymiany obręczy zabudowanych w wózkach jezdnych w wagonach typu NGT6.

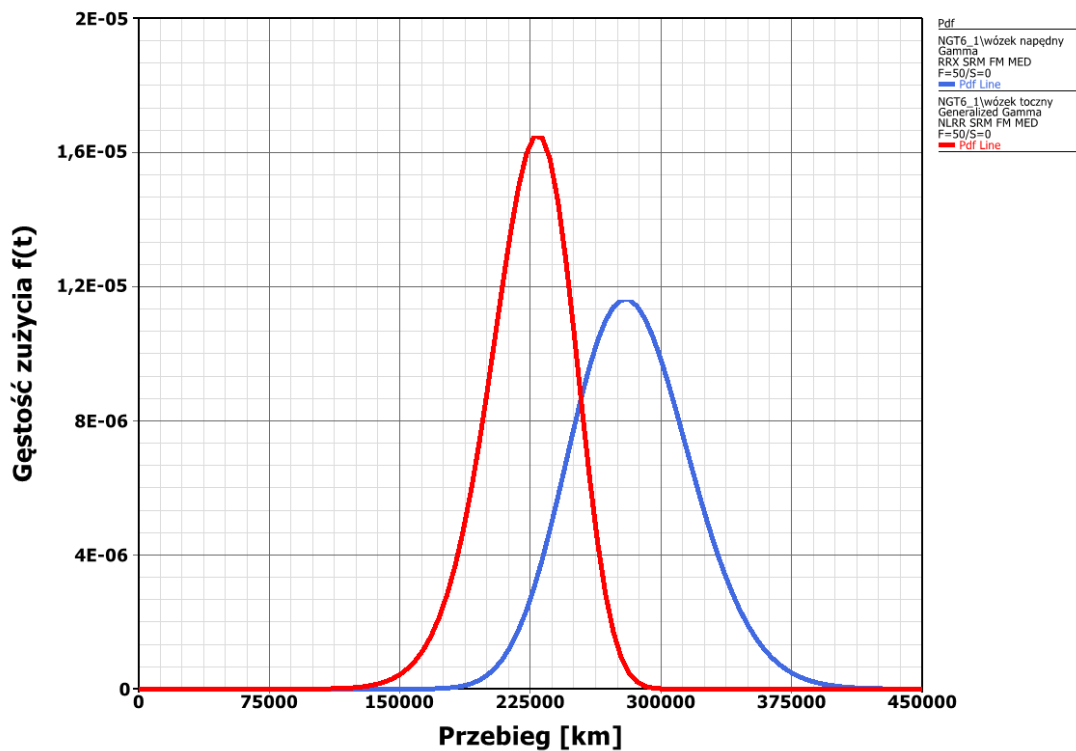


Rys. 4.3. Funkcja niezawodności do wymiany obręczy, zabudowanych w wózkach napędnych wagonów typu NGT6 – rozkład Gamma [opracowanie własne]



Rys. 4.4. Funkcja niezawodności do wymiany obręczy, zabudowanych w wózkach tocznych wagonów typu NGT6 – rozkład Generalized Gamma [opracowanie własne]

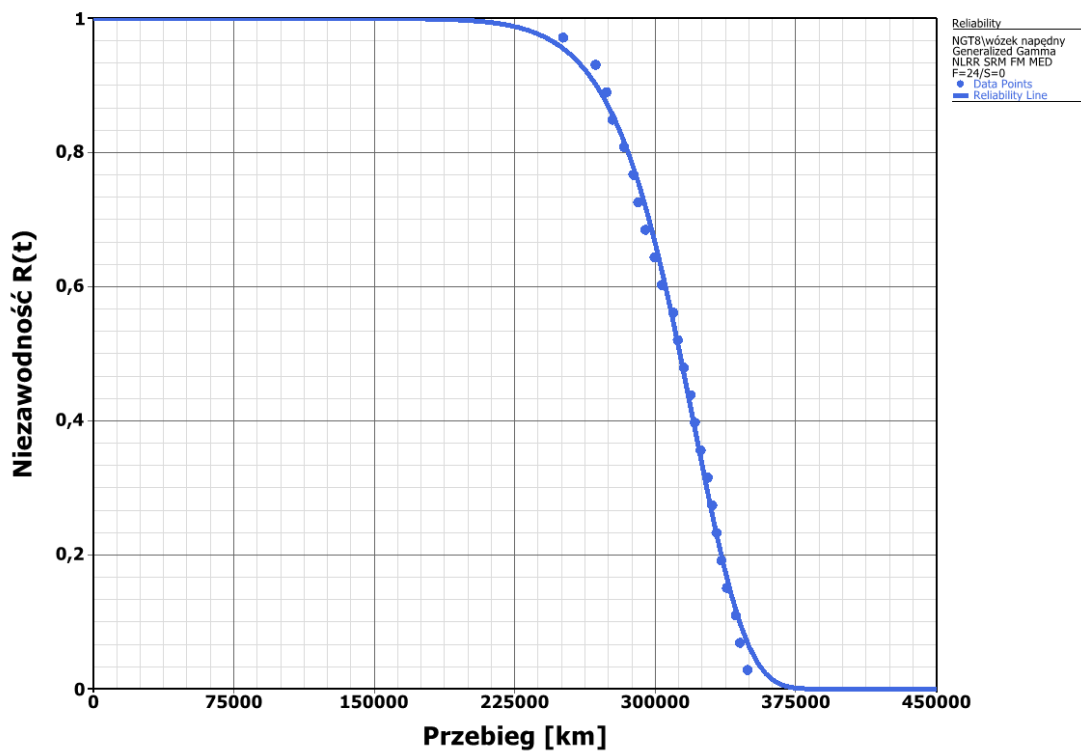
Na rysunku 4.5 zestawiono funkcję gęstości zużycia w okresie do wymiany obręczy, wyznaczoną zarówno dla wózków napędnych jak i tocznych wagonów typu NGT6.



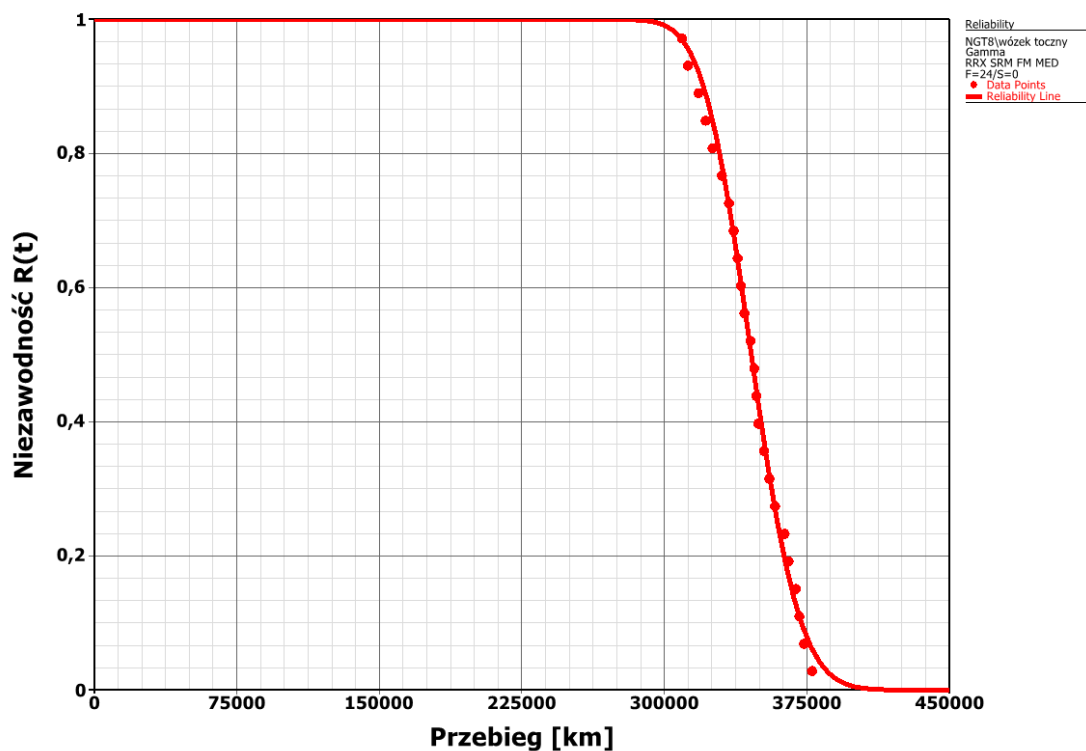
Rys. 4.5. Funkcja gęstości zużycia do wymiany obręczy, zabudowanych w wózkach tocznych oraz napędnych wagonów typu NGT6 [opracowanie własne]

Z przeprowadzonych badań probabilistycznych dotyczących wagonów typu NGT6 wynika, że umowna trwałość obręczy zabudowanych w wagonach tocznych jest o około 20% mniejsza, niż w wózkach napędnych. Fakt ten jest spowodowany zabudowaniem nieobrotowego wózka tocznego pod środkowym członem, który powoduje odmienne zachowanie pojazdu w torze, a w szczególności w trakcie pokonywania łuków o małym promieniu. Skutkuje to częstszym ustawianiem się wózka tocznego w położeniu narożnikowym, co przy długotrwałym nabieganiu koła na szynę, zwiększa intensywność zużycia obrzeża. Zjawisko to można zaobserwować zwłaszcza na pierwszej osi tego wózka jezdnego.

Na rysunkach 4.6 oraz 4.7 zaprezentowano przebieg funkcji niezawodności w okresie do wymiany obręczy w wózkach napędnych oraz tocznych badanej liczby wagonów typu NGT8.

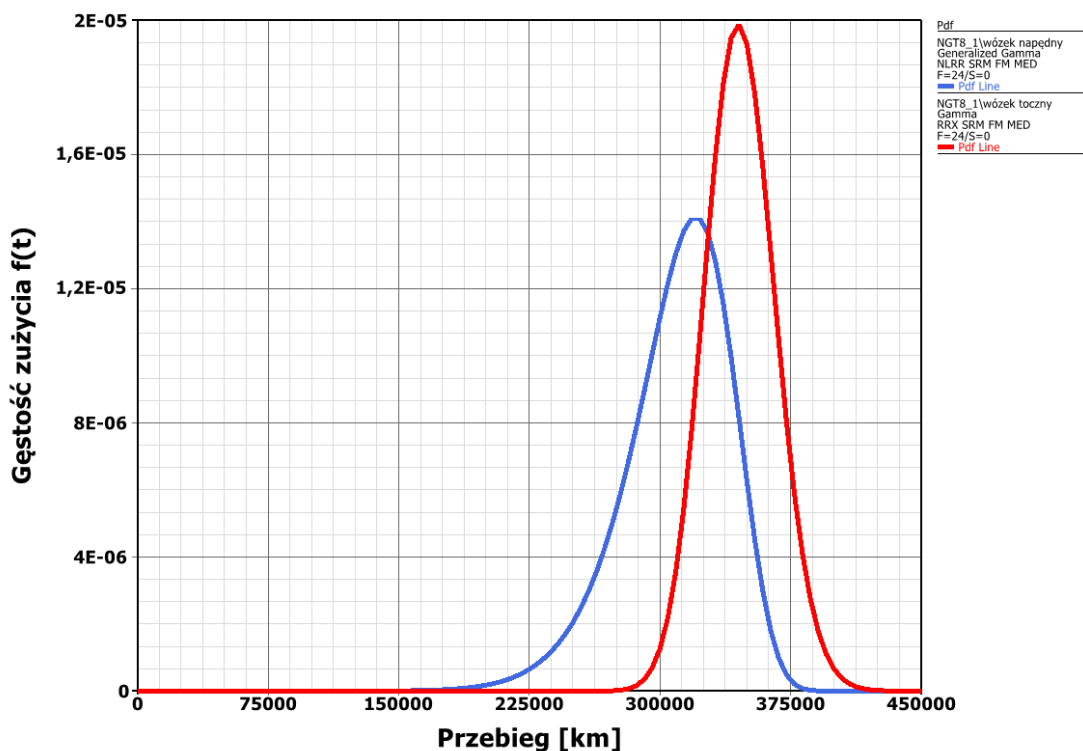


Rys. 4.6. Funkcja niezawodności do wymiany obręczy, zabudowanych w wózkach napędnych wagonów typu NGT8 – rozkład Generalized Gamma [opracowanie własne]



Rys. 4.7. Funkcja niezawodności do wymiany obręczy, zabudowanych w wózkach tocznych wagonów typu NGT8 – rozkład Gamma [opracowanie własne]

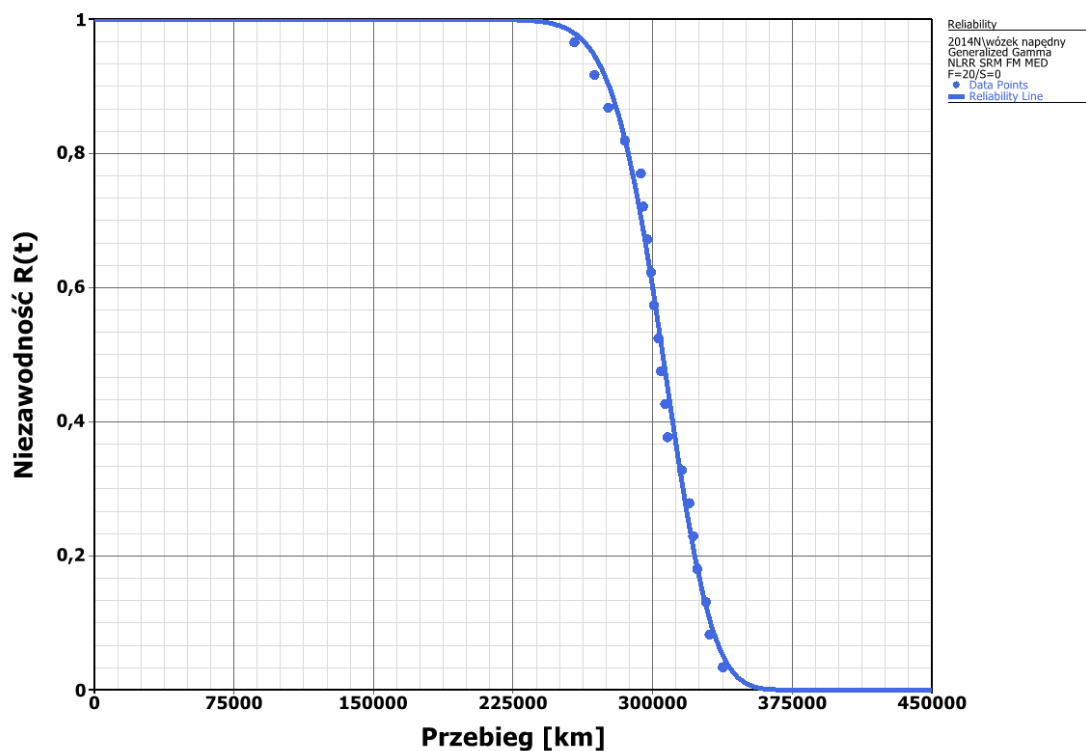
Na rysunku 4.8 przedstawiono przebiegi funkcji gęstości zużycia w okresie do wymiany obręczy zarówno dla wózków napędnych jak i tocznych wagonów typu NGT8.



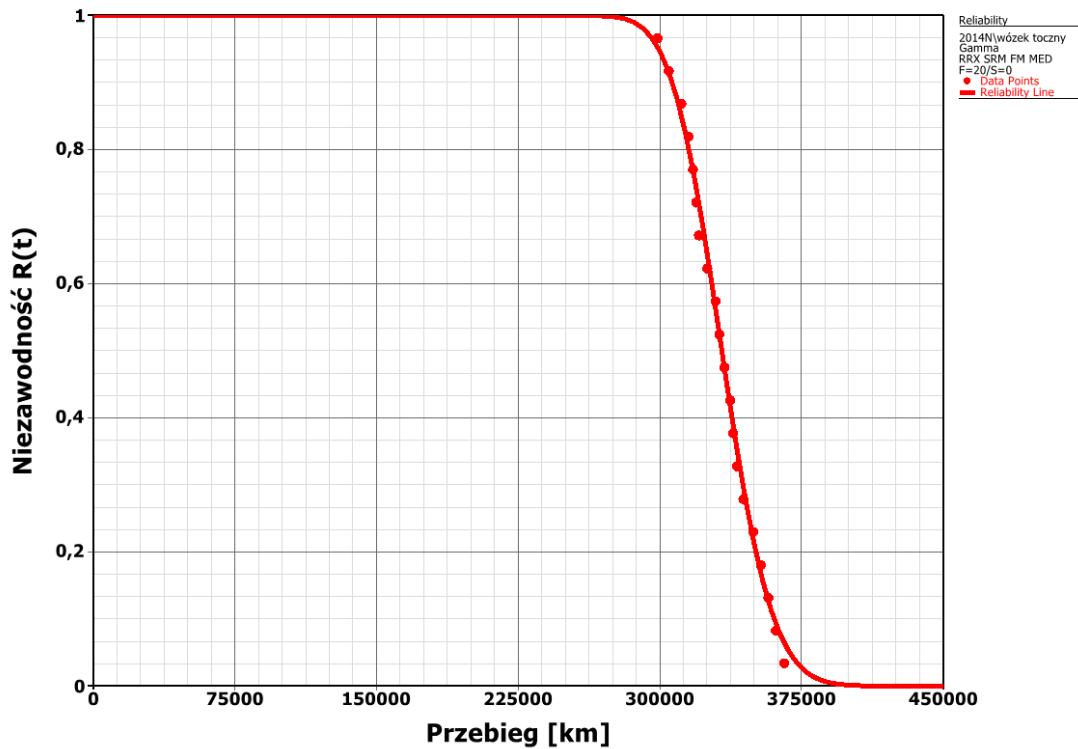
Rys. 4.8. Funkcja gęstości zużycia do wymiany obręczy, zabudowanych w wózkach tocznych oraz napędnych wagonów typu NGT8 [opracowanie własne]

Analiza przeprowadzonych badań dotycząca wagonów typu NGT8 pozwala zidentyfikować odmienną tendencję zużycia obręczy kół jezdnych, niż w przypadku wagonów typu NGT6, gdyż umowna trwałość obręczy, zabudowanych w wózkach tocznych jest o około 10% większa, niż w wózkach napędnych. Wynika to ze zmiany konstrukcyjnej, jaką wprowadzono w pojazdach NGT8, a mianowicie zastosowano obrotowe wózki toczne z belką bujawkową pod środkowym członem. Rozwiązanie to znacznie zmniejszyło siły poprzeczne, działające w układzie koło-szyna, zwłaszcza w trakcie pokonywania łuków o małym promieniu. Dodatkowo po zastosowaniu systemu smarowania obrzeży kół, zauważalne jest zwiększenie trwałości umownej, na skutek zmniejszenia sił podczas nabiegania atakującego zestawu kołowego na szynę.

Na rysunkach 4.9 oraz 4.10 zaprezentowano przebieg funkcji niezawodności w okresie do wymiany obręczy w wózkach napędnych oraz tocznych analizowanej liczby wagonów typu 2014N.

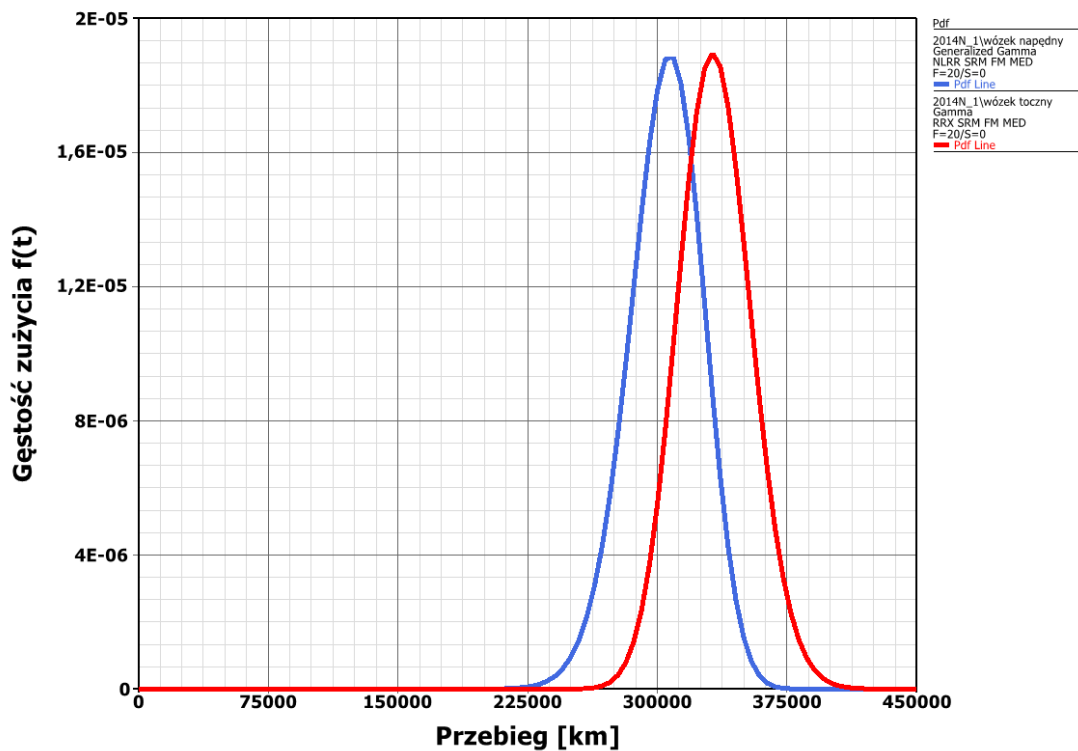


Rys. 4.9. Funkcja niezawodności do wymiany obręczy, zabudowanych w wózkach napędnych wagonów typu 2014N – rozkład Generalized Gamma [opracowanie własne]



Rys. 4.10. Funkcja niezawodności do wymiany obręczy, zabudowanych w wózkach tocznych wagonów typu 2014N – rozkład Gamma [opracowanie własne]

Na rysunku 4.11 zestawiono przebiegi funkcji gęstości zużycia w okresie do wymiany obręczy zarówno wózków napędnych jak i tocznych wagonów typu 2014N.



Rys. 4.11. Funkcja gęstości zużycia do wymiany obręczy, zabudowanych w wózkach tocznych oraz napędnych wagonów typu 2014N [opracowanie własne]

Z przeprowadzonych badań probabilistycznych wagonów typu 2014N wynika, że z uwagi na zabudowanie w pojazdach obrotowych wózków jezdnych, trwałość umowna obręczy jest podobna, jak w przypadku wagonów typu NGT8. Różnica wielkości zużycia obręczy kół, pomiędzy zabudowanymi w wózku tocznym i napędnym, wynosi około 10%. Analiza dotycząca tego typu wagonu pozwoliła zidentyfikować zwiększone zużycie obręczy w wózku trzecim (tocznym) oraz czwartym (napędnym). Zjawisko to potencjalnie może być spowodowane zastosowaniem członu wiszącego pomiędzy tymi wózkami jezdnych, co znacząco wpływa na zwiększenie nacisku pionowego, generowanego w takim układzie biegowym, zwłaszcza przy pokonywaniu łuków torowym o małym promieniu.

Zbiorcze wyniki badań laboratoryjnych odnośnie zużycia obręczy kół tramwajowych o przedstawionych rozwiązaniach konstrukcyjnych układów biegowych, zabudowanych w wagonach tramwajowych typu NGT6, NGT8 oraz 2014N, zestawiono w tabeli 4.4.

Tabela 4.4. Wyznaczony modelowaniem probabilistycznym, prawdopodobny przebieg, przy którym nastąpi wymiana obręczy na nową przy $R(t) = 0,95$, w analizowanych wagonach tramwajowych NGT6, NGT8 oraz 2014N [opracowanie własne]

Typ wagonu	Lokalizacja zabudowy obręczy	Rodzaj operacji obsługowej	Przebieg w tys. km dla $R(t) = 0,95$, przy którym wystąpi operacja obsługi	Typ rozkładu wg programu Weibull++
NGT6	Wózek napędny	Wymiana	283	Gamma
	Wózek toczny	Wymiana	224	Generalized Gamma
NGT8	Wózek napędny	Wymiana	313	Generalized Gamma
	Wózek toczny	Wymiana	346	Gamma
2014N	Wózek napędny	Wymiana	304	Generalized Gamma
	Wózek toczny	Wymiana	333	Gamma

Podsumowując, na podstawie przeprowadzonych badań laboratoryjnych, można zaobserwować nierównomierne zużycie obręczy kół w analizowanych pojazdach. Wielkość tych zużyć różni się w zależności od lokalizacji miejsca zabudowy konkretnej obręczy koła tramwajowego. W głównej mierze, wpływ na to ma rodzaj rozwiązania konstrukcyjnego układu biegowego, czyli zastosowanie w pojeździe wózków obrotowych, bądź też nieobrotowych, albo klasycznych zestawów kołowych, czy też układu z niezależnie obracającymi się kołami z osią portalową. Porównując wyniki uzyskane dla trzech typów wagonów, zauważyć można, że zastosowanie obrotowego wózka tocznego w wagonach typu NGT8, z rozprzęgniętymi zestawami kołowymi na osiach portalowych, pozwoliło wydłużyć trwałość umowną obręczy o około 55% w stosunku do nieobrotowego wózka tocznego z osiami portalowymi, który

zabudowano w wagonach typu NGT6. Znaczący wpływ na trwałość umowną obręczy ma również zastosowanie układów smarowania obrzeży kół, co zważyć można, analizując wyniki badań napędnych wózków wagonów typu NGT8 i 2014N.

W celu przeciwdziałania negatywnemu zjawisku, jakim jest nierównomierne zużycie obręczy kół tramwajowych, operatorzy komunikacji miejskich coraz częściej wykonują oprócz reprofilacji (odnowy), szereg dodatkowych czynności obsługowych, które mają wpływać korzystnie na efektywność techniczno-ekonomiczną eksploatacji pojazdu. Jednym z przykładów takich czynności jest tzw. obracanie wózków jezdnych w trakcie obsługi, co pozwala na wyrównanie zużycia, występującego na pierwszej i drugiej osi zestawu kołowego. Operatorzy wykonują również czasochłonne prace, polegające na wymianie nadmiernie zużytych obręczy na inne, częściowo zużyte, aczkolwiek takie, których wymiary geometryczne znajdują się polu tolerancji danego zestawu kołowego, a jednocześnie są zachowane różnice średnic obręczy w wózkach, jak również całym pojeździe.

5. Badania laboratoryjne wybranych modyfikatorów tarcia występujących w układzie koło – szyna

Jednym z rozwiązań pozwalającym wydłużyć trwałość obręczy kół stosowanych w wagonach tramwajowych jest wprowadzenie odpowiednich systemów smarowania. Jednakże, w przypadku tej metody istotny wpływ na właściwości trakcyjne, ma dobór odpowiedniego środka smarującego, który wraz z pozostałymi modyfikatorami tarcia (takimi jak np. piasek, woda, błoto, liście), korzystnie wpłynie na jakość współpracujących elementów, tym samym nie powodując intensyfikacji ich zużycia. Temat ten jest przedmiotem wielu analiz przeprowadzanych przez wiodące ośrodki naukowe, co wykazano w pracach [30], [31], [49], [92], [104], [105].

Ze względu na fakt istnienia rozbieżnych wymagań odnośnie wartości współczynnika tarcia w różnych obszarach punktów styku koło-szyna, na obecną chwilę nie wprowadzono do systemów smarujących stosowanych w szynowych pojazdach komunikacji miejskiej, uniwersalnej substancji smarującej. Wskazaniem jest, aby na kręgu tocznym osiągać wysokie współczynniki tarcia, dzięki którym zachowana zostanie przyczepność w trakcie rozpędzania oraz hamowania pojazdu. Z drugiej strony na boku obrzeża współczynnik tarcia powinien być niższy. Zadaniem klasycznych środków smarnych jest ograniczenie zużycia smarowanych powierzchni poprzez ich rozdzielenie, a co za tym idzie ograniczenie ich wzajemnego styku, zazwyczaj utrzymując układ w obszarze tzw. tarcia granicznego [106].

Tak jak przedstawiono w rozdziale 2.6, wyróżnia się kilka rodzajów systemów, wykorzystywanych do aplikacji warstwy smarującej w układzie koło-szyna [33]: systemy mobilne, systemy przytorowe oraz systemy pokładowe.

W systemach tych stosuje się specjalnie wyselekcjonowane środki smarne, które zgodnie z [106] można podzielić na:

- środki smarne płynne np. oleje syntetyczne, emulsje i inne ciecze,
- smary plastyczne, na bazie olejów syntetycznych i mineralnych z zagęszczaczami,
- smary stałe, np. grafit, dwusiarczek molibdenu.

Od wielu lat prowadzone są badania nad zaawansowanymi środkami smarującymi, m.in. zawierającymi cząsteczki metali miękkich, w formie stałych środków smarnych, które będą bardziej skuteczne i odporne na warunki eksploatacyjne, co było przedmiotem prac [107], [108], [109], [110].

5.1. Obiekty badań

Do badań laboratoryjnych wytypowano kilka podstawowych modyfikatorów tarcia, które mogą występować w warunkach eksploatacyjnych w układzie koło-szyna, czyli:

- piasek kwarcowy, pochodzący z piasecznic wagonów tramwajowych,
- liście, które zwłaszcza w porze jesiennej zalegają na szynach, tworząc tzw. madę,
- zalecane przez producentów taboru tramwajowego, substancje smarujące wykorzystywane do smarowania obrzeży kół wagonów tramwajowych.

Ponadto celem odzwierciedlenia rzeczywistych warunków eksploatacyjnych, pozyskano próbkę materiału badawczego z torowiska tramwajowego, stanowiącą mieszaninę zanieczyszczeń środowiskowych, w tym środków smarnych stosowanych w pojazdach oraz wykorzystywanych w smarownicach torowych. Dodatkowo po szczegółowej analizie literatury, jak również wstępnych badaniach laboratoryjnych, zaproponowano autorską substancję smarującą, która mogłaby być wykorzystywana do smarowania obrzeży kół tramwajowych, celem ograniczenia ich zużycia.

Z wybranych modyfikatorów tarcia, przygotowano modelowe kompozycje badawcze, które ponumerowano kolejno od 1 do 15, celem ich prawidłowej identyfikacji. Aby zapewnić odpowiednią dokładność badań laboratoryjnych, wykorzystano skalibrowaną wagę laboratoryjną, która posłużyła do precyzyjnego (trzykrotnie powtarzanego) odmierzenia składników (rys. 5.1). Każdy zestaw badawczy został przygotowany w liczbie, odpowiadającej liczbie wykonywanych testów tribologicznych (co najmniej trzy próbki).



Rys. 5.1. Zastosowanie wagi laboratoryjnej przy sporządzaniu zestawu badawczego nr 9 [źródło własne]

W tabeli 5.1 zestawiono przygotowane modelowe kompozycje badawcze do badań laboratoryjnych na testerze tribologicznym T-02U, przygotowane z wytypowanych modyfikatorów tarcia występujących w układzie koło-szyna.

Tabela 5.1. Zestawy badawcze wykorzystane do badań na testerze tribologicznym [opracowanie własne]

Zestaw badawczy	Nazwa próbki	Zawartość próbki
1.	Piasek	piasek kwarcowy, wykorzystywany w piasecznicach eksploatowanych wagonów tramwajowych
2.	Liście	mokre liście, zalegające na szynach w warunkach eksploatacji
3.	S1	płynny środek smarujący na bazie oleju lnianego, wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych
4.	S2	płynny środek smarujący na bazie dwusiarczku molibdenu, wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych
5.	S3	stały środek smarujący w postaci sztyftu, wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych
6.	S4	autorski płynny środek smarujący składający się ze składników neutralnych dla środowiska
7.	Piasek+liście	piasek kwarcowy oraz mokre liście (w stosunku wagowym 1:2)
8.	Piasek+S1	piasek kwarcowy oraz płynny środek smarujący na bazie oleju lnianego (w stosunku wagowym 1:6)
9.	Piasek+S2	piasek kwarcowy oraz płynny środek smarujący na bazie dwusiarczku molibdenu (w stosunku wagowym 1:6)
10.	Piasek+S3	piasek kwarcowy oraz stały środek smarujący w postaci sztyftu (w stosunku wagowym 1:6)
11.	Piasek+S4	piasek kwarcowy oraz autorski płynny środek smarujący (w stosunku wagowym 1:6)
12.	Piasek+Real+S1	piasek kwarcowy, próbka materiału badawczego pozyskana z torowiska tramwajowego oraz płynny środek smarujący na bazie oleju lnianego (w stosunku wagowym 1:3:6)
13.	Piasek+Real+S2	piasek kwarcowy, próbka materiału badawczego pozyskana z torowiska tramwajowego oraz płynny środek smarujący na bazie dwusiarczku molibdenu (w stosunku wagowym 1:3:6)
14.	Piasek+Real+S3	piasek kwarcowy, próbka materiału badawczego pozyskana z torowiska tramwajowego oraz stały środek smarujący w postaci sztyftu (w stosunku wagowym 1:3:6)
15.	Piasek+Real+S4	piasek kwarcowy, próbka materiału badawczego pozyskana z torowiska tramwajowego oraz autorski płynny środek smarujący (w stosunku wagowym 1:3:6)

Zestawy badawcze, ich kompozycje, jak również stosunki wagowe, zostały przygotowane na podstawie informacji uzyskanych od operatorów komunikacji tramwajowej, a także w oparciu o wiedzę i doświadczenie eksploatacyjne autora pracy.

Z uwagi na tajemnicę handlową, producenci środków smarujących, wykorzystanych do badań w niniejszej pracy, nie wyrazili zgody na upublicznienie w pracy nazw handlowych oraz składów chemicznych tych substancji. Ponadto opracowany przez autora środek smarujący, będzie podlegał postępowaniu patentowemu, stąd jego skład również nie może zostać przedstawiony w niniejszej pracy.

5.2. Statystyczna ocena wyników badań

W związku z możliwym występowaniem błędów grubych, błędów przypadkowych oraz błędów losowych, uzyskane wyniki badań przeprowadzonych w pracy zostały poddane analizie statystycznej, pozwalającej na wyznaczenie charakterystycznych wielkości takich jak średnia arytmetyczna (miara położenia) oraz odchylenie standardowe (rozproszenie).

W pierwszej kolejności celem zidentyfikowania wyników obarczonych błędem grubym, otrzymane wyniki poddano testowi Q-Dixona. Test ten stosuje się dla zbioru o liczebności od 3 do 10. Za jego pomocą można odrzucić wyłącznie jeden wynik z danego zbioru danych. Przed przeprowadzeniem testu otrzymane wartości liczbowe uszeregowano w ciąg rosnący ($x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_{n-1} \leq x_n$), gdyż błąd gruby można zidentyfikować jako najmniejszą (x_1) lub największą (x_n) wartość mierzoną. Dla tych wartości brzegowych wyznaczono odpowiednio parametr Q_{\min} oraz Q_{\max} , korzystając ze wzorów podanych w [111]:

$$Q_{\min} = \frac{x_2 - x_1}{R} \quad (5.1.)$$

$$Q_{\max} = \frac{x_n - x_{n-1}}{R} \quad (5.2.)$$

gdzie:

x_1 – wynik pierwszy,

x_2 – wynik drugi,

x_n – ostatni wynik serii,

$R = (x_n - x_1)$ – rozstęp wyników w serii, czyli różnica pomiędzy wartością największą i najmniejszą w rozpatrywanej serii danych.

Uzyskane wartości parametru Q_{\min} oraz Q_{\max} porównywano z krytyczną wartością Q_{kr} , dla przyjętego przez autora pracy, poziomu istotności – 0,90. Co oznacza, że ryzyko popełnienia błędu, który polega na odrzuceniu testowanej hipotezy zerowej oraz maksymalny błąd szacunku wynosi 10%. W przypadku, gdy parametr Q_{\min} lub Q_{\max} przekracza wartość krytyczną Q_{kr} , dla danej liczby pomiarów oraz przyjętego poziomu istotności, to wynik ten jest odrzucany [112]. Wartości krytyczne Q_{kr} dla testu Q-Dixona przedstawiono w tabeli 5.2.

Tabela 5.2. Wartości krytyczne parametru Q_{kr} testu Q-Dixona dla przyjętych poziomów istotności [111]

		Liczba pomiarów (n)							
		3	4	5	6	7	8	9	10
Poziom istotności	0,99	0,988	0,889	0,780	0,698	0,637	0,590	0,555	0,527
	0,95	0,941	0,765	0,642	0,560	0,507	0,468	0,437	0,412
	0,90	0,886	0,679	0,557	0,482	0,434	0,399	0,370	0,349

Kolejno, celem wyeliminowania błędów przypadkowych, dla analizowanej serii wyników wyznaczono średnią arytmetyczną za pomocą wzoru 5.3 [111]:

$$x_{\text{sr}} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5.3.)$$

gdzie:

x_i – wyniki poszczególnych pomiarów,

n – liczba pomiarów.

Następnie celem oszacowania błędów losowych metody badawczej, czyli określenia precyzji (rozproszenia wyników wokół średniej wartości) dla przeprowadzonych serii testów wyznaczono odchylenie standardowe korzystając ze wzoru [111]:

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - x_{\text{sr}})^2}{n - 1}} \quad (5.4.)$$

gdzie:

x_i – wyniki poszczególnych pomiarów,

x_{sr} – średnia arytmetyczna,

n – liczba wyników.

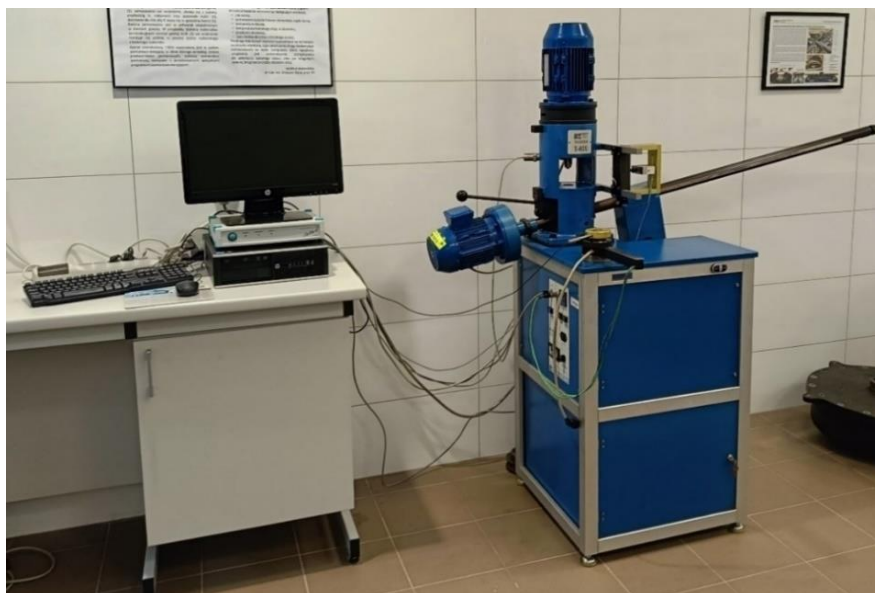
Wyniki badań uzyskane w trakcie testów tribologicznych, jak również wyniki dotyczące chropowatości powierzchni śladów wytarcia powstałych na kulkach pomiarowych, zostały poddane ocenie statystycznej, co zostało przedstawione w kolejnych rozdziałach.

5.3. Badania modelowych kompozycji badawczych na testerze tribologicznym T-02U

Współpraca koła jezdnego z główką szyny z uwagi na złożoność zjawisk, zachodzących w tym otwartym węźle tarcia wymaga interdyscyplinarnego podejścia. Z jednej strony wynika to z przepisów o charakterze normatywnym, natomiast z drugiej z rozwoju technologii w dziedzinach inżynierii materiałowej, tribologii czy konstrukcji wagonów tramwajowych. Dlatego też przeprowadzono pośrednie badania wpływu środków, stosowanych do modyfikacji warunków tarcia pod zmieniającym się obciążeniem, z wykorzystaniem testera tribologicznego T-02U (aparatu czterokulowy), który znajduje się na wyposażeniu laboratorium w Katedrze Pojazdów Szynowych i Transportu Politechniki Krakowskiej.

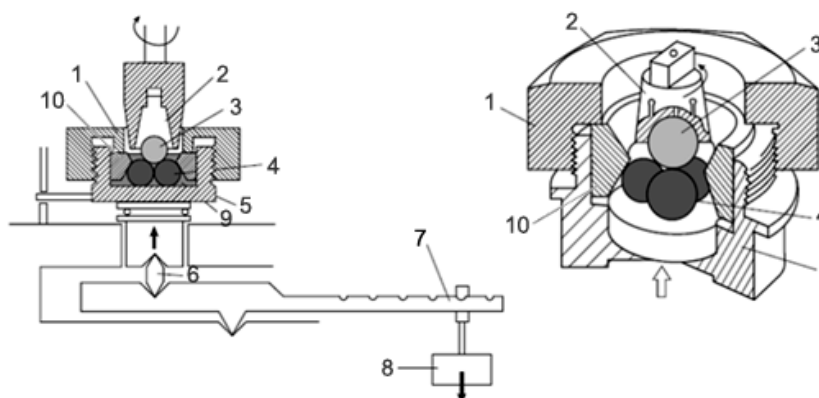
Tester tribologiczny T-02U (rys. 5.2) umożliwia wyznaczenie właściwości przeciwzużyciowych, przeciwzatarciowych i przeciwтарыowych środków smarujących oraz materiałów konstrukcyjnych, a także powierzchniowej trwałości zmęczeniowej (odporność na pitting), z możliwością pomiarów w podwyższonej temperaturze. Urządzenie to zaprojektowano, a następnie wykonano w Instytucie Technologii Eksploatacji – Państwowym Instytucie Badawczym (ITeE-PIB), znajdującym się w Radomiu. Umożliwia prowadzenie badań w oparciu o ustandaryzowane metody

określone w normach takich jak: PN-76/C-04147, ASTM D 2783, D 2596, D 4172 – procedura B, D 2266, DIN 51350, IP 239, a także w normie IP 300 – stosowanej do wyznaczania powierzchniowej trwałości zmęczeniowej [113], [114]. Tester tribologiczny wyposażony jest w układ pomiarowo-sterujący, w skład którego wchodzi zestaw przetworników pomiarowych, cyfrowy wzmacniacz pomiarowy, a także komputer ze specjalistycznym oprogramowaniem, umożliwiającym przeprowadzenie badań.



Rys. 5.2. Stanowisko laboratoryjne (tester tribologiczny T-02U), na którym przeprowadzono badania modyfikatorów tarcia [źródło własne]

Urządzenie umożliwia prowadzenie badań w styku punktowym, gdzie realizowany jest ruch ślizgowy. Węzeł tarcia tworzą cztery kulki (ułożone w formie czworoboku foremego) o średnicy 12,7 [mm], twardości 60 ± 2 HRC oraz chropowatości powierzchni $R_a 0,032$, które wykonano ze stali łożyskowej 100Cr6 [115] (pozostałe parametry kulek są zgodne z normą [116]). Na rysunku 5.3 zaprezentowano schemat skojarzenia trącego testera tribologicznego T-02U.

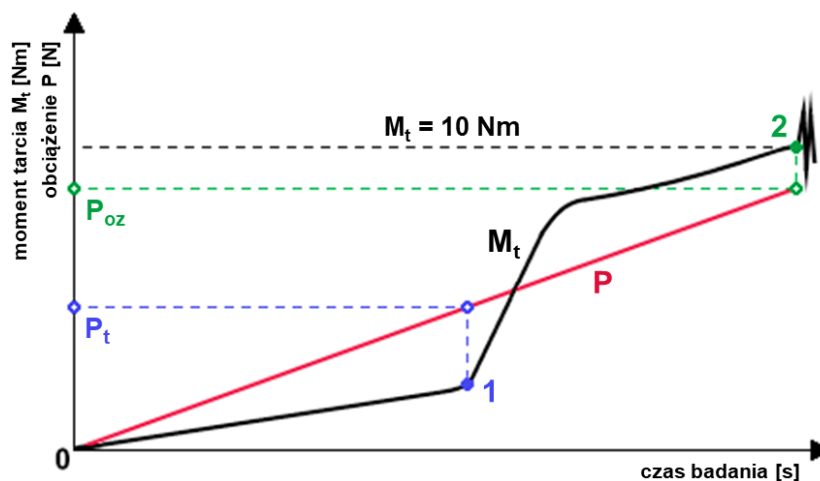


Rys. 5.3. Schemat skojarzenia trącego testera tribologicznego T-02U [117]
 1 - pokrywa mocująca kulki dolnej, 2 - uchwyt kulki górnej, 3 - kulka górna (obracana), 4 - kulki dolne (nieruchome), 5 - naczynie z badanym środkiem smarującym, 6 - pryzmat, 7 – dźwignia, 8 - obciążenie, 9 - badany środek smarujący, 10 - pierścień ustalający

Trzy kulki nieruchomo zamocowane są w uchwycie dolnym, w kształcie naczynia, w którym umieszcza się badany środek smarujący. Czwarta kulka zamocowana jest poprzez wrzeczono w uchwycie górnym (kulowym), dzięki czemu może się obracać z zadaną prędkością. Z kolei kulki dolne są dociskane do górnej kulki, pod obciążeniem siły P , która może być stała lub wzrastać w sposób ciągły [118]. W trakcie badań możliwa jest rejestracja cech takich jak: temperatura środka smarnego, moment tarcia, obciążenie, czas biegu badawczego, prędkość obrotowa, częstotliwość drgań węzła tarcia. Przebieg całego badania na bieżąco wyświetlany jest na ekranie komputera, a następnie po zakończeniu serii, wyniki archiwizowane są na dysku. Silnik napędowy urządzenia automatycznie zatrzymuje się po upływie określonego czasu biegu badawczego, w sytuacji gdy osiągnięta zostanie zadana wartość momentu tarcia lub określona częstotliwość drgań, na skutek wystąpienia zużycia zmęczeniowego typu pitting [119].

5.3.1. Metodyka badawcza

Dzięki opracowanej w ITeE-PIB autorskiej metodzie badań środków smarnych, możliwe jest prowadzenie analizy zacierania się węzła tarcia w warunkach ciągłego liniowego wzrostu obciążenia. Sposób wyznaczania wartości wskaźnika P_t (obciążenie zacierające) został określony w normie [118]. Wyznacza się go przy wzrastającym w sposób ciągły obciążeniu, aż do momentu uzyskania nagłego wzrostu oporów ruchu, identyfikowanego jako przerwanie warstwy smarującej (trwałości filmu smarowego) i rozpoczęcie procesu zacierania układu (punkt nr 1 na rys. 5.4). Za wartość obciążenia zacierającego P_t należy przyjąć średnią arytmetyczną z co najmniej trzech wyników, które nie różnią się od jej średniej arytmetycznej więcej niż o 10%. Zgodnie z założeniami autorskiej metody badawczej, przy dalszym wzroście obciążenia (powyżej wartości wskaźnika P_t), można wyznaczyć miejsce wystąpienia zatarcia układu, czyli moment tarcia przekraczający 10 [Nm] (punkt nr 2 na rys. 5.4). W związku z tym możliwe jest wyznaczenie obciążenia zatarcia określanego jako P_{oz} . Z kolei jeżeli węzeł tarcia nie osiągnie wartości momentu tarcia przekraczającej 10 [Nm], za obciążenie zatarcia (pomimo jego braku) przyjmuje się obciążenie maksymalne [120].



Rys. 5.4. Przykładowa krzywa momentu tarcia M_t uzyskana w warunkach ciągłego wzrostu obciążenia P , 1 - inicjacja zacierania, 2 – zatarcie [121]

Zastosowanie tej metody umożliwia określenie trwałości, jak również momentu rozpoczęcia zacierania oraz zniszczenia warstwy smarnej, za pomocą następujących cech [121]:

- obciążenia zacierającego P_t , – jest to najniższe obciążenie, przy jakim w ustalonych normą warunkach, wystąpi wyraźny wzrost oporów w węźle tarcia, identyfikowany w miejscu przerwania warstwy smarującej;
- granicznego nacisku zatarcia p_{oz} – jest to nacisk w skojarzeniu trącym przy zadanym obciążeniu, wyznaczany na podstawie średniej średnicy śladu wytarcia na dolnych kulkach pomiarowych, powstałego w trakcie biegu badawczego, co oblicza się za pomocą wzoru 5.5:

$$p_{oz} = 0,52 \cdot \frac{P_{oz}}{d_{sr}^2} \left[\frac{N}{mm^2} \right] \text{ lub } \left[\frac{kG}{mm^2} \right] \quad (5.5.)$$

gdzie:

P_{oz} – graniczne obciążenie zatarcia [N] lub [kG],

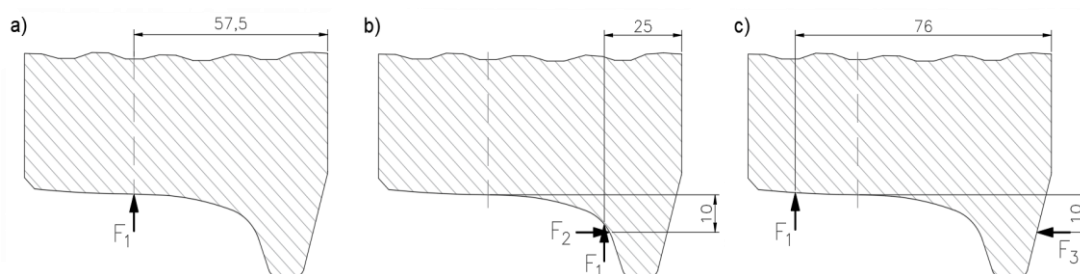
d_{sr} - średnia średnica śladów wytarcia na powierzchniach kulek [mm],

0,52 - współczynnik uwzględniający rozkład sił w węźle tarcia.

5.3.2. Wyznaczenie sił działających na koło tramwajowe

Z przeprowadzonej analizy literatury, a także przepisów prawnych wynika, iż na obecną chwilę nie istnieją wymagania normatywne, za pomocą których można by określić siły działające na koło tramwajowe przy różnych przypadkach obciążeń, w zależności od zastosowanego typu toru tramwajowego. Stąd, też celem wyznaczenia obciążeń, w zakresie których różne siły działają na koło, wykorzystano europejską normę [122], która pozwala określić analogiczne warianty obciążeń dla kół kolejowych.

W przypadku wagonów tramwajowych poruszających się po torze prostym, jak również łuku torowym (rys. 5.5), wyróżnia się trzy charakterystyczne przypadki obciążeń koła tramwajowego. W każdym z nich siły wyznaczone są na podstawie wartości obciążenia P , będącej połową siły pionowej, działającej na zestaw kołowy [123].



Rys. 5.5. Warianty obciążeń koła tramwajowego [123]: a) tor prosty – kontakt poprzez płaszczyznę kręgu tocznego; b) łuk torowy – prowadzenie przez koło zewnętrzne; c) łuk torowy – prowadzenie przez koło wewnętrzne.

W pracy jako bazowy pojazd do wyznaczenia sił działających na koła tramwajowe, wzięto pod uwagę wagon tramwajowy typu NGT8 produkcji firmy Bombardier, o masie własnej 42 [t], masie całkowitej 62,4 [t], posiadający cztery wózki jezdne, w których zabudowane są po dwa zestawy kołowe, co daje łącznie szesnaście kół jezdnych. W tym przypadku obciążenie P wynosi 2625 [kg], co odpowiada sile o wartości 25,74 [kN] (dla masy własnej pojazdu) oraz 3900 [kg], co odpowiada sile 38,25 [kN] (dla masy całkowitej pojazdu).

W tabeli 5.3 zestawiono wartości sił działających na koło jezdne wagonu tramwajowego typu NGT8, które wyznaczono na podstawie metodologii przedstawionej w normie [122].

Tabela 5.3. Wartości sił działających na koło jezdne wagonu tramwajowego typu NGT8 [opracowanie własne]

Przykłady obciążenia koła jezdnego	Wyznaczona wartość siły [kN] (masa własna wagonu)		Wyznaczona wartość siły [kN] (masa całkowita wagonu)	
	a) kontakt koła z szyną przez płaszczyznę kręgu tocznego	$F_1 = 32,18$		$F_1 = 47,81$
b) koło zewnętrzne przechodzące przez łuk torowy	$F_1 = 32,18$		$F_1 = 47,81$	
	prowadzący zestaw kołowy $F_2 = 18,02$	nieprowadzący zestaw kołowy $F_2 = 15,45$	prowadzący zestaw kołowy $F_2 = 26,77$	nieprowadzący zestaw kołowy $F_2 = 22,95$
c) koło wewnętrzne przechodzące przez łuk torowy	$F_1 = 32,18$		$F_1 = 47,81$	
	prowadzący zestaw kołowy $F_3 = 10,81$	nieprowadzący zestaw kołowy $F_3 = 9,27$	prowadzący zestaw kołowy $F_3 = 16,06$	nieprowadzący zestaw kołowy $F_3 = 13,77$

Określenie sił działających na koło tramwajowe pozwoliło, na wyznaczenie przedziałów nominalnych obciążeń w zakresie współpracujących elementów skojarzonych w układzie koło-szyna, co zostanie wykorzystane w kolejnym rozdziale, podczas analizy wyników badań przeprowadzonych na testerze tribologicznym.

5.3.3. Przebieg badań oraz analiza uzyskanych wyników

W pracy przedstawiono badania właściwości przeciwzatarciowych kompozycji badawczych przygotowanych, zgodnie z opisem zawartym w rozdziale 5.1, które przeprowadzono na testerze tribologicznym T-02U, z wykorzystaniem metody polegającej na oznaczeniu obciążenia zacierającego P_t wg normy [118] i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} wg metody opracowanej przez ITeE-PIB. Badania te pozwoliły wyznaczyć wartość współczynnika tarcia w zależności od obciążenia dla

wytypowanych 15 zestawów badawczych, co w konsekwencji umożliwiło pośrednie określenie wpływu modyfikatorów tarcia na współpracę elementów skojarzonych w układzie koło-szyna.

Do testów na aparacie czterokulowym, wykorzystano standardowe, jednorodnie kulki pomiarowe o średnicy 12,7 [mm], wykonane ze stali 100Cr6, które przed badaniem wymyto w benzynie ekstrakcyjnej, a następnie sezonowano przez 48 godzin w warunkach otoczenia, panujących w laboratorium. W trakcie badań w laboratorium panowały warunki otoczenia, monitorowane i regulowane na bieżąco, które były zbliżone do warunków standardowych wg NIST, czyli: nominalna temperatura 20°C, ciśnienie 101,325 [kPa]. Parametry biegów testowych były na bieżąco monitorowane i kalibrowane do wartości bazowych:

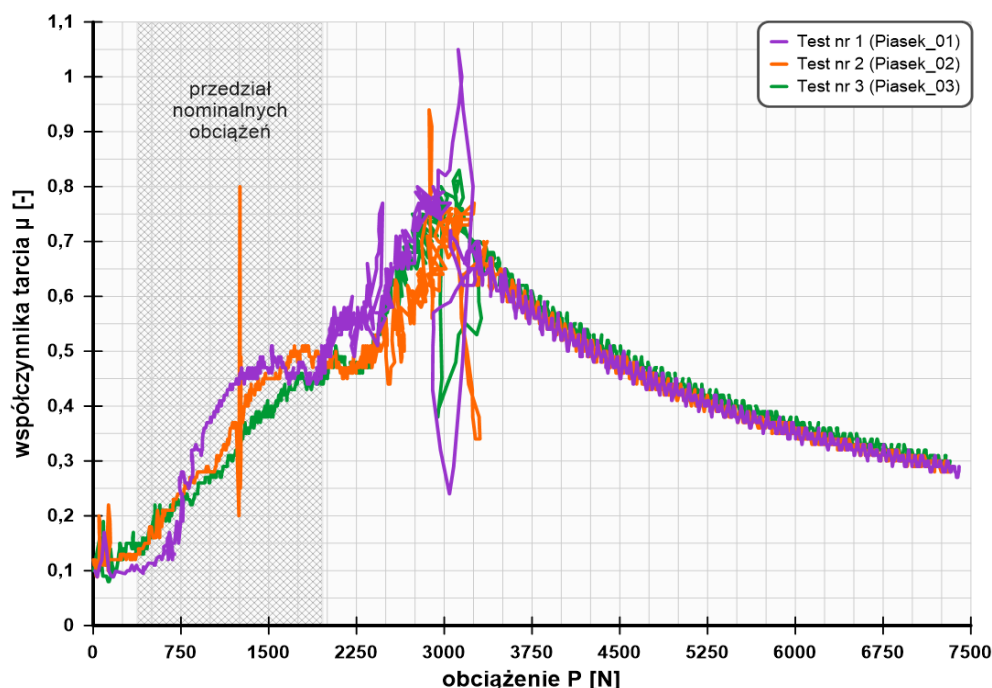
- prędkość obrotowa wału – 500±20 [obr/min],
- prędkość poślizgu – 0,19 [m/s],
- prędkość narastania obciążenia – 409 [N/s],
- maksymalne obciążenie – 7200±100 [N],
- obciążenie początkowe – 0 [N],
- minimalna liczba przebiegów testowych dla zestawu badawczego: 3 na każdy skojarzony węzeł tarcia.

Za pomocą przeprowadzonych biegów testowych dokonano oceny właściwości przeciwzatarciowych przygotowanych modelowych kompozycji badawczych, wyznaczając parametry takie jak wartość obciążenia zacierającego P_t oraz wartość granicznego nacisku zatarcia p_{oz} , pozwalającego na określenie odporności na zużycie badanego węzła tarcia. Przeprowadzono również analizę przebiegu zmiany współczynnika tarcia oraz momentu tarcia w funkcji obciążenia. W kolejnym etapie, za pomocą lupy pomiarowej z podziałką liniową, zmierzono średnice śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania biegów testowych na powierzchniach kulek pomiarowych. Średnicę mierzono co najmniej sześciokrotnie, celem uniknięcia błędów pomiarowych. Na każdej z trzech kulek (z danego testu badawczego) dokonano pomiarów zarówno równolegle, jak i prostopadle do śladów tarcia. Następnie otrzymane wyniki poddano analizie statystycznej, w celu wyznaczenia średniej arytmetycznej oraz odchylenia standardowego zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 5.2.

Wyniki przeprowadzonych badań, wytypowanych w pracy zestawów badawczych, zostały przedstawione na wykresach (od rys. 5.6 do rys. 5.20). Prezentują one chwilowe wartości współczynnika tarcia w funkcji obciążenia, z zaznaczonym przedziałem nominalnych obciążeń, który uzyskano poprzez przeskalowanie wyznaczonych w rozdziale 5.3.2 wartości sił działających na koło tramwajowe, na warunki węzła tarcia istniejącego w testerze tribologicznym T-02U.

Zestaw badawczy nr 1

Na rysunku 5.6 przedstawiono przebiegi współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , sporządzone na podstawie wyników, uzyskanych w trakcie trzech testów, w przypadku kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych.



Rys. 5.6. Wykres wartości współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , dla trzech testów wykonanych przy kompozycji badawczej nr 1 [opracowanie własne]

Porównując trzy przeprowadzone testy badawcze, można zauważyć iż miały one przybliżony przebieg, gdzie przy zidentyfikowanym wzroście oporów tarcia i obciążeniu ok. 450 [N], nastąpił wyraźny wzrost współczynnika tarcia. Moment wystąpienia zatarcia, czyli unieruchomienia węzła tarcia (we wszystkich trzech testach), miał miejsce w przypadku tej kompozycji badawczej przy obciążeniu ok. 3000 [N].

W tabeli 5.4 zestawiono wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia μ , uzyskane podczas każdego z trzech przeprowadzonych testów dla kompozycji badawczej nr 1, a także ich wartości średnie oraz odchylenie standardowe.

Tabela 5.4. Wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 1 [opracowanie własne]

	Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
Minimalny współczynnik tarcia	0,09	0,09	0,08	0,09	0,006
Maksymalny współczynnik tarcia	1,05	0,94	0,83	0,94	0,110
Średni współczynnik tarcia	0,45	0,43	0,42	0,43	0,015

W analizowanym przypadku minimalny współczynnik tarcia wynosi $\mu = 0,08$ i został uzyskany w trakcie testu badawczego nr 3. Z kolei maksymalny współczynnik tarcia

wynoszący $\mu = 1,05$ zidentyfikowano w przebiegu testu nr 1. Wartość średnia współczynnika tarcia dla wszystkich przeprowadzonych testów z wykorzystaniem zestawu badawczego nr 1 wyniosła $\mu = 0,43$.

W tabeli 5.5 przedstawiono wyniki pomiarów średnic śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania trzech biegów testowych na powierzchniach kulek przy kompozycji badawczej nr 1.

Tabela 5.5. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 1 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	$d_{\text{śr}}$	S
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Test nr 1	Kulka nr 1	2,7	2,6	2,7	2,9	2,8	2,6	2,72	0,117
	Kulka nr 2	2,9	2,5	2,6	2,7	2,7	2,8	2,70	0,141
	Kulka nr 3	2,7	2,6	2,5	2,8	2,6	2,9	2,68	0,147
Test nr 2	Kulka nr 1	2,9	2,7	2,8	2,7	2,9	2,6	2,77	0,121
	Kulka nr 2	2,7	2,8	2,6	2,8	2,7	2,9	2,75	0,105
	Kulka nr 3	2,5	2,7	2,9	2,6	2,6	2,7	2,67	0,137
Test nr 3	Kulka nr 1	2,6	2,8	2,7	2,8	2,6	2,7	2,70	0,089
	Kulka nr 2	2,8	2,6	2,5	2,7	2,9	2,8	2,72	0,147
	Kulka nr 3	2,7	2,8	2,6	2,5	2,8	2,6	2,67	0,121

Z analizy tabeli 5.5 wynika, iż zakres średnic śladów wytarcia w przypadku kompozycji badawczej nr 1, zawiera się w przedziale od 2,5 [mm] do 2,9 [mm]. Natomiast wartość średnia wszystkich zmierzonych śladów wytarcia wynosi 2,71 [mm].

W tabeli 5.6 zestawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych trzech testów badawczych, wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} , a także obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 1.

Tabela 5.6. Wartości obciążenia zacierającego P_t , granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 1 [opracowanie własne]

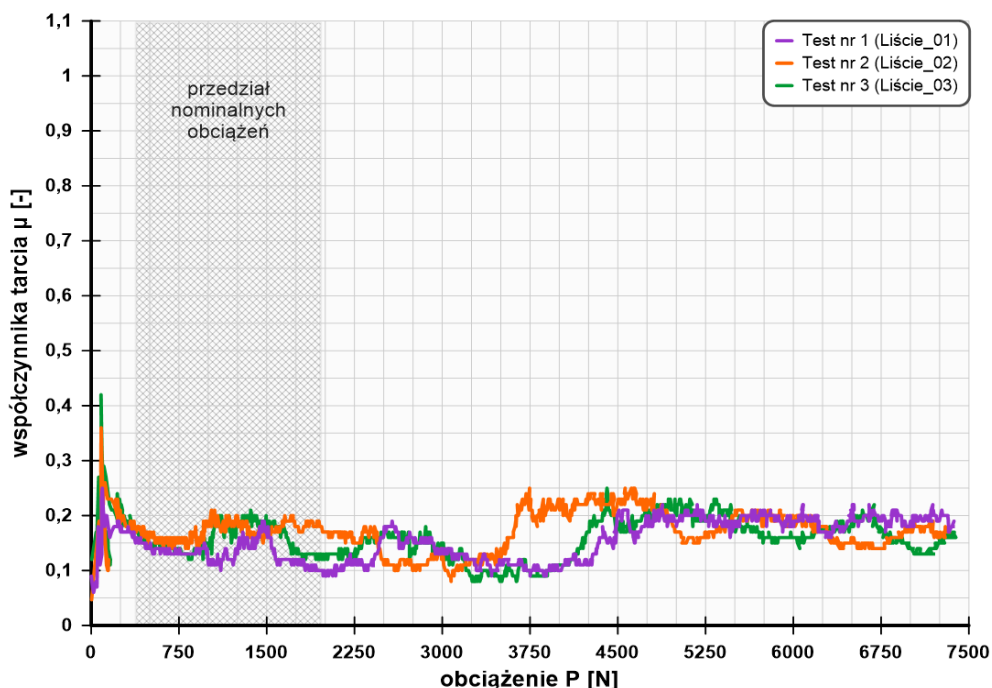
		Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
P_t	[N]	490,00	410,00	470,00	456,67	41,633
P_{oz}	[N]	2900,00	3020,00	2940,00	2953,33	61,101
p_{oz}	[N/mm ²]	206,86	211,05	210,58	209,50	2,297

Z tabeli 5.6 wynika, iż dla wszystkich testów badawczych otrzymana wartość obciążenia zacierającego P_t zawiera się w przedziale od 410 [N] do 490 [N], natomiast graniczne obciążenie zatarcia P_{oz} w przedziale od 2900 [N] do 3020 [N]. Z kolei średnia

wartość wyznaczonego granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 1 wynosi 209,50 [N/mm²].

Zestaw badawczy nr 2

Na rysunku 5.7 przedstawiono przebiegi współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , sporządzone na podstawie wyników, uzyskanych w trakcie trzech testów, w przypadku kompozycji badawczej, zawierającej mokre liście, które w porze jesiennej zalegają na szynach, po których poruszają się wagony tramwajowe.



Rys. 5.7. Wykres wartości współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , dla trzech testów wykonanych przy kompozycji badawczej nr 2 [opracowanie własne]

Z rysunku 5.7 wynika, że wszystkie trzy testy badawcze mają różny charakter przebiegu. W każdym z analizowanych przypadków nie zidentyfikowano momentu wystąpienia zatarcia węzła tarcia, dlatego też jako graniczne obciążenie zatarcia przyjęto maksymalne obciążenie węzła w trakcie trwania testów, czyli 7200 [N]. Wyraźny wzrost oporów tarcia nastąpił przy obciążeniu średnio około 1050 [N].

W tabeli 5.7 zestawiono wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia μ , uzyskane podczas każdego z trzech przeprowadzonych testów dla kompozycji badawczej nr 2, a także ich wartości średnie oraz odchylenie standardowe.

Tabela 5.7. Wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 2 [opracowanie własne]

	Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
Minimalny współczynnik tarcia	0,06	0,05	0,08	0,06	0,015
Maksymalny współczynnik tarcia	0,25	0,36	0,42	0,34	0,086
Średni współczynnik tarcia	0,15	0,17	0,16	0,16	0,010

Minimalny współczynnik tarcia dla zestawu badawczego nr 2 wynosi $\mu = 0,05$ i został uzyskany w trakcie testu badawczego nr 2. Natomiast maksymalny współczynnik tarcia wynoszący $\mu = 0,42$ uzyskano w trakcie przebiegu testu nr 3. Z kolei wartość średnia współczynnika tarcia wszystkich przeprowadzonych testów wyniosła $\mu = 0,16$.

W tabeli 5.8 przedstawiono wyniki pomiarów średnic śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania trzech biegów testowych na powierzchniach kulek przy kompozycji badawczej nr 2.

Tabela 5.8. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 2 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d _{śr}	S
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Test nr 1	Kulka nr 1	1,8	1,9	1,7	1,8	1,6	1,9	1,78	0,117
	Kulka nr 2	1,9	2,0	1,8	2,0	1,9	1,7	1,88	0,117
	Kulka nr 3	1,6	1,8	1,7	1,9	1,7	1,8	1,75	0,105
Test nr 2	Kulka nr 1	1,9	1,7	1,8	1,6	1,7	1,7	1,73	0,103
	Kulka nr 2	1,8	1,9	1,7	1,8	1,8	1,7	1,78	0,075
	Kulka nr 3	1,7	1,8	1,7	1,9	1,7	1,6	1,73	0,103
Test nr 3	Kulka nr 1	1,6	1,7	1,6	1,8	1,6	1,7	1,67	0,082
	Kulka nr 2	1,7	1,8	1,7	1,6	1,8	1,7	1,72	0,075
	Kulka nr 3	1,6	1,7	1,8	1,6	1,7	1,8	1,70	0,089

Z analizy tabeli 5.8 wynika, iż zakres średnic śladów wytarcia w przypadku kompozycji badawczej nr 2, zawiera się w przedziale od 1,6 [mm] do 2,0 [mm]. Z kolei średnia wartość wszystkich zmierzonych śladów wytarcia wynosi 1,75 [mm].

W tabeli 5.9 zestawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych trzech testów badawczych, wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} , a także obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 2.

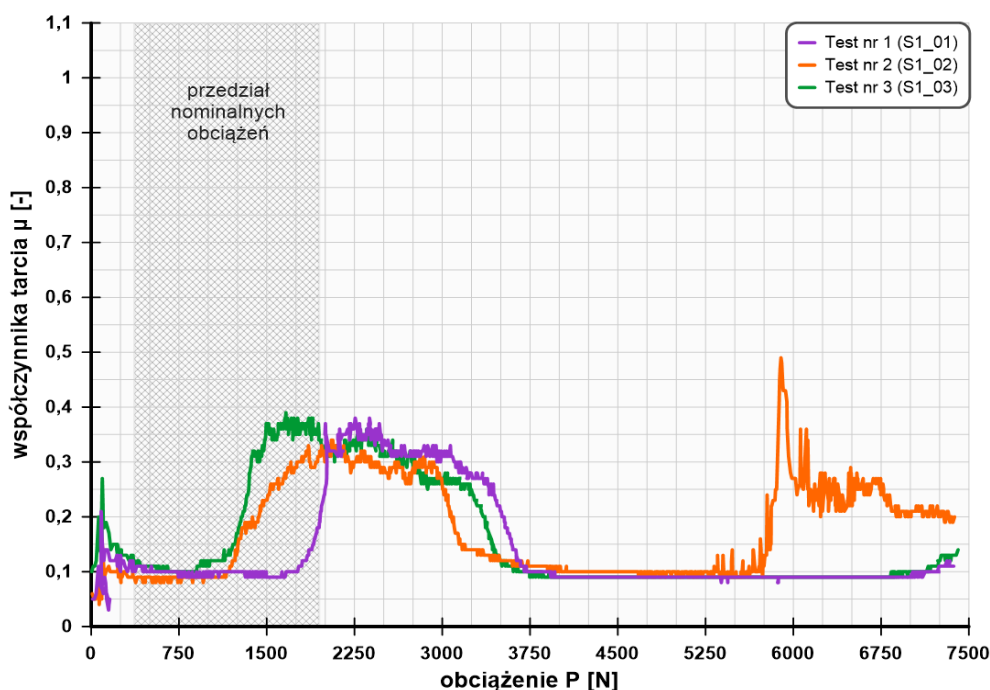
Tabela 5.9. Wartości obciążenia zacierającego P_t , granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 2 [opracowanie własne]

		Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
P_t	[N]	1230,00	970,00	940,00	1046,67	159,478
P_{oz}	[N]	7200,00	7200,00	7200,00	7200,00	0,000
p_{oz}	[N/mm ²]	1148,46	1222,53	1304,01	1225,00	77,807

W analizowanym przypadku dla wszystkich testów badawczych otrzymana wartość obciążenia zacierającego P_t zawiera się w przedziale od 940 [N] do 1230 [N]. Natomiast z uwagi na brak wystąpienia zjawiska zatarcia tego węzła tribologicznego, jako graniczne obciążenie zatarcia P_{oz} przyjęto maksymalne obciążenie węzła, czyli 7200 [N]. Średnia wartość wyznaczonego granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 2 wynosi 1225,00 [N/mm²].

Zestaw badawczy nr 3

Na rysunku 5.8 przedstawiono przebiegi współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , sporządzone na podstawie wyników, uzyskanych w trakcie trzech testów, w przypadku kompozycji badawczej, zawierającej środek smarujący na bazie oleju lnianego, który wykorzystywany jest do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.8. Wykres wartości współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , dla trzech testów wykonanych przy kompozycji badawczej nr 3 [opracowanie własne]

Porównując przeprowadzone testy badawcze, można zauważyć że mają one różny charakter przebiegu. Wyraźny wzrost oporów tarcia, wynikający z przerywania filmu smarowego, najszybciej osiągnięto w przypadku testu nr 2 (przy obciążeniu 1220 [N]),

a najpóźniej w przypadku test nr 1 (przy obciążeniu 1760 [N]). Unieruchomienie węzła tarcia, oznaczającego zatarcie układu, nastąpiło wyłącznie w trakcie trwania testu nr 2 przy obciążeniu 5900 [N].

W tabeli 5.10 zestawiono wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia μ , uzyskane podczas każdego z trzech przeprowadzonych testów dla kompozycji badawczej nr 3, a także ich wartości średnie oraz odchylenie standardowe.

Tabela 5.10. Wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 3 [opracowanie własne]

	Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
Minimalny współczynnik tarcia	0,03	0,04	0,09	0,05	0,032
Maksymalny współczynnik tarcia	0,38	0,49	0,39	0,42	0,061
Średni współczynnik tarcia	0,14	0,18	0,16	0,16	0,020

W analizowanym przypadku minimalny współczynnik tarcia wynosi $\mu = 0,03$ i został uzyskany w trakcie testu badawczego nr 1. Natomiast maksymalny współczynnik tarcia wynoszący $\mu = 0,49$ zidentyfikowano w przebiegu testu nr 2. Wartość średnia współczynnika tarcia dla przeprowadzonych testów z wykorzystaniem zestawu badawczego nr 3 wyniosła $\mu = 0,16$.

W tabeli 5.11 przedstawiono wyniki pomiarów średnic śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania trzech biegów testowych na powierzchniach kulek przy kompozycji badawczej nr 3.

Tabela 5.11. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 3 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	$d_{\text{śr}}$	S
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Test nr 1	Kulka nr 1	1,6	1,7	1,8	1,6	1,7	1,6	1,67	0,082
	Kulka nr 2	1,8	1,6	1,8	1,7	1,6	1,7	1,70	0,089
	Kulka nr 3	1,6	1,7	1,6	1,8	1,7	1,9	1,72	0,117
Test nr 2	Kulka nr 1	2,0	2,1	2,0	2,2	2,0	2,1	2,07	0,082
	Kulka nr 2	2,3	2,2	2,0	2,1	2,3	2,0	2,15	0,138
	Kulka nr 3	2,0	2,2	2,1	2,1	2,0	2,2	2,10	0,089
Test nr 3	Kulka nr 1	1,7	1,8	1,6	1,8	1,7	1,9	1,75	0,105
	Kulka nr 2	1,6	1,7	1,6	1,9	1,8	1,7	1,72	0,117
	Kulka nr 3	1,8	1,7	1,8	1,7	1,6	1,8	1,73	0,082

Z analizy tabeli 5.11 wynika, iż zakres średnic śladów wytarcia w przypadku kompozycji badawczej nr 3, dla testu nr 1 i nr 3 zawiera się w przedziale od 1,6 [mm] do 1,9 [mm]. Przy czym w przypadku testu nr 2 ze względu na zatarcie węzła, średnice wytarcia na kulkach pomiarowych mieszczą się w przedziale od 2,0 [mm] do 2,3 [mm]. Z kolei wartość średnia wszystkich zmierzonych śladów wytarcia wynosi 1,84 [mm].

W tabeli 5.12 zestawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych trzech testów badawczych, wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} , a także obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 3.

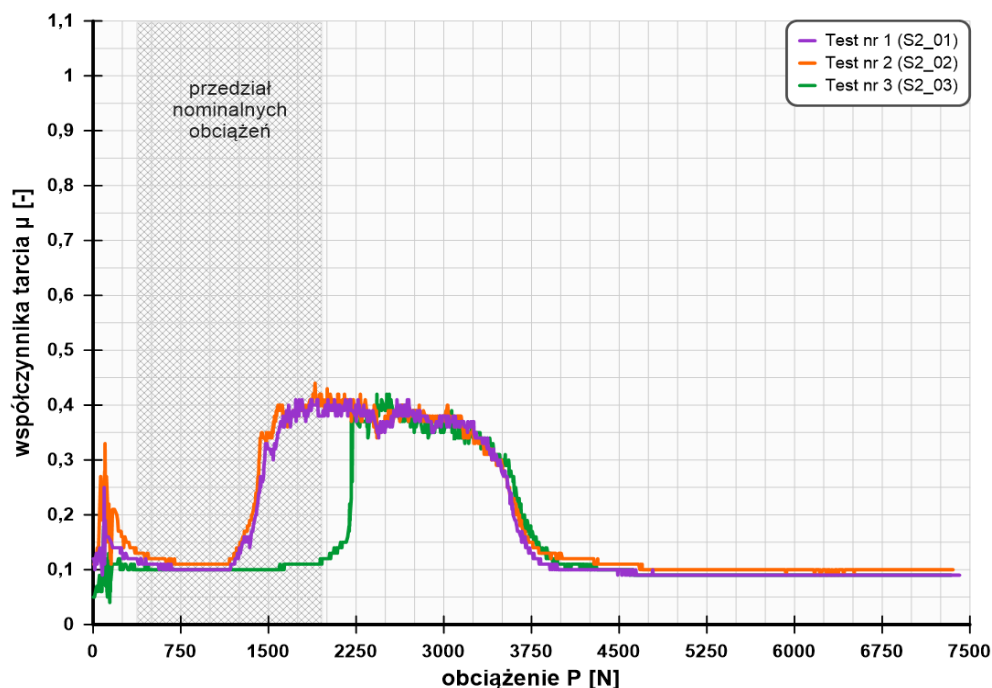
Tabela 5.12. Wartości obciążenia zacierającego P_t , granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 3 [opracowanie własne]

		Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
P_t	[N]	1760,00	1220,00	1240,00	1406,67	306,159
P_{oz}	[N]	7200,00	5900,00	7200,00	6766,67	750,555
p_{oz}	[N/mm ²]	1304,01	692,03	1246,15	1080,73	337,869

Z tabeli 5.12 wynika, iż dla wszystkich testów badawczych otrzymana wartość obciążenia zacierającego P_t zawiera się w przedziale od 1220 [N] do 1760 [N]. Wartość granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} dla testu nr 2 wyniosła 5900 [N], natomiast w przypadku testu nr 1 i nr 3 z uwagi na brak wystąpienia zjawiska zatarcia, przyjęto maksymalne obciążenie węzła, czyli 7200 [N]. Z kolei średnia wartość wyznaczonego granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 3 wynosi 1080,73 [N/mm²].

Zestaw badawczy nr 4

Na rysunku 5.9 przedstawiono przebiegi współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , sporządzone na podstawie wyników, uzyskanych w trakcie trzech testów, w przypadku kompozycji badawczej, zawierającej środek smarujący na bazie dwusiarczku molibdenu, który wykorzystywany jest do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.9. Wykres wartości współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P, dla trzech testów wykonanych przy kompozycji badawczej nr 4 [opracowanie własne]

Z rysunku 5.9 wynika, że wyłącznie test badawczy nr 1 i nr 2 mają przybliżony charakter przebiegu. W ich przypadku, wzrost współczynnika tarcia, przy zidentyfikowanym wyraźnym wzroście oporów tarcia, nastąpił przy obciążeniu 1230 [N]. Natomiast w teście nr 3 przerwanie filmu smarowego nastąpiło przy obciążeniu 1900 [N]. W każdym z analizowanych przypadków nie wystąpiło zjawisko zatarcia wężła tarcia, dlatego też jako graniczne obciążenie zatarcia przyjęto maksymalne obciążenie wężła w trakcie trwania testów, czyli 7200 [N].

W tabeli 5.13 zestawiono wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia μ , uzyskane podczas każdego z trzech przeprowadzonych testów dla kompozycji badawczej nr 4, a także ich wartości średnie oraz odchylenie standardowe.

Tabela 5.13. Wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 4 [opracowanie własne]

	Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
Minimalny współczynnik tarcia	0,09	0,09	0,04	0,07	0,029
Maksymalny współczynnik tarcia	0,41	0,44	0,42	0,42	0,015
Średni współczynnik tarcia	0,18	0,19	0,15	0,17	0,021

Z tabeli 5.13 wynika, iż minimalny współczynnik tarcia dla zestawu badawczego nr 4 wynosi $\mu = 0,04$ i został uzyskany w trakcie testu badawczego nr 3. Natomiast maksymalny współczynnik tarcia wynoszący $\mu = 0,44$ uzyskano w trakcie przebiegu testu nr 2. Z kolei wartość średnia współczynnika tarcia wszystkich przeprowadzonych testów wyniosła $\mu = 0,17$.

W tabeli 5.14 przedstawiono wyniki pomiarów średnic śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania trzech biegów testowych na powierzchniach kulek przy kompozycji badawczej nr 4.

Tabela 5.14. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 4 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	$d_{\text{śr}}$	S
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[–]
Test nr 1	Kulka nr 1	1,6	1,7	1,6	1,8	1,7	1,8	1,70	0,089
	Kulka nr 2	1,7	1,6	1,7	1,6	1,8	1,6	1,67	0,082
	Kulka nr 3	1,6	1,7	1,5	1,8	1,6	1,7	1,65	0,105
Test nr 2	Kulka nr 1	1,5	1,6	1,8	1,5	1,7	1,6	1,62	0,117
	Kulka nr 2	1,6	1,8	1,7	1,6	1,9	1,7	1,72	0,117
	Kulka nr 3	1,8	1,7	1,6	1,7	1,8	1,6	1,70	0,089
Test nr 3	Kulka nr 1	1,6	1,8	1,7	1,8	1,6	1,5	1,67	0,121
	Kulka nr 2	1,5	1,7	1,6	1,5	1,5	1,6	1,57	0,082
	Kulka nr 3	1,6	1,6	1,7	1,5	1,8	1,7	1,65	0,105

Zakres średnic śladów wytarcia w przypadku kompozycji badawczej nr 4, zawiera się w przedziale od 1,5 [mm] do 1,9 [mm]. Natomiast wartość średnia wszystkich zmierzonych śladów wytarcia wynosi 1,66 [mm].

W tabeli 5.15 zestawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych trzech testów badawczych, wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} , a także obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 4.

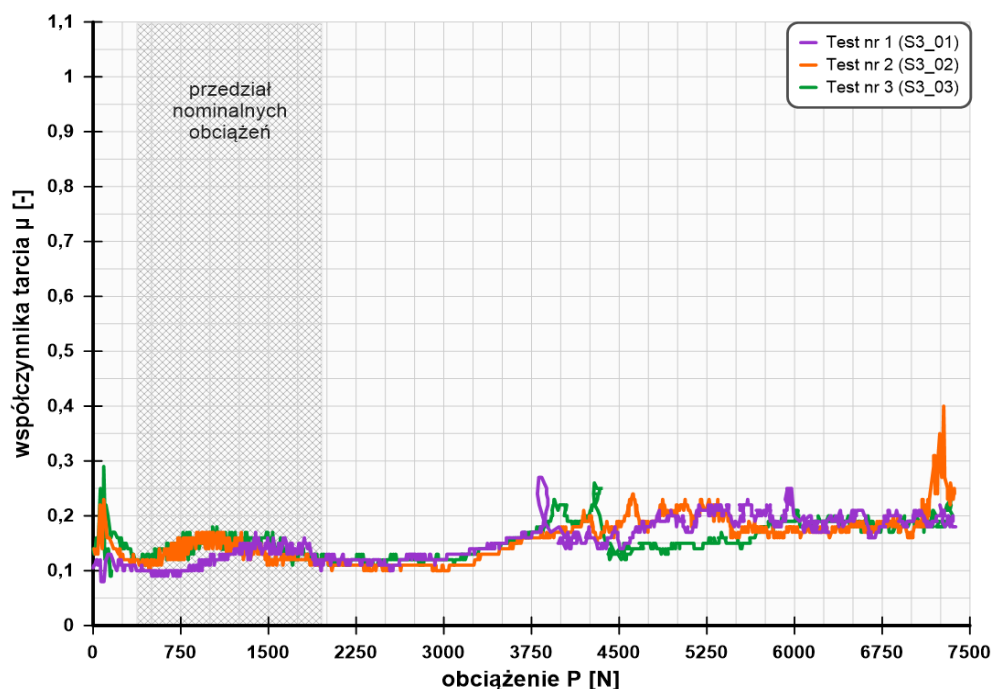
Tabela 5.15. Wartości obciążenia zacierającego P_t , granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 4 [opracowanie własne]

		Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
P_t	[N]	1240,00	1220,00	1900,00	1453,33	386,954
P_{oz}	[N]	7200,00	7200,00	7200,00	7200,00	0,000
p_{oz}	[N/mm ²]	1338,90	1330,05	1413,01	1360,65	45,560

Dla wszystkich testów badawczych otrzymana wartość obciążenia zacierającego P_t zawiera się w przedziale od 1220 [N] do 1900 [N]. Natomiast z uwagi na brak wystąpienia zjawiska zatarcia tego węzła tribologicznego, jako graniczne obciążenie zatarcia P_{oz} przyjęto maksymalne obciążenie węzła, czyli 7200 [N]. Średnia wartość wyznaczonego granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 4 wynosi 1360,65 [N/mm²].

Zestaw badawczy nr 5

Na rysunku 5.10 przedstawiono przebiegi współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , sporządzone na podstawie wyników, uzyskanych w trakcie trzech testów, w przypadku kompozycji badawczej, zawierającej stały środek smarujący w postaci sztyftu, który wykorzystywanych jest do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.10. Wykres wartości współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , dla trzech testów wykonanych przy kompozycji badawczej nr 5 [opracowanie własne]

Porównując trzy przeprowadzone testy badawcze, można zauważyć iż miały one przybliżony przebieg, gdzie przy zidentyfikowanym wzroście oporów tarcia i obciążeniu ok. 3100 [N], nastąpił wyraźny wzrost współczynnika tarcia. Z kolei unieruchomienie węzła tarcia, oznaczającego zatarcie układu, nastąpiło wyłącznie w trakcie trwania testu nr 2 przy obciążeniu około 7000 [N].

W tabeli 5.16 zestawiono wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia μ , uzyskane podczas każdego z trzech przeprowadzonych testów dla kompozycji badawczej nr 5, a także ich wartości średnie oraz odchylenie standardowe.

Tabela 5.16. Wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 5 [opracowanie własne]

	Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
Minimalny współczynnik tarcia	0,08	0,10	0,09	0,09	0,010
Maksymalny współczynnik tarcia	0,27	0,40	0,29	0,32	0,070
Średni współczynnik tarcia	0,16	0,16	0,16	0,16	0,000

W analizowanym przypadku minimalny współczynnik tarcia wynosi $\mu = 0,08$ i został uzyskany w trakcie testu badawczego nr 1. Z kolei maksymalny współczynnik tarcia wynoszący $\mu = 0,40$ zidentyfikowano w przebiegu testu nr 2. Wartość średnia współczynnika tarcia dla wszystkich przeprowadzonych testów z wykorzystaniem zestawu badawczego nr 5 wyniosła $\mu = 0,16$.

W tabeli 5.17 przedstawiono wyniki pomiarów średnic śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania trzech biegów testowych na powierzchniach kulek przy kompozycji badawczej nr 5.

Tabela 5.17. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 5 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_{sr}	S
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Test nr 1	Kulka nr 1	2,2	2,0	2,1	2,2	2,0	2,2	2,12	0,098
	Kulka nr 2	2,3	2,2	2,0	2,1	2,2	2,3	2,18	0,117
	Kulka nr 3	2,0	2,3	2,2	2,0	2,3	2,1	2,15	0,138
Test nr 2	Kulka nr 1	2,3	2,4	2,2	2,3	2,1	2,5	2,30	0,141
	Kulka nr 2	2,4	2,3	2,5	2,1	2,2	2,4	2,32	0,147
	Kulka nr 3	2,2	2,3	2,1	2,3	2,4	2,2	2,25	0,105
Test nr 3	Kulka nr 1	2,1	2,0	2,1	2,0	2,3	2,0	2,08	0,117
	Kulka nr 2	2,0	2,2	2,0	2,1	2,3	2,2	2,13	0,121
	Kulka nr 3	2,3	2,1	2,2	2,0	2,1	2,0	2,12	0,117

Zakres średnic śladów wytarcia w przypadku kompozycji badawczej nr 5, dla testu nr 1 oraz nr 3 zawiera się w przedziale od 2,0 [mm] do 2,3 [mm]. Przy czym w przypadku testu nr 2 ze względu na zatarcie węzła, średnice wytarcia na kulkach pomiarowych mieszczą się w zakresie od 2,1 [mm] do 2,5 [mm]. Z kolei wartość średnia wszystkich zmierzonych śladów wytarcia wynosi 2,18 [mm].

W tabeli 5.18 zestawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych trzech testów badawczych, wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} , a także obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 5.

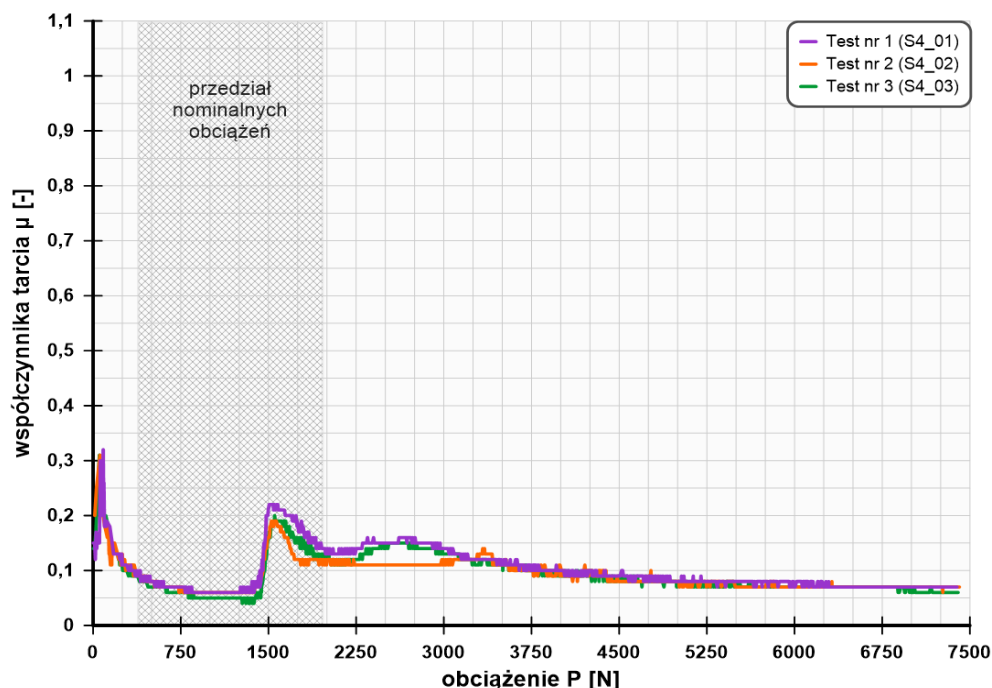
Tabela 5.18. Wartości obciążenia zacierającego P_t , granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 5 [opracowanie własne]

		Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
P_t	[N]	2950,00	3240,00	3150,00	3113,33	148,436
P_{oz}	[N]	7200,00	7000,00	7200,00	7133,33	115,470
p_{oz}	[N/mm ²]	809,95	694,79	840,07	781,60	76,676

Z tabeli 5.18 wynika, iż dla wszystkich testów badawczych otrzymana wartość obciążenia zacierającego P_t zawiera się w przedziale od 2950 [N] do 3240 [N]. Wartość granicznego obciążenie zatarcia P_{oz} dla testu nr 2 wyniosła 7000 [N], natomiast w przypadku testu nr 1 i nr 3 z uwagi na brak wystąpienia zjawiska zatarcia, przyjęto maksymalne obciążenie węzła – 7200 [N]. Z kolei średnia wartość wyznaczonego granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 5 wynosi 781,60 [N/mm²].

Zestaw badawczy nr 6

Na rysunku 5.11 przedstawiono przebiegi współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , sporządzone na podstawie wyników, uzyskanych w trakcie trzech testów, w przypadku kompozycji badawczej, zawierającej autorski środek smarujący mogący zostać zastosowany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.11. Wykres wartości współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , dla trzech testów wykonanych przy kompozycji badawczej nr 6 [opracowanie własne]

Porównując trzy przeprowadzone testy badawcze, można zauważyć iż miały one przybliżony przebieg. W każdym z analizowanych przypadków, nie zidentyfikowano momentu wystąpienia zatarcia węzła tarcia, dlatego też jako graniczne obciążenie

zatarcia określono maksymalne obciążenie węzła w trakcie trwania testów, czyli 7200 [N]. Z kolei wyraźny wzrost oporów tarcia na skutek przzerwania filmu smarowego nastąpił przy obciążeniu średnio około 1400 [N].

W tabeli 5.19 zestawiono wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia μ , uzyskane podczas każdego z trzech przeprowadzonych testów dla kompozycji badawczej nr 6, a także ich wartości średnie oraz odchylenie standardowe.

Tabela 5.19. Wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 6 [opracowanie własne]

	Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
Minimalny współczynnik tarcia	0,06	0,06	0,04	0,05	0,012
Maksymalny współczynnik tarcia	0,32	0,31	0,31	0,31	0,006
Średni współczynnik tarcia	0,10	0,09	0,09	0,09	0,006

W analizowanym przypadku minimalny współczynnik tarcia wynosi $\mu = 0,04$ i został uzyskany w trakcie testu badawczego nr 3. Natomiast maksymalny współczynnik tarcia wynoszący $\mu = 0,32$ zidentyfikowano w przebiegu testu nr 1. Wartość średnia współczynnika tarcia dla wszystkich przeprowadzonych testów z wykorzystaniem zestawu badawczego nr 6 wyniosła $\mu = 0,09$.

W tabeli 5.20 przedstawiono wyniki pomiarów średnic śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania trzech biegów testowych na powierzchniach kulek przy kompozycji badawczej nr 6.

Tabela 5.20. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 6 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_{sr}	S
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Test nr 1	Kulka nr 1	0,7	0,6	0,7	0,5	0,6	0,8	0,65	0,105
	Kulka nr 2	0,8	0,8	0,6	0,7	0,5	0,6	0,67	0,121
	Kulka nr 3	0,5	0,7	0,6	0,5	0,7	0,5	0,58	0,098
Test nr 2	Kulka nr 1	0,7	0,6	0,8	0,5	0,7	0,6	0,65	0,105
	Kulka nr 2	0,8	0,7	0,9	0,6	0,8	0,5	0,72	0,147
	Kulka nr 3	0,6	0,5	0,8	0,7	0,6	0,7	0,65	0,105
Test nr 3	Kulka nr 1	0,6	0,5	0,7	0,4	0,7	0,6	0,58	0,117
	Kulka nr 2	0,8	0,6	0,8	0,7	0,5	0,8	0,70	0,126
	Kulka nr 3	0,7	0,5	0,4	0,6	0,6	0,5	0,55	0,105

Z analizy tabeli 5.20 wynika, iż zakres średnic śladów wytarcia w przypadku kompozycji badawczej nr 6, zawiera się w przedziale od 0,4 [mm] do 0,9 [mm]. Natomiast wartość średnia wszystkich zmierzonych śladów wytarcia wynosi 0,64 [mm].

W tabeli 5.21 zestawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych trzech testów badawczych, wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} , a także obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 6.

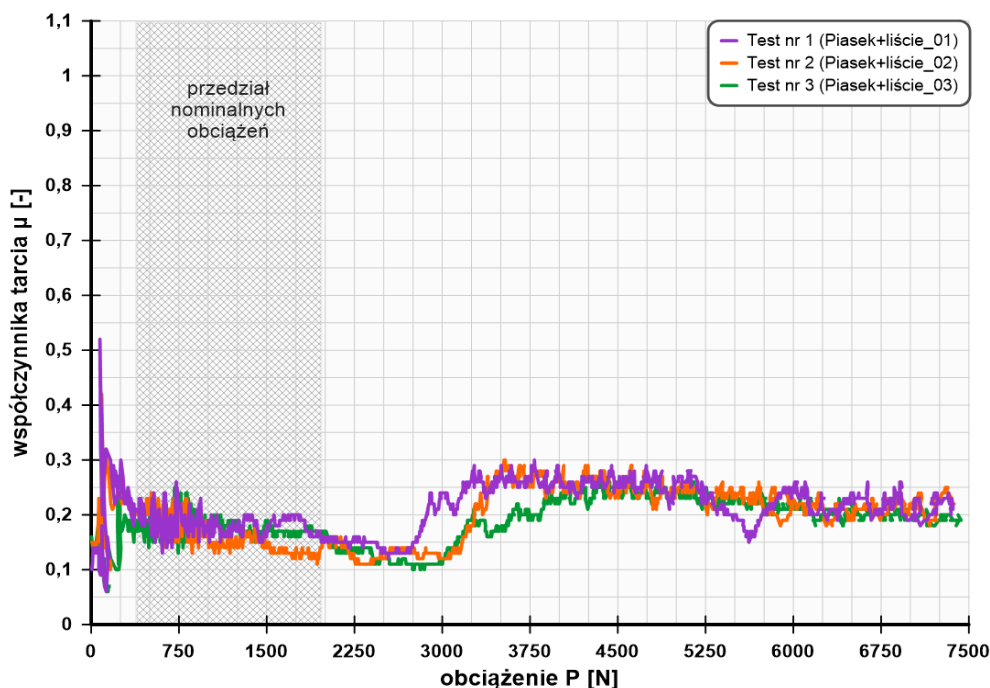
Tabela 5.21. Wartości obciążenia zacierającego P_t , granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 6
[opracowanie własne]

		Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
P_t	[N]	1400,00	1410,00	1430,00	1413,33	15,275
P_{oz}	[N]	7200,00	7200,00	7200,00	7200,00	0,000
p_{oz}	[N/mm ²]	9334,07	8285,34	10025,26	9214,89	876,062

Z analizy danych wynika, iż dla wszystkich testów badawczych otrzymana wartość obciążenia zacierającego P_t zawiera się w przedziale od 1400 [N] do 1430 [N]. Natomiast z uwagi na brak wystąpienia zjawiska zatarcia tego węzła tribologicznego, jako graniczne obciążenie zatarcia P_{oz} przyjęto maksymalne obciążenie węzła, czyli 7200 [N]. Średnia wartość wyznaczonego granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 6 wynosi 9214,89 [N/mm²].

Zestaw badawczy nr 7

Na rysunku 5.12 przedstawiono przebiegi współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , sporządzone na podstawie wyników, uzyskanych w trakcie trzech testów, w przypadku kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych oraz mokre liście, które w porze jesiennej zalegają na szynach torowisk tramwajowych.



Rys. 5.12. Wykres wartości współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , dla trzech testów wykonanych przy kompozycji badawczej nr 7 [opracowanie własne]

Z rysunku 5.12 wynika, że wszystkie trzy testy badawcze mają zbliżony charakter przebiegu. W każdym z analizowanych przypadków nie zidentyfikowano momentu wystąpienia zatarcia wężła tarcia, dlatego też jako graniczne obciążenie zatarcia przyjęto maksymalne obciążenie wężła w trakcie trwania testów, czyli 7200 [N]. Natomiast wyraźny wzrost oporów tarcia nastąpił przy obciążeniu średnio około 2880 [N].

W tabeli 5.22 zestawiono wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia μ , uzyskane podczas każdego z trzech przeprowadzonych testów dla kompozycji badawczej nr 7, a także ich wartości średnie oraz odchylenie standardowe.

Tabela 5.22. Wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 7 [opracowanie własne]

	Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
Minimalny współczynnik tarcia	0,06	0,10	0,06	0,07	0,023
Maksymalny współczynnik tarcia	0,52	0,42	0,27	0,40	0,126
Średni współczynnik tarcia	0,21	0,20	0,19	0,20	0,010

W analizowanym przypadku minimalny współczynnik tarcia wynosi $\mu = 0,06$ i został uzyskany w trakcie testu badawczego nr 1 oraz nr 3. Z kolei maksymalny współczynnik tarcia wynoszący $\mu = 0,52$ zidentyfikowano w przebiegu testu nr 1. Wartość średnia współczynnika tarcia dla wszystkich przeprowadzonych testów z wykorzystaniem zestawu badawczego nr 7 wyniosła $\mu = 0,20$.

W tabeli 5.23 przedstawiono wyniki pomiarów średnic śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania trzech biegów testowych na powierzchniach kulek przy kompozycji badawczej nr 7.

Tabela 5.23. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 7 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	$d_{\text{śr}}$	S
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Test nr 1	Kulka nr 1	2,5	2,3	2,4	2,6	2,5	2,4	2,45	0,105
	Kulka nr 2	2,7	2,5	2,4	2,6	2,4	2,5	2,52	0,117
	Kulka nr 3	2,5	2,6	2,5	2,7	2,4	2,5	2,53	0,103
Test nr 2	Kulka nr 1	2,4	2,3	2,5	2,3	2,6	2,5	2,43	0,121
	Kulka nr 2	2,5	2,7	2,6	2,4	2,5	2,7	2,57	0,121
	Kulka nr 3	2,7	2,5	2,7	2,6	2,8	2,6	2,65	0,105
Test nr 3	Kulka nr 1	2,2	2,5	2,4	2,3	2,5	2,2	2,35	0,138
	Kulka nr 2	2,6	2,3	2,5	2,6	2,7	2,4	2,52	0,147
	Kulka nr 3	2,3	2,6	2,4	2,4	2,5	2,6	2,47	0,121

Z analizy tabeli 5.23 wynika, iż zakres średnic śladów wytarcia w przypadku kompozycji badawczej nr 7, zawiera się w przedziale od 2,2 [mm] do 2,8 [mm]. Natomiast wartość średnia wszystkich zmierzonych śladów wytarcia wynosi 2,50 [mm].

W tabeli 5.24 zestawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych trzech testów badawczych, wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} , a także obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 7.

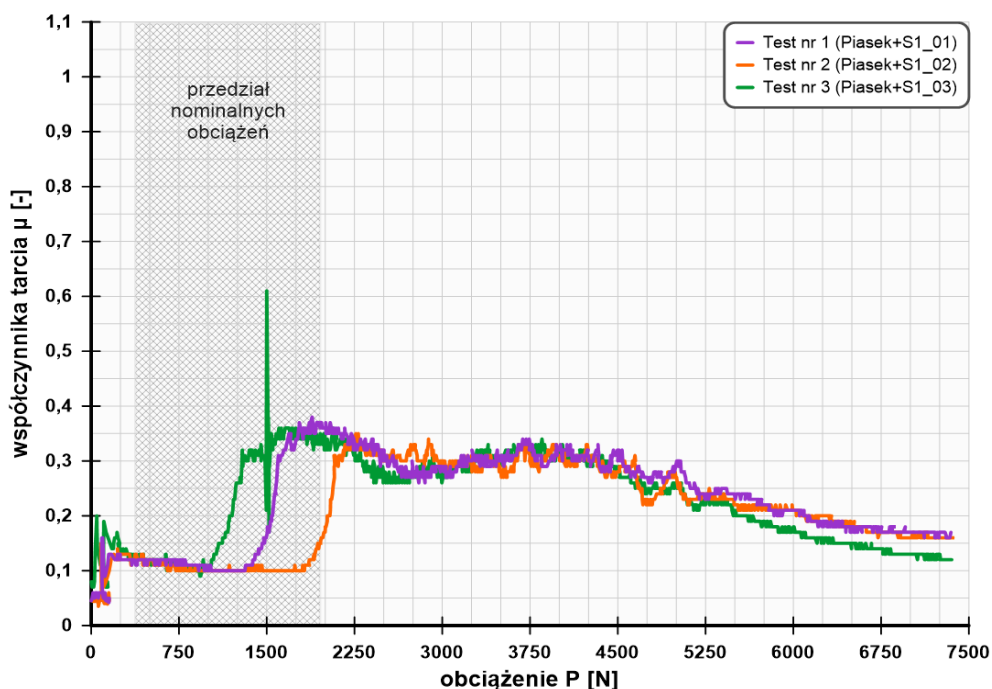
Tabela 5.24. Wartości obciążenia zacierającego P_t , granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 7 [opracowanie własne]

		Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
P_t	[N]	2720,00	3050,00	2880,00	2883,33	165,025
P_{oz}	[N]	7200,00	7200,00	7200,00	7200,00	0,000
p_{oz}	[N/mm ²]	599,04	575,78	626,58	600,47	25,430

Z analizy danych zawartych w tabeli 5.24 wynika, że dla wszystkich testów badawczych otrzymana wartość obciążenia zacierającego P_t zawiera się w przedziale od 2720 [N] do 3050 [N]. Natomiast z uwagi na brak wystąpienia zjawiska zatarcia tego wężła tribologicznego, jako graniczne obciążenie zatarcia P_{oz} przyjęto maksymalne obciążenie wężła, czyli 7200 [N]. Średnia wartość wyznaczonego granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 2 wynosi 600,47 [N/mm²].

Zestaw badawczy nr 8

Na rysunku 5.13 przedstawiono przebiegi współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , sporządzone na podstawie wyników, uzyskanych w trakcie trzech testów, w przypadku kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych oraz środek smarujący na bazie oleju lnianego wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.13. Wykres wartości współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , dla trzech testów wykonanych przy kompozycji badawczej nr 8 [opracowanie własne]

Porównując przeprowadzone testy badawcze, można zauważyć iż, miały one różny charakter przebiegu. Wyraźny wzrost oporów tarcia oznaczający przerwanie filmu smarowego najszybciej osiągnięto w przypadku testu nr 3 (przy obciążeniu 1030 [N]), a najpóźniej w przypadku test nr 2 (przy obciążeniu 1840 [N]). W każdym z analizowanych przypadków nie zidentyfikowano momentu wystąpienia zatarcia wężła tarcia, dlatego też jako graniczne obciążenie zatarcia przyjęto maksymalne obciążenie wężła w trakcie trwania testów, czyli 7200 [N].

W tabeli 5.25 zestawiono wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia μ , uzyskane podczas każdego z trzech przeprowadzonych testów dla kompozycji badawczej nr 8, a także ich wartości średnie oraz odchylenie standardowe.

Tabela 5.25. Wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 8 [opracowanie własne]

	Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
Minimalny współczynnik tarcia	0,05	0,04	0,07	0,05	0,015
Maksymalny współczynnik tarcia	0,38	0,35	0,61	0,45	0,142
Średni współczynnik tarcia	0,23	0,21	0,23	0,22	0,012

Minimalny współczynnik tarcia wynosi $\mu = 0,04$ i został uzyskany w trakcie testu badawczego nr 2. Z kolei maksymalny współczynnik tarcia wynoszący $\mu = 0,61$ zidentyfikowano w przebiegu testu nr 3. Wartość średnia współczynnika tarcia dla wszystkich przeprowadzonych testów z wykorzystaniem zestawu badawczego nr 8 wyniosła $\mu = 0,22$.

W tabeli 5.26 przedstawiono wyniki pomiarów średnic śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania trzech biegów testowych na powierzchniach kulek przy kompozycji badawczej nr 8.

Tabela 5.26. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 8 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆		
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	d _{śr}	S
Test nr 1	Kulka nr 1	1,9	2,1	2,0	1,9	2,1	2,0	2,00	0,089
	Kulka nr 2	2,1	1,8	1,9	2,0	2,1	1,9	1,97	0,121
	Kulka nr 3	1,7	1,9	2,0	1,8	1,9	2,1	1,90	0,141
Test nr 2	Kulka nr 1	2,2	2,0	2,1	2,1	2,0	2,1	2,08	0,075
	Kulka nr 2	2,0	1,8	1,9	2,1	2,0	1,9	1,95	0,105
	Kulka nr 3	1,8	2,0	1,9	2,0	1,9	2,2	1,97	0,137
Test nr 3	Kulka nr 1	1,7	2,0	2,1	2,0	1,8	1,9	1,92	0,147
	Kulka nr 2	2,1	1,9	2,0	2,1	2,2	1,9	2,03	0,121
	Kulka nr 3	2,2	2,0	1,9	2,0	1,8	2,0	1,98	0,133

Wyznaczony zakres średnic śladów wytarcia w przypadku kompozycji badawczej nr 8, zawiera się w przedziale od 1,7 [mm] do 2,2 [mm]. Natomiast wartość średnia wszystkich zmierzonych śladów wytarcia wynosi 1,98 [mm].

W tabeli 5.27 zestawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych trzech testów badawczych, wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} , a także obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 8.

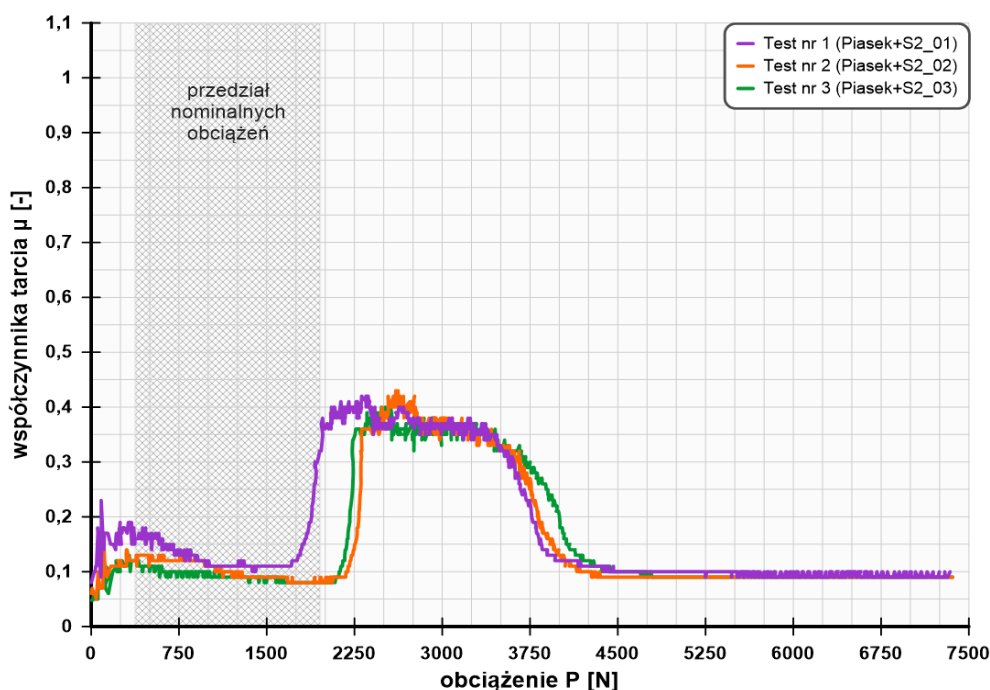
Tabela 5.27. Wartości obciążenia zacierającego P_t , granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 8 [opracowanie własne]

		Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
P_t	[N]	1430,00	1840,00	1030,00	1433,33	405,010
P_{oz}	[N]	7200,00	7200,00	7200,00	7200,00	0,000
p_{oz}	[N/mm ²]	979,03	936,00	957,15	957,39	21,515

Dla wszystkich testów badawczych otrzymana wartość obciążenia zacierającego P_t zawiera się w przedziale od 1030 [N] do 1840 [N]. Natomiast z uwagi na brak wystąpienia zjawiska zatarcia tego węzła tribologicznego, jako graniczne obciążenie zatarcia P_{oz} przyjęto maksymalne obciążenie węzła, czyli 7200 [N]. Z kolei średnia wartość wyznaczonego granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 8 wynosi 957,39 [N/mm²].

Zestaw badawczy nr 9

Na rysunku 5.14 przedstawiono przebiegi współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , sporządzone na podstawie wyników, uzyskanych w trakcie trzech testów, w przypadku kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych oraz środek smarujący na bazie dwusiarczku molibdenu wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.14. Wykres wartości współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , dla trzech testów wykonanych przy kompozycji badawczej nr 9 [opracowanie własne]

Porównując trzy przeprowadzone testy badawcze dla analizowanej kompozycji badawczej, możemy zauważyć, iż wyłącznie test nr 2 oraz nr 3 mają zbliżony

charakter przebiegu. W ich przypadku, wzrost współczynnika tarcia, przy zidentyfikowanym wyraźnym wzroście oporów tarcia, nastąpił przy obciążeniu około 2170 [N]. Z kolei w teście nr 1 zjawisko przerwania filmu smarowego wystąpiło przy obciążeniu 1760 [N]. Natomiast w każdym z testów nie zidentyfikowano zatarcia wężła tarcia. Dlatego też jako graniczne obciążenie zatarcia wyznaczono maksymalne obciążenie wężła w trakcie trwania testów, czyli 7200 [N].

W tabeli 5.28 zestawiono wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia μ , uzyskane podczas każdego z trzech przeprowadzonych testów dla kompozycji badawczej nr 9, a także ich wartości średnie oraz odchylenie standardowe.

Tabela 5.28. Wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 9 [opracowanie własne]

	Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
Minimalny współczynnik tarcia	0,08	0,05	0,05	0,06	0,017
Maksymalny współczynnik tarcia	0,42	0,43	0,40	0,42	0,015
Średni współczynnik tarcia	0,17	0,15	0,16	0,16	0,010

Z tabeli 5.28 wynika, że minimalny współczynnik tarcia wynosi $\mu = 0,05$ i został uzyskany w trakcie testu badawczego nr 2 oraz nr 3. Z kolei maksymalny współczynnik tarcia wynoszący $\mu = 0,43$ zidentyfikowano w przebiegu testu nr 2. Wartość średnia współczynnika tarcia dla wszystkich przeprowadzonych testów z wykorzystaniem zestawu badawczego nr 9 wyniosła $\mu = 0,16$.

W tabeli 5.29 przedstawiono wyniki pomiarów średnic śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania trzech biegów testowych na powierzchniach kulek przy kompozycji badawczej nr 9.

Tabela 5.29. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 9 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	$d_{\text{śr}}$	S
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Test nr 1	Kulka nr 1	1,6	1,7	1,8	1,9	1,7	1,8	1,75	0,105
	Kulka nr 2	1,7	1,8	1,7	1,6	1,8	1,6	1,70	0,089
	Kulka nr 3	1,9	1,7	1,6	1,8	1,9	2	1,82	0,147
Test nr 2	Kulka nr 1	1,8	1,7	1,8	1,7	1,6	1,7	1,72	0,075
	Kulka nr 2	1,7	1,8	1,9	1,6	1,8	1,9	1,78	0,117
	Kulka nr 3	1,9	1,7	1,8	1,6	1,7	1,8	1,75	0,105

Tabela 5.29. cd. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 9 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	$d_{\text{śr}}$	S
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Test nr 3	Kulka nr 1	1,7	1,8	1,6	1,9	1,6	1,7	1,72	0,117
	Kulka nr 2	1,8	1,7	1,6	1,7	1,9	1,8	1,75	0,105
	Kulka nr 3	1,7	1,8	1,6	1,8	1,7	1,6	1,70	0,089

Zakres średnic śladów wytarcia w przypadku kompozycji badawczej nr 9, zawiera się w przedziale od 1,6 [mm] do 2,0 [mm]. Natomiast wartość średnia wszystkich zmierzonych śladów wytarcia wynosi 1,74 [mm].

W tabeli 5.30 zestawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych trzech testów badawczych, wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} , a także obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 9.

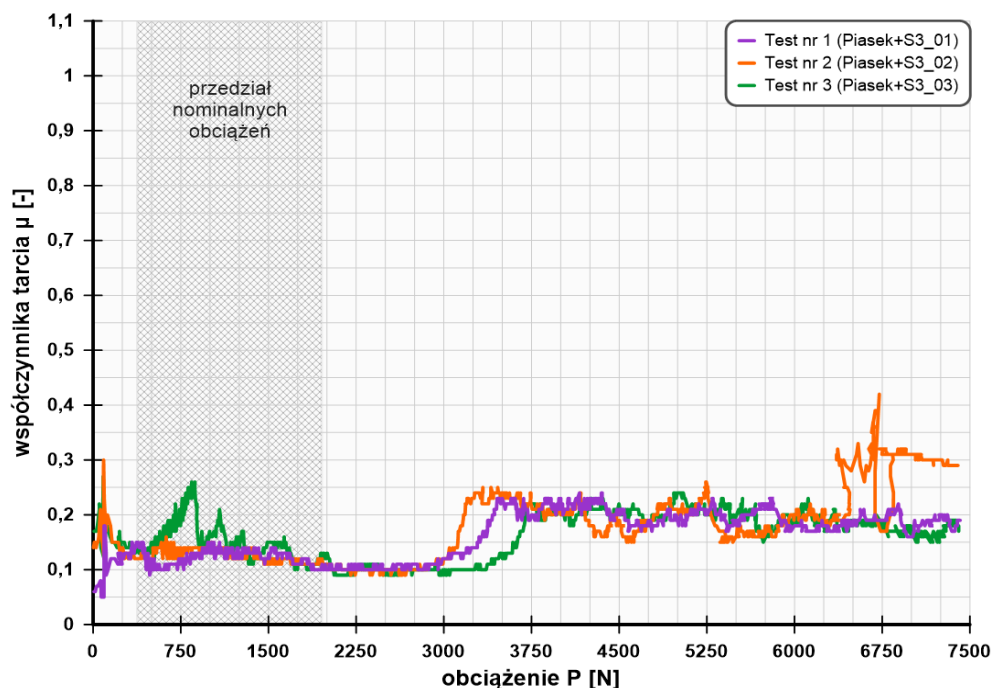
Tabela 5.30. Wartości obciążenia zacierającego P_t , granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 9 [opracowanie własne]

		Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
P_t	[N]	1760,00	2190,00	2150,00	2033,33	237,557
P_{oz}	[N]	7200,00	7200,00	7200,00	7200,00	0,000
p_{oz}	[N/mm ²]	1214,81	1222,53	1262,29	1233,21	25,477

Z tabeli 5.30 wynika, że dla wszystkich testów badawczych otrzymana wartość obciążenia zacierającego P_t zawiera się w przedziale od 1760 [N] do 2190 [N]. Natomiast z uwagi na brak wystąpienia zjawiska zatarcia tego węzła tribologicznego, jako graniczne obciążenie zatarcia P_{oz} przyjęto maksymalne obciążenie węzła, czyli 7200 [N]. Średnia wartość wyznaczonego granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 9 wynosi 1233,21 [N/mm²].

Zestaw badawczy nr 10

Na rysunku 5.15 przedstawiono przebiegi współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , sporządzone na podstawie wyników, uzyskanych w trakcie trzech testów, w przypadku kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych oraz stały środek smarujący w postaci sztyftu, który wykorzystywanych jest do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.15. Wykres wartości współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P, dla trzech testów wykonanych przy kompozycji badawczej nr 10 [opracowanie własne]

Z rysunku 5.15 wynika, że wszystkie trzy testy badawcze mają zbliżony przebieg, gdzie przy zidentyfikowanym wyraźnym wzroście oporów tarcia i obciążeniu ok. 3000 [N], nastąpił wzrost współczynnika tarcia. Unieruchomienie węzła tarcia oznaczającego zatarcie układu nastąpiło wyłącznie w trakcie trwania testu nr 2 przy obciążeniu 6675 [N].

W tabeli 5.31 zestawiono wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia μ , uzyskane podczas każdego z trzech przeprowadzonych testów dla kompozycji badawczej nr 10, a także ich wartości średnie oraz odchylenie standardowe.

Tabela 5.31. Wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 10 [opracowanie własne]

	Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
Minimalny współczynnik tarcia	0,05	0,09	0,09	0,08	0,023
Maksymalny współczynnik tarcia	0,24	0,42	0,27	0,31	0,096
Średni współczynnik tarcia	0,16	0,18	0,16	0,17	0,012

W analizowanym przypadku minimalny współczynnik tarcia wynosi $\mu = 0,05$ i został uzyskany w trakcie testu badawczego nr 1. Natomiast maksymalny współczynnik tarcia wynoszący $\mu = 0,42$ zidentyfikowano w przebiegu testu nr 2. Wartość średnia współczynnika tarcia dla wszystkich przeprowadzonych testów z wykorzystaniem zestawu badawczego nr 10 wyniosła $\mu = 0,17$.

W tabeli 5.32 przedstawiono wyniki pomiarów średnic śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania trzech biegów testowych na powierzchniach kulek przy kompozycji badawczej nr 10.

Tabela 5.32. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 10 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	$d_{\text{śr}}$	S
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Test nr 1	Kulka nr 1	2,2	2,1	2,3	2,4	2,3	2,2	2,25	0,105
	Kulka nr 2	2,3	2,2	2,1	2,3	2,4	2,3	2,27	0,103
	Kulka nr 3	2,1	2,4	2,3	2,1	2,2	2,3	2,23	0,121
Test nr 2	Kulka nr 1	2,4	2,2	2,1	2,5	2,3	2,2	2,28	0,147
	Kulka nr 2	2,5	2,3	2,4	2,2	2,4	2,3	2,35	0,105
	Kulka nr 3	2,3	2,2	2,5	2,4	2,2	2,4	2,33	0,121
Test nr 3	Kulka nr 1	2,2	2,0	2,1	2,3	2,4	2,2	2,20	0,141
	Kulka nr 2	2,3	2,2	2,4	2,2	2,2	2,1	2,23	0,103
	Kulka nr 3	2,2	2,4	2,3	2,2	2,3	2,2	2,27	0,082

Z analizy tabeli 5.32 wynika, iż zakres średnic śladów wytarcia w przypadku kompozycji badawczej nr 10, dla testu nr 1 i nr 3 zawiera się w przedziale od 2,0 [mm] do 2,4 [mm]. Przy czym w przypadku testu nr 2 ze względu na zatarcie węzła, średnice wytarcia na kulkach pomiarowych mieszczą się w zakresie od 2,1 [mm] do 2,5 [mm]. Z kolei wartość średnia wszystkich zmierzonych śladów wytarcia wynosi 2,27 [mm].

W tabeli 5.33 zestawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych trzech testów badawczych, wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} , a także obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 10.

Tabela 5.33. Wartości obciążenia zacierającego P_t , granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 10 [opracowanie własne]

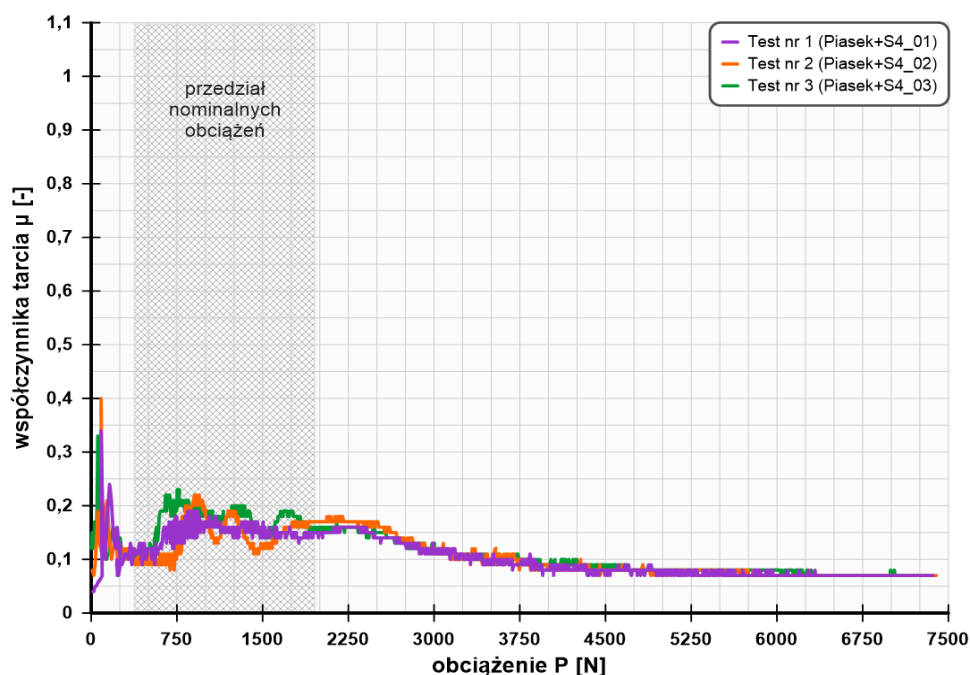
		Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
P_t	[N]	2880,00	2920,00	3280,00	3026,67	220,303
P_{oz}	[N]	7200,00	6675,00	7200,00	7025,00	303,109
p_{oz}	[N/mm ²]	739,56	643,65	750,63	711,28	58,833

Z tabeli 5.33 wynika iż dla wszystkich testów badawczych otrzymana wartość obciążenia zacierającego P_t zawiera się w przedziale od 2880 [N] do 3280 [N]. Wartość granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} dla testu nr 2 wyniosła 6675 [N], natomiast w przypadku testu nr 1 i nr 3 z uwagi na brak wystąpienia zjawiska zatarcia, przyjęto

maksymalne obciążenie węzła – 7200 [N]. Z kolei średnia wartość wyznaczonego granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 10 wynosi 711,28 [N/mm²].

Zestaw badawczy nr 11

Na rysunku 5.16 przedstawiono przebiegi współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , sporządzone na podstawie wyników, uzyskanych w trakcie trzech testów, w przypadku kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych oraz autorski środek smarujący mogący zostać zastosowany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.16. Wykres wartości współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , dla trzech testów wykonanych przy kompozycji badawczej nr 11 [opracowanie własne]

Porównując trzy przeprowadzone testy badawcze, można zauważyć iż miały one zbliżony charakter przebiegu. Natomiast wzrost współczynnika tarcia, przy zidentyfikowanym wyraźnym wzroście oporów tarcia, miał miejsce średnio przy obciążeniu 600 [N]. W każdym z przedstawionych testów nie wystąpiło zjawisko zatarcia węzła tarcia, dlatego też przyjęto obciążenie wynoszące 7200 [N] jako graniczne obciążenie zatarcia.

W tabeli 5.34 zestawiono wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia μ , uzyskane podczas każdego z trzech przeprowadzonych testów dla kompozycji badawczej nr 11, a także ich wartości średnie oraz odchylenie standardowe.

Tabela 5.34. Wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 11 [opracowanie własne]

	Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
Minimalny współczynnik tarcia	0,04	0,07	0,07	0,06	0,017
Maksymalny współczynnik tarcia	0,34	0,40	0,33	0,36	0,038
Średni współczynnik tarcia	0,10	0,11	0,11	0,11	0,006

W przypadku zestawu badawczego nr 10, minimalny współczynnik tarcia wynosi $\mu = 0,04$ i został uzyskany w trakcie testu nr 1. Z kolei maksymalny współczynnik tarcia wynoszący $\mu = 0,40$ zidentyfikowano w przebiegu testu nr 2. Natomiast wartość średnia współczynnika tarcia dla wszystkich przeprowadzonych testów wyniosła $\mu = 0,11$.

W tabeli 5.35 przedstawiono wyniki pomiarów średnic śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania trzech biegów testowych na powierzchniach kulek przy kompozycji badawczej nr 11.

Tabela 5.35. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 11 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_{sr}	S
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Test nr 1	Kulka nr 1	0,7	0,8	0,9	1,0	0,9	1,1	0,90	0,141
	Kulka nr 2	1,0	0,9	0,8	1,1	0,8	1,0	0,93	0,121
	Kulka nr 3	0,9	1,1	0,9	1,0	0,7	0,9	0,92	0,133
Test nr 2	Kulka nr 1	1,1	0,9	0,8	1,1	0,9	1,0	0,97	0,121
	Kulka nr 2	0,9	0,8	1,1	0,9	1,0	1,0	0,95	0,105
	Kulka nr 3	1,0	0,8	0,9	0,8	0,9	1,1	0,92	0,117
Test nr 3	Kulka nr 1	0,9	0,9	0,8	1,1	0,9	1,0	0,93	0,103
	Kulka nr 2	1,0	0,9	0,8	0,9	1,1	1,0	0,95	0,105
	Kulka nr 3	0,8	1,0	0,9	1,1	0,8	0,9	0,92	0,117

Z analizy tabeli 5.35 wynika, iż zakres średnic śladów wytarcia w przypadku kompozycji badawczej nr 11, zawiera się w przedziale od 0,7 [mm] do 1,1 [mm]. Z kolei wyznaczona wartość średnia wszystkich zmierzonych śladów wytarcia wynosi 0,93 [mm].

W tabeli 5.36 zestawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych trzech testów badawczych, wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} , a także obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 11.

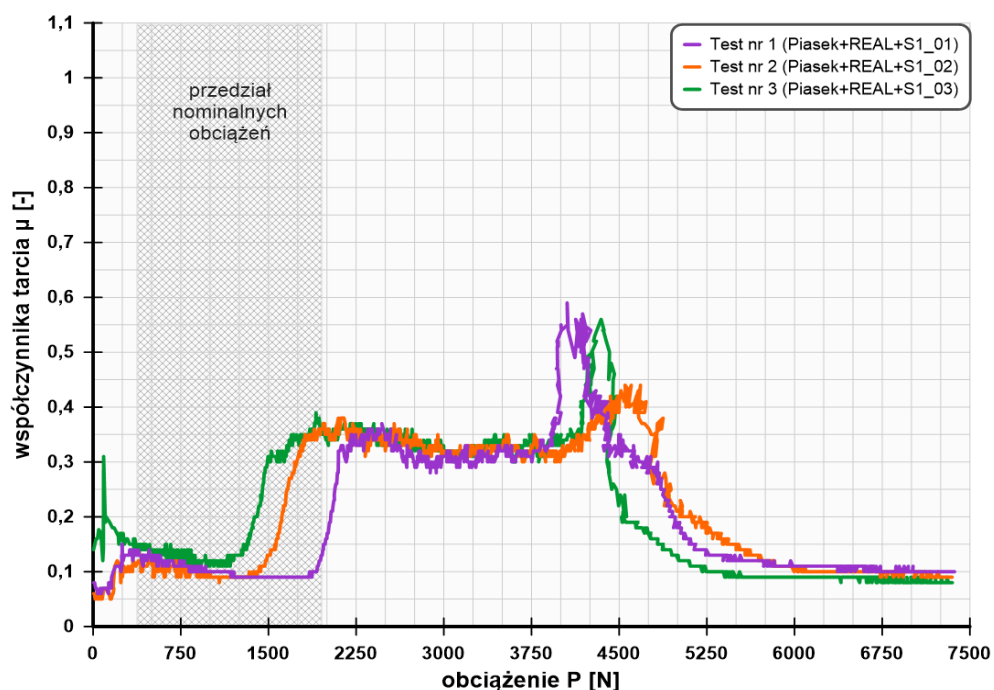
Tabela 5.36. Wartości obciążenia zacierającego P_t , granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 11 [opracowanie własne]

		Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
P_t	[N]	530,00	740,00	520,00	596,67	124,231
P_{oz}	[N]	7200,00	7200,00	7200,00	7200,00	0,000
p_{oz}	[N/mm ²]	4455,67	4197,43	4297,96	4317,02	130,173

Z analizy danych przedstawionych w tabeli 5.36 wynika, że dla wszystkich testów badawczych otrzymana wartość obciążenia zacierającego P_t zawiera się w przedziale od 520 [N] do 740 [N]. Jednakże z uwagi na niewystąpienie zjawiska zatarcia tego węzła tribologicznego, jako graniczne obciążenie zatarcia P_{oz} przyjęto maksymalne obciążenie węzła, czyli 7200 [N]. Średnia wartość wyznaczonego granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 11 wynosi 4317,02 [N/mm²].

Zestaw badawczy nr 12

Na rysunku 5.17 przedstawiono przebiegi współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , sporządzone na podstawie wyników, uzyskanych w trakcie trzech testów, w przypadku kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych, materiał pozyskany z torowiska tramwajowego oraz środek smarujący na bazie oleju lnianego wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.17. Wykres wartości współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , dla trzech testów wykonanych przy kompozycji badawczej nr 12 [opracowanie własne]

Z rysunku 5.17 wynika, że wszystkie trzy testy badawcze mają różny charakter przebiegu. Wyraźny wzrost oporów tarcia oznaczający przerwanie filmu smarowego

najszybciej osiągnięto w przypadku testu nr 3 (przy obciążeniu 1270 [N]), a najpóźniej w przypadku test nr 1 (przy obciążeniu 1840 [N]). Unieruchomienie węzła tarcia, oznaczającego zatarcie układu, nastąpiło w przypadku testu nr 1 przy obciążeniu 4150 [N] oraz testu nr 3 przy obciążeniu 4280 [N].

W tabeli 5.37 zestawiono wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia μ , uzyskane podczas każdego z trzech przeprowadzonych testów dla kompozycji badawczej nr 12, a także ich wartości średnie oraz odchylenie standardowe.

Tabela 5.37. Wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 12 [opracowanie własne]

	Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
Minimalny współczynnik tarcia	0,06	0,05	0,08	0,06	0,015
Maksymalny współczynnik tarcia	0,59	0,44	0,56	0,53	0,079
Średni współczynnik tarcia	0,20	0,22	0,21	0,21	0,010

W analizowanym przypadku minimalny współczynnik tarcia wynosi $\mu = 0,05$ i został uzyskany w trakcie testu badawczego nr 2. Natomiast maksymalny współczynnik tarcia wynoszący $\mu = 0,59$ zidentyfikowano w przebiegu testu nr 1. Z kolei wartość średnia współczynnika tarcia dla wszystkich przeprowadzonych testów z wykorzystaniem zestawu badawczego nr 12 wyniosła $\mu = 0,21$.

W tabeli 5.38 przedstawiono wyniki pomiarów średnic śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania trzech biegów testowych na powierzchniach kulek przy kompozycji badawczej nr 12.

Tabela 5.38. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 12 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_{sr}	S
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Test nr 1	Kulka nr 1	2,9	3,1	2,7	2,7	2,8	2,9	2,85	0,152
	Kulka nr 2	2,7	2,8	3,0	2,8	2,9	2,7	2,82	0,117
	Kulka nr 3	2,8	2,9	2,7	2,8	3,0	2,8	2,83	0,103
Test nr 2	Kulka nr 1	2,6	2,5	2,6	2,7	2,6	2,7	2,62	0,075
	Kulka nr 2	2,5	2,6	2,5	2,7	2,8	2,5	2,60	0,126
	Kulka nr 3	2,6	2,7	2,5	2,6	2,5	2,6	2,58	0,075
Test nr 3	Kulka nr 1	2,7	2,8	2,9	3,0	2,8	2,7	2,82	0,117
	Kulka nr 2	2,8	2,9	3,0	2,7	3,0	2,9	2,88	0,117
	Kulka nr 3	2,7	3,0	2,8	3,1	2,7	2,8	2,85	0,164

Analizując dane zawarte w tabeli 5.38 wynika, iż zakres średnic śladów wytarcia w przypadku kompozycji badawczej nr 12, dla testu nr 2 zawiera się w przedziale od 2,5 [mm] do 2,8 [mm]. Z uwagi na zatarcie węzła tarcia, w przypadku testów nr 1 oraz nr 3, średnice wytarcia na kulkach pomiarowych mieszczą się w przedziale od 2,7 [mm] do 3,1 [mm]. Z kolei wartość średnia wszystkich zmierzonych śladów wytarcia wynosi 2,76 [mm].

W tabeli 5.39 zestawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych trzech testów badawczych, wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} , a także obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 12.

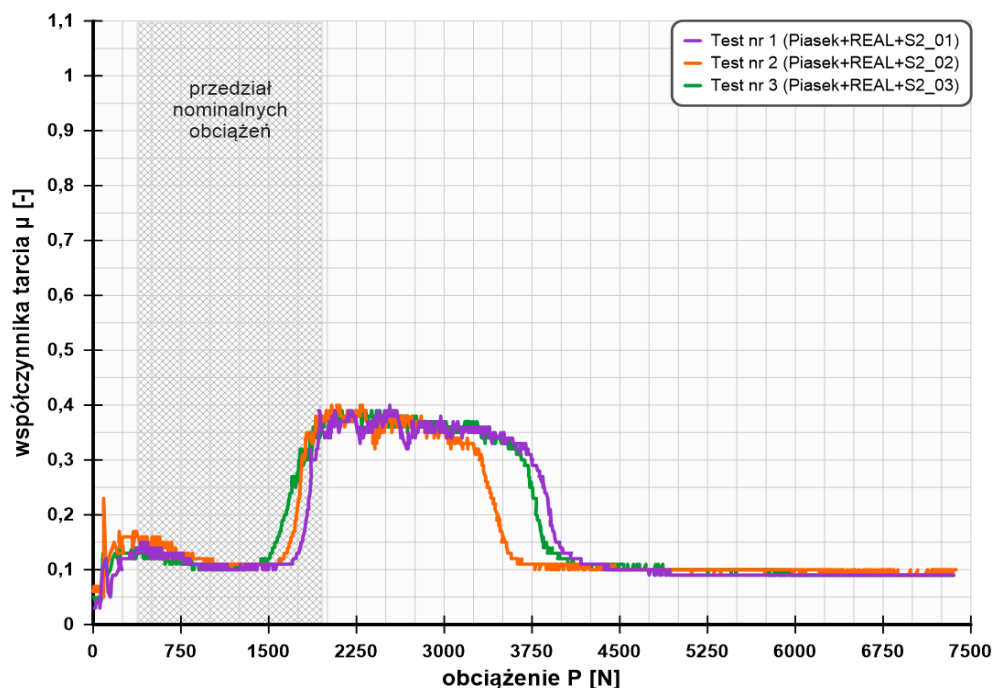
Tabela 5.39. Wartości obciążenia zacierającego P_t , granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 12 [opracowanie własne]

		Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
P_t	[N]	1840,00	1450,00	1270,00	1520,00	291,376
P_{oz}	[N]	4150,00	7200,00	4280,00	5210,00	1724,616
p_{oz}	[N/mm ²]	268,82	553,85	274,00	365,56	163,085

Z tabeli 5.39 wynika, iż dla wszystkich testów badawczych otrzymana wartość obciążenia zacierającego P_t zawiera się w przedziale od 1270 [N] do 1840 [N]. Z kolei wartość granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} dla testu nr 1 oraz nr 3 wyniosła kolejno 4150 [N] oraz 4280 [N]. W przypadku testu nr 2 z uwagi na brak wystąpienia zjawiska zatarcia, przyjęto maksymalne obciążenie węzła – 7200 [N]. Natomiast średnia wartość wyznaczonego granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 12 wynosi 365,56 [N/mm²].

Zestaw badawczy nr 13

Na rysunku 5.18 przedstawiono przebiegi współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , sporządzone na podstawie wyników, uzyskanych w trakcie trzech testów, w przypadku kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych, materiał pozyskany z torowiska tramwajowego oraz środek smarujący na bazie dwusiarczku molibdenu wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.18. Wykres wartości współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P, dla trzech testów wykonanych przy kompozycji badawczej nr 13 [opracowanie własne]

Porównując trzy przeprowadzone testy badawcze, można zauważyć iż miały one podobny charakter przebiegu. W każdym z analizowanych przypadków nie zidentyfikowano momentu wystąpienia zatarcia wężła tarcia, dlatego też jako graniczne obciążenie zatarcia przyjęto maksymalne obciążenie wężła w trakcie trwania testów, czyli 7200 [N]. Wyraźny wzrost oporów tarcia nastąpił przy obciążeniu średnio około 1600 [N].

W tabeli 5.40 zestawiono wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia μ , uzyskane podczas każdego z trzech przeprowadzonych testów dla kompozycji badawczej nr 13, a także ich wartości średnie oraz odchylenie standardowe.

Tabela 5.40. Wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 13 [opracowanie własne]

	Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
Minimalny współczynnik tarcia	0,03	0,05	0,04	0,04	0,010
Maksymalny współczynnik tarcia	0,40	0,40	0,39	0,40	0,006
Średni współczynnik tarcia	0,17	0,16	0,18	0,17	0,010

Minimalny współczynnik tarcia wynosi $\mu = 0,03$ i został uzyskany w trakcie testu badawczego nr 1. Natomiast maksymalny współczynnik tarcia wynoszący $\mu = 0,40$ zidentyfikowano w przebiegu testu nr 1 oraz nr 2. Z kolei wartość średnia współczynnika tarcia dla wszystkich przeprowadzonych testów z wykorzystaniem zestawu badawczego nr 13 wyniosła $\mu = 0,17$.

W tabeli 5.41 przedstawiono wyniki pomiarów średnic śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania trzech biegów testowych na powierzchniach kulek przy kompozycji badawczej nr 13.

Tabela 5.41. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 13 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d _{śr}	S
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Test nr 1	Kulka nr 1	1,7	1,8	1,7	2,0	1,9	1,8	1,82	0,117
	Kulka nr 2	1,8	2,0	1,8	1,9	1,8	1,9	1,87	0,082
	Kulka nr 3	1,9	1,8	1,9	1,8	2,0	1,7	1,85	0,105
Test nr 2	Kulka nr 1	2,0	1,9	1,8	1,7	1,8	2,0	1,87	0,121
	Kulka nr 2	1,9	1,8	2,0	1,8	1,7	1,9	1,85	0,105
	Kulka nr 3	1,7	2,0	1,9	1,9	1,8	2,0	1,88	0,117
Test nr 3	Kulka nr 1	1,9	1,8	2,0	1,8	2,0	1,9	1,90	0,089
	Kulka nr 2	2,0	1,7	1,8	2,0	1,9	1,7	1,85	0,138
	Kulka nr 3	1,8	1,9	1,7	1,8	2,0	1,8	1,83	0,103

Z analizy danych zawartych w tabeli 5.41 wynika, iż zakres średnic śladów wytarcia w przypadku kompozycji badawczej nr 13, zawiera się w przedziale od 1,7 [mm] do 2,0 [mm]. Z kolei wartość średnia wszystkich zmierzonych śladów wytarcia wynosi 1,86 [mm].

W tabeli 5.42 zestawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych trzech testów badawczych, wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} , a także obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 13.

Tabela 5.42. Wartości obciążenia zacierającego P_t , granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 13 [opracowanie własne]

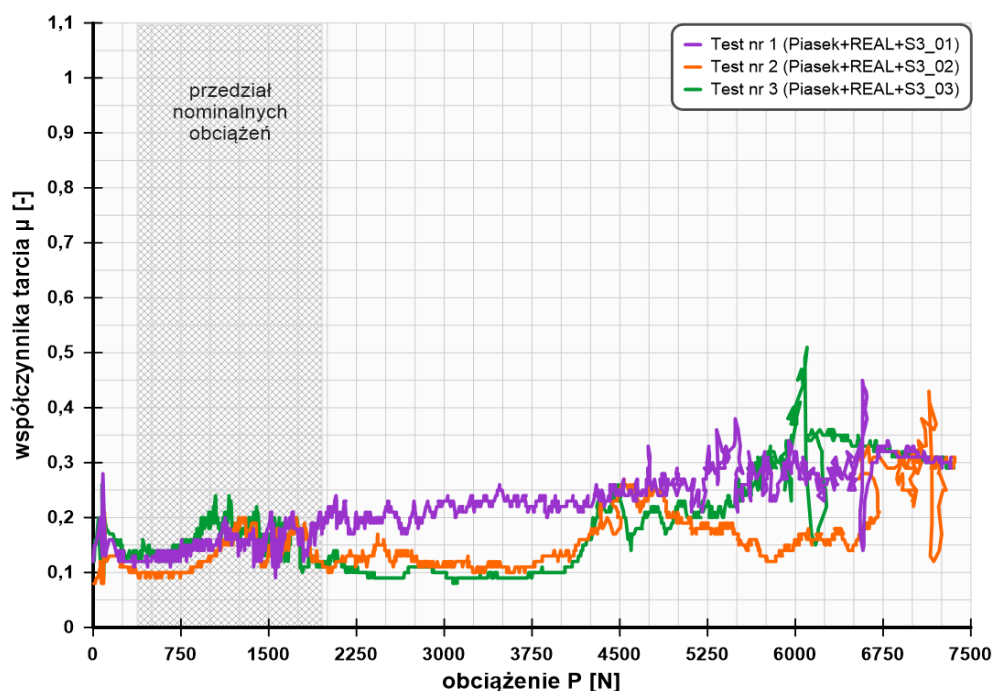
		Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
P_t	[N]	1740,00	1620,00	1480,00	1613,33	130,128
P_{oz}	[N]	7200,00	7200,00	7200,00	7200,00	0,000
p_{oz}	[N/mm ²]	1100,54	1074,49	1080,91	1085,31	13,570

Z tabeli 5.42 wynika, że dla wszystkich testów badawczych otrzymana wartość obciążenia zacierającego P_t zawiera się w przedziale od 1480 [N] do 1740 [N]. Natomiast z uwagi na niewystąpienie zjawiska zatarcia tego węzła, jako graniczne obciążenie zatarcia P_{oz} przyjęto maksymalne obciążenie węzła, czyli 7200 [N]. Średnia

wartość wyznaczonego granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 13 wynosi 1085,31 [N/mm²].

Zestaw badawczy nr 14

Na rysunku 5.19 przedstawiono przebiegi współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , sporządzone na podstawie wyników, uzyskanych w trakcie trzech testów, w przypadku kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych, materiał pozyskany z torowiska tramwajowego oraz stały środek smarujący w postaci sztyftu, który wykorzystywanych jest do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.19. Wykres wartości współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , dla trzech testów wykonanych przy kompozycji badawczej nr 14 [opracowanie własne]

Porównując trzy przeprowadzone testy badawcze, można zauważyć iż miały one różny charakter przebiegu. Wyraźny wzrost oporów tarcia oznaczający przerwanie filmu smarowego najszybciej osiągnięto w przypadku testu nr 1 (przy obciążeniu 530 [N]), a najpóźniej w przypadku test nr 3 (przy obciążeniu 760 [N]). Unieruchomieniem węzła tarcia następowało w przypadku tej kompozycji badawczej średnio przy obciążeniu około 6690 [N].

W tabeli 5.43 zestawiono wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia μ , uzyskane podczas każdego z trzech przeprowadzonych testów dla kompozycji badawczej nr 14, a także ich wartości średnie oraz odchylenie standardowe.

Tabela 5.43. Wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 14 [opracowanie własne]

	Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
Minimalny współczynnik tarcia	0,09	0,08	0,08	0,08	0,006
Maksymalny współczynnik tarcia	0,45	0,43	0,51	0,46	0,042
Średni współczynnik tarcia	0,23	0,16	0,19	0,19	0,035

Minimalny współczynnik tarcia wynosi $\mu = 0,08$ i został uzyskany w trakcie testu badawczego nr 2 oraz nr 3. Z kolei maksymalny współczynnik tarcia wynoszący $\mu = 0,51$ zidentyfikowano w przebiegu testu nr 3. Wartość średnia współczynnika tarcia dla wszystkich przeprowadzonych testów z wykorzystaniem zestawu badawczego nr 14 wyniosła $\mu = 0,19$.

W tabeli 5.44 przedstawiono wyniki pomiarów średnic śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania trzech biegów testowych na powierzchniach kulek przy kompozycji badawczej nr 14.

Tabela 5.44. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 14 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d ₁	d ₂	d ₃	d ₄	d ₅	d ₆	d _{śr}	S
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Test nr 1	Kulka nr 1	2,6	2,7	2,5	2,8	2,7	2,9	2,70	0,141
	Kulka nr 2	2,8	2,7	2,8	2,7	2,6	2,8	2,73	0,082
	Kulka nr 3	2,7	2,8	2,7	2,6	2,7	2,6	2,68	0,075
Test nr 2	Kulka nr 1	2,6	2,7	2,6	2,7	2,6	2,8	2,67	0,082
	Kulka nr 2	2,7	2,6	2,8	2,6	2,7	2,9	2,72	0,117
	Kulka nr 3	2,5	2,8	2,6	2,8	2,8	2,7	2,70	0,126
Test nr 3	Kulka nr 1	2,7	2,5	2,7	2,6	2,7	2,6	2,63	0,082
	Kulka nr 2	2,5	2,6	2,7	2,8	2,6	2,5	2,62	0,117
	Kulka nr 3	2,6	2,5	2,6	2,6	2,5	2,7	2,58	0,075

Z tabeli 5.44 wynika, iż zakres średnic śladów wytarcia w przypadku kompozycji badawczej nr 14, zawiera się w przedziale od 2,5 [mm] do 2,9 [mm]. Natomiast wartość średnia wszystkich zmierzonych śladów wytarcia wynosi 2,67 [mm].

W tabeli 5.45 zestawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych trzech testów badawczych, wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} , a także obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 14.

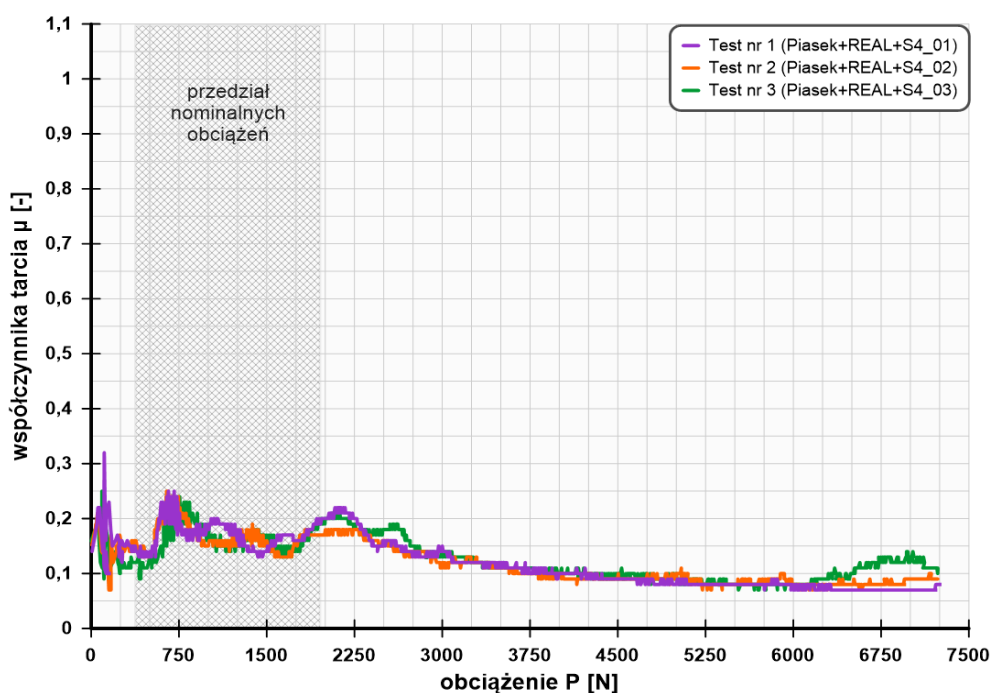
Tabela 5.45. Wartości obciążenia zacierającego P_t , granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 14 [opracowanie własne]

		Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
P_t	[N]	530,00	760,00	650,00	646,67	115,036
P_{oz}	[N]	6650,00	7090,00	6330,00	6690,00	381,576
p_{oz}	[N/mm ²]	472,40	507,82	482,79	487,67	18,207

Z danych wynika, iż dla wszystkich testów badawczych otrzymana wartość obciążenia zacierającego P_t zawiera się w przedziale od 530 [N] do 760 [N], natomiast graniczne obciążenie zatarcia P_{oz} w przedziale od 6330 [N] do 7090 [N]. Z kolei średnia wartość wyznaczonego granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 14 wynosi 487,67 [N/mm²].

Zestaw badawczy nr 15

Na rysunku 5.20 przedstawiono przebiegi współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , sporządzone na podstawie wyników, uzyskanych w trakcie trzech testów, w przypadku kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych, materiał pozyskany z torowiska tramwajowego oraz autorski środek smarujący, mogący zostać zastosowany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.20. Wykres wartości współczynnika tarcia μ w funkcji obciążenia P , dla trzech testów wykonanych przy kompozycji badawczej nr 15 [opracowanie własne]

Porównując trzy przeprowadzone testy badawcze, można zauważyć iż miały one podobny charakter przebiegu. Natomiast wzrost współczynnika tarcia, przy zidentyfikowanym wyraźnym wzroście oporów tarcia, miał miejsce przy obciążeniu

510 [N]. W każdym z przedstawionych testów nie wystąpiło zjawisko zatarcia, dlatego też jako graniczne obciążenie zatarcia przyjęto maksymalne obciążenie wężła w trakcie trwania testów, czyli 7200 [N].

W tabeli 5.46 zestawiono wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia μ , uzyskane podczas każdego z trzech przeprowadzonych testów dla kompozycji badawczej nr 15, a także ich wartości średnie oraz odchylenie standardowe.

Tabela 5.46. Wartości minimalnego, maksymalnego i średniego współczynnika tarcia dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 15 [opracowanie własne]

	Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
Minimalny współczynnik tarcia	0,07	0,08	0,07	0,07	0,006
Maksymalny współczynnik tarcia	0,32	0,27	0,25	0,28	0,036
Średni współczynnik tarcia	0,12	0,12	0,13	0,12	0,006

Minimalny współczynnik tarcia, wynoszący $\mu = 0,07$, uzyskano w trakcie testu badawczego nr 1 oraz nr 3. Z kolei maksymalny współczynnik tarcia wynoszący $\mu = 0,32$ zidentyfikowano w przebiegu testu nr 1. Natomiast średnia wartość współczynnika tarcia dla wszystkich przeprowadzonych testów z wykorzystaniem zestawu badawczego nr 15 wyniosła $\mu = 0,12$.

W tabeli 5.47 przedstawiono wyniki pomiarów średnic śladów wytarcia, powstałych w trakcie trwania trzech biegów testowych na powierzchniach kulek przy kompozycji badawczej nr 15.

Tabela 5.47. Średnice śladu wytarcia uzyskane w trakcie trzech testów przy kompozycji badawczej nr 15 [opracowanie własne]

		Średnica śladu wytarcia						Wartość średnia średnicy śladu wytarcia	Odchylenie standardowe
		d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	$d_{\text{śr}}$	S
		[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[-]
Test nr 1	Kulka nr 1	0,9	1,1	1,2	0,9	1,1	0,9	1,02	0,133
	Kulka nr 2	1,0	0,9	1,1	1,0	0,9	0,9	0,97	0,082
	Kulka nr 3	0,9	1,1	0,9	0,8	1,2	1,1	1,00	0,155
Test nr 2	Kulka nr 1	1,1	1,0	1,2	1,1	1,0	1,0	1,07	0,082
	Kulka nr 2	1,3	1,1	0,9	1,0	1,2	1,1	1,10	0,141
	Kulka nr 3	1,1	1,0	1,2	0,9	1,3	1,0	1,08	0,147
Test nr 3	Kulka nr 1	0,9	1,1	0,8	1,1	1,1	0,9	0,98	0,133
	Kulka nr 2	1,2	1,0	1,1	0,9	1,2	1,0	1,07	0,121
	Kulka nr 3	1,0	0,9	1,2	1,1	1,0	0,9	1,02	0,117

Z analizy danych zawartych w tabeli 5.47 wynika, iż zakres średnic śladów wytarcia w przypadku kompozycji badawczej nr 15, zawiera się w przedziale od 0,8 [mm] do 1,3 [mm]. Z kolei wartość średnia wszystkich zmierzonych śladów wytarcia wynosi 1,03 [mm].

W tabeli 5.48 zestawiono otrzymane w trakcie przeprowadzonych trzech testów badawczych, wartości obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} , a także obliczone wartości granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 15.

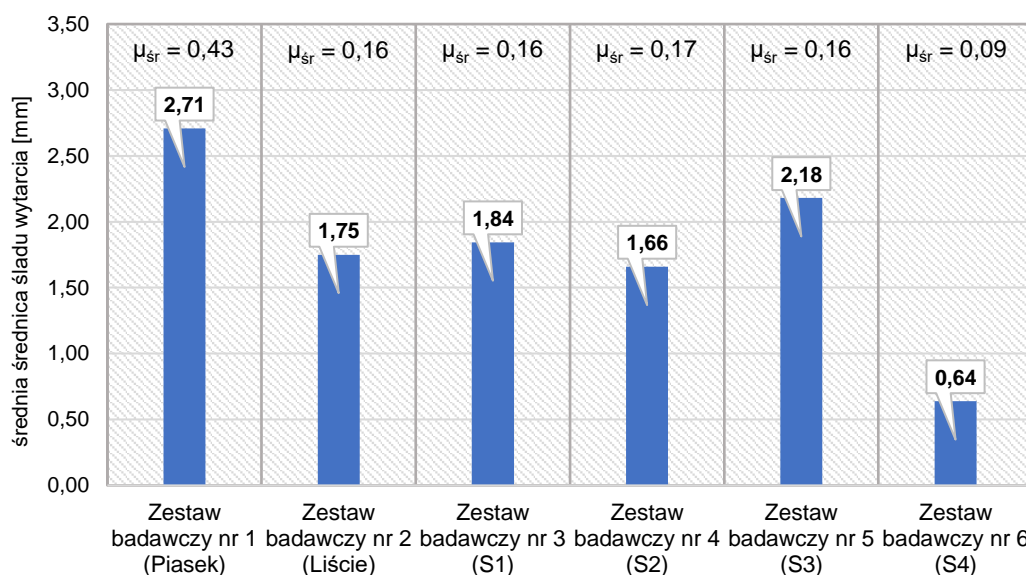
Tabela 5.48. Wartości obciążenia zacierającego P_t , granicznego obciążenia zatarcia P_{oz} i granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla trzech testów przy kompozycji badawczej nr 15 [opracowanie własne]

		Test nr 1	Test nr 2	Test nr 3	Średnia wartość	Odchylenie standardowe
P_t	[N]	530,00	520,00	480,00	510,00	26,458
P_{oz}	[N]	7200,00	7200,00	7200,00	7200,00	0,000
p_{oz}	[N/mm ²]	3785,95	3190,15	3582,99	3519,70	302,898

Z tabeli 5.48 wynika, że dla wszystkich testów badawczych otrzymana wartość obciążenia zacierającego P_t zawiera się w przedziale od 480 [N] do 530 [N]. Natomiast z uwagi na niewystąpienie zjawiska zatarcia tego węzła, jako graniczne obciążenie zatarcia P_{oz} przyjęto maksymalne obciążenie węzła, czyli 7200 [N]. Średnia wartość wyznaczonego granicznego nacisku zatarcia p_{oz} dla kompozycji badawczej nr 15 wynosi 3519,70 [N/mm²].

Analiza wyników badań modelowych kompozycji badawczych na testerze tribologicznym

Przeprowadzone badania właściwości tribologicznych, z wykorzystaniem modelowego skojarzenia badawczego, pozwoliły wyznaczyć wartości zużycia, a także współczynnika tarcia w zależności od obciążenia. Umożliwiło to, w sposób pośredni, ocenę wpływu wybranych modyfikatorów tarcia na współpracę elementów w układzie koło-szyna. W rezultacie na kulkach pomiarowych zidentyfikowano ślady wytarcia, powstałe w trakcie trwania biegów testowych badań tribologicznych. Na rysunku 5.21 zestawiono średnie wartości wytarć, powstałych podczas badań z wykorzystaniem modelowych kompozycji badawczych od 1 do 6.



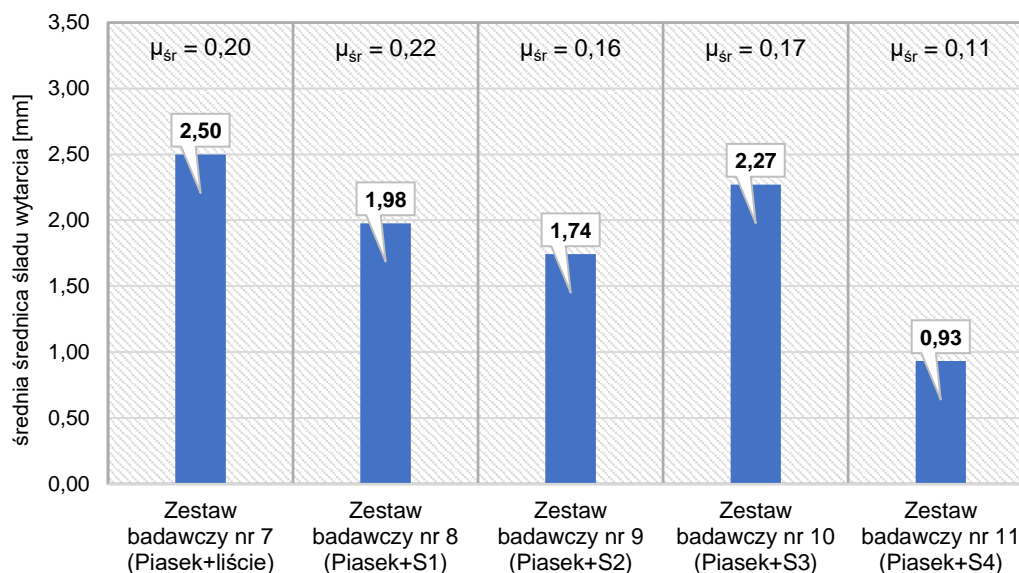
Rys. 5.21. Zestawienie średnich średnic śladów wytarcia powstałych na kulkach pomiarowych w trakcie trzech biegów badawczych z wykorzystaniem zestawów badawczych od 1 do 6 [opracowanie własne]

Z przeprowadzonych badań wynika, iż w przypadku modelowych kompozycji badawczych, w skład których wchodziły m.in. substancje smarujące (od S1 do S4), najlepszy rezultat uzyskano przy zastosowaniu autorskiego środka smarującego (S4), gdzie w trakcie przeprowadzonych prób badawczych średnie zużycie wyniosło 0,64 [mm], przy średnim współczynniku tarcia wynoszącym 0,09. Biorąc pod uwagę pozostałe kompozycje badawcze, w skład których wchodziły głównie komercyjne, zalecane przez producentów wagonów tramwajowych substancje smarujące obrzeża kół jezdnych, najlepsze rezultaty uzyskiwał środek na bazie dwusiarczku molibdenu (S2), ze średnim zużyciem wynoszącym 1,66 [mm]. Natomiast największe średnie zużycie wynoszące 2,18 [mm] zidentyfikowano w badaniu stałego środka smarującego w postaci sztyftu oznaczonego jako S3. Średnie współczynniki tarcia dla komercyjnych substancji smarujących (od S1 do S3) mieściły się w przedziale od 0,16 do 0,17.

Największe średnie średnice wytarć wynoszące 2,71 [mm], przy średnim współczynniku tarcia 0,43 uzyskano przy kompozycji badawczej zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych. Odmienne rezultaty

były przy kompozycji badawczej zawierającej mokre liście, gdzie średnie średnice wytarcia wyniosły 1,75 [mm], przy wartości średniej współczynnika tarcia wynoszącej 0,16.

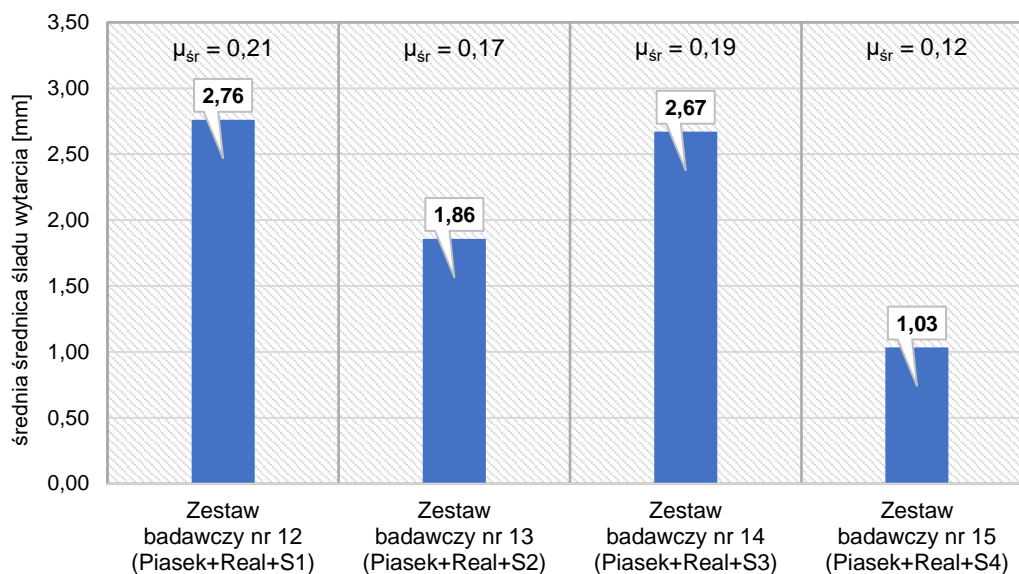
Na rysunku 5.22 zestawiono średnie średnice śladów wytarcia, które powstały na kulkach pomiarowych w trakcie badań tribologicznych, z wykorzystaniem modelowych kompozycji badawczych od 7 do 11.



Rys. 5.22. Zestawienie średnich średnic śladów wytarcia powstałych na kulkach pomiarowych w trakcie trzech biegów badawczych z wykorzystaniem zestawów badawczych od 7 do 11 [opracowanie własne]

Dla modelowych kompozycji badawczych, do których dodano piasek kwarcowy, celem uzyskania warunków występujących w obszarze styku koło-szyrna w trakcie normalnej eksploatacji, wysoką efektywnością działania wykazał się również autorski środek smarujący (Piasek+S4), gdzie w trakcie przeprowadzonych prób badawczych średnie zużycie wyniosło 0,93 [mm], przy średniej wartości współczynnika tarcia nieprzekraczającej 0,11. Z kolei bardzo wysoką skuteczność, spośród kompozycji badawczych zawierających komercyjne, powszechnie stosowane przez operatorów komunikacji miejskiej, substancje smarujące oraz piasek kwarcowy, uzyskał środek na bazie dwusiarczku molibdenu (Piasek+S2), ze średnim zużyciem wynoszącym 1,74 [mm]. Natomiast największe średnie zużycie wynoszące 2,27 [mm] zidentyfikowano w przypadku stałego środka smarującego, czyli w postaci sztyftu (Piasek+S3). Średnie współczynniki tarcia dla komercyjnych substancji smarujących (od Piasek+S1 do Piasek+S3) mieściły się w przedziale od 0,16 do 0,22.

Na rysunku 5.23 zestawiono średnie średnice śladów wytarcia, które powstały na kulkach pomiarowych w trakcie badań tribologicznych, z wykorzystaniem modelowych kompozycji badawczych od 12 do 15, które odzwierciedlają rzeczywiste warunki eksploatacji na modelowym skojarzeniu ciernym.



Rys. 5.23. Zestawienie średnich średnic śladów wytarcia powstałych na kulkach pomiarowych w trakcie trzech biegów badawczych z wykorzystaniem zestawów badawczych od 12 do 15 [opracowanie własne]

Przy modelowych kompozycjach badawczych, reprezentatywnych dla warunków eksploatacji, zawierających w składzie piasek kwarcowy oraz mieszaninę zanieczyszczeń środowiskowych, w tym środków smarnych stosowanych w pojazdach oraz wykorzystywanych w smarownicach torowych (Real), najlepszy rezultat uzyskano dla autorskiego środka smarującego (Piasek+Real+S4), gdzie w trakcie przeprowadzonych prób badawczych średnie zużycie wyniosło 1,03 [mm], przy średnim współczynniku tarcia wynoszącym 0,12. Większe wartości zużycia otrzymano przy kompozycjach badawczych, zawierających komercyjne środki smarujące, zalecane przez producentów taboru tramwajowego. Spośród nich najlepsze wyniki uzyskał środek na bazie dwusiarczku molibdenu (Piasek+Real+S2), ze średnim zużyciem wynoszącym 1,86 [mm]. Z kolei największe średnie zużycie wynoszące 2,76 [mm] zmierzono dla środka smarującego na bazie oleju lnianego, oznaczonego jako Piasek+Real+S1. Średnie współczynniki tarcia dla komercyjnych substancji smarujących (od Piasek+Real+S1 do Piasek+Real+S3) uzyskano w zakresie od 0,17 do 0,21.

Przeprowadzone badania przy kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, wykorzystywany w piasecznicach wagonów tramwajowych, potwierdzają skuteczność jego stosowania w sytuacjach, kiedy dochodzi do utraty przyczepności, gdyż pozwala to na zachowanie odpowiednich właściwości trakcyjnych. Wpływa to znacząco na uzyskanie właściwego wskaźnika bezpieczeństwa prowadzenia wagonów tramwajowych w układzie torowym. Jednakże stosowanie piasku kwarcowego skutkuje intensyfikacją zużycia, zachodzącego na powierzchniach tocznych elementów współpracujących. Stąd też poszukuje się rozwiązań, pozwalających na precyzyjną aplikację piasku przez piasecznice w odpowiedniej ilości, tym samym uzyskując większą trwałość elementów układu koło-szyna. Z kolei wyniki otrzymane dla kompozycji badawczej nr 2 pozwalają jednoznacznie stwierdzić, iż mokre liście

zalegające na torowisku tramwajowym, negatywnie wpływają na właściwości trakcyjne pojazdu poprzez obniżenie współczynnika tarcia pomiędzy powierzchnią toczną koła jezdnego, a powierzchnią toczną główki szyny. Skutkuje to zmniejszeniem przyczepności, co w konsekwencji prowadzi do wydłużenia drogi hamowania, jak również występowania zjawiska rolowania kół podczas rozruchu wagonu tramwajowego, wpływając tym samym negatywnie na trwałość elementów skojarzonych w układzie koło-szyna.

Badania środków smarujących, stosowanych do smarowania obrzeży kół jezdnych (od S1 do S4), potwierdzają zasadność ich stosowania ze względu na ograniczenie zużycia występującego pomiędzy elementami współpracującymi. Jednakże najlepsze wyniki uzyskano w przypadku autorskiego środka smarującego (S4), przy którym w porównaniu do komercyjnych substancji smarujących, osiągnięto najmniejsze średnice śladów wytarcia (2,6-krotnie w stosunku do S2, 2,9-krotnie w stosunku do S1 oraz aż 3,4-krotnie w stosunku do S3).

Dodanie piasku kwarcowego do kompozycji badawczych, zawierających substancje smarujące, skutkowało we wszystkich przypadkach zwiększeniem jednostkowego zużycia. Średnice śladów wytarcia na kulkach pomiarowych dla środków smarujących S1, S2 oraz S3 wzrosły o około 5%, natomiast w przypadku autorskiego środka smarującego S4, aż o 45%. Zanieczyszczenie piaskiem kwarcowym, zestawu badawczego, zawierającego mokre liście, skutkowało zwiększeniem zużycia powstałego na powierzchniach kulek pomiarowych o około 40%.

Podobnie podczas badań modelowych z udziałem kompozycji badawczych, zawierających w składzie piasek kwarcowy oraz mieszaninę zanieczyszczeń środowiskowych, w tym środków smarnych (Real), które odzwierciedlają poligonowe warunki eksploatacji, zaobserwowano wzrost jednostkowego zużycia. Średnice śladów wytarcia na kulkach pomiarowych dla kompozycji badawczej Piasek+Real+S1 wzrosły o 50% w stosunku do kompozycji badawczej S1, dla kompozycji badawczej Piasek+Real+S2 wzrosły o 12% w stosunku do kompozycji badawczej S2, natomiast dla kompozycji badawczej Piasek+Real+S3 wzrosły o 23% w stosunku do kompozycji badawczej S3. W przypadku autorskiego środka smarującego Piasek+Real+S4 średnice śladów wytarcia na kulkach pomiarowych wzrosły aż o 60%. Mimo to środek ten nadal charakteryzuje się zużyciem mniejszym aż o 45%, w stosunku do najlepszego komercyjnego środka smarującego.

Autorska propozycja substancji smarującej we wszystkich wariantach, przeprowadzonych badań (bez zanieczyszczeń, jak również z zanieczyszczeniami), oscylowała w granicach, zalecanej przez opracowania naukowe, wartości współczynnika tarcia na obrzeżu koła jezdnego, która powinna wynosić nie więcej niż 0,1. Utrzymanie tej wartości w odpowiednim zakresie ogranicza występowanie niekorzystnego zjawiska, jakim jest wspinanie się obrzeża koła wagonu tramwajowego na główkę szyny, co w konsekwencji skutkować będzie ograniczeniem nadmiernego zużycia współpracujących elementów w układzie koło-szyna.

5.4. Analiza struktury geometrycznej śladów wytarcia powstałych na kulkach pomiarowych

Po wykonaniu badań tribologicznych na testerze T-02U, aby określić zmiany mikrostruktury powierzchni tarcia, przeprowadzono analizę struktury geometrycznej śladów wytarcia, powstałych na kulkach pomiarowych w trakcie testów z wykorzystaniem wszystkich kompozycji badawczych. W tym celu wykorzystano mikroskop cyfrowy Keyence serii VHX-7000 (rys. 5.24) wraz z zintegrowanym oprogramowaniem VHX-H5M do pomiaru chropowatości. Pozwoliło to określić wpływ modyfikatorów tarcia na powierzchniach jednorodnych kulek pomiarowych oraz dokonać oceny śladów wytarcia wraz z identyfikacją profilu chropowatości.



Rys 5.24. Mikroskop cyfrowy serii VHX-7000, składający się m.in. z monitora, modułu mikroskopu z zautomatyzowanym stolikiem oraz soczewek optycznych [124]

Mikroskop cyfrowy serii VHX-7000 umożliwia przeprowadzanie badań w zakresie powiększeń od x5 do x6000, z wysoką dokładnością w rozdzielczości 4K, która pozwala na precyzyjny pomiar jakości powierzchni oraz analizę pod kątem pomiaru wad, mikropęknięć i porowatości [125]. Urządzenie to wyposażone jest w pełni automatyczny stół, umożliwiający wykonywanie skanów powierzchni obiektów o wymiarach nieprzekraczających 100x100 [mm] oraz maksymalnej wadze 5 [kg], a także ruchomą głowicę pomiarową, która daje możliwość badania obiektów, zlokalizowanych poza stołem (w tym przypadku zakres powiększeń wynosi x20 – x200). Urządzenie to skanuje powierzchnię danego materiału, jednocześnie zbierając informacje o kształcie i chropowatości powierzchni, a następnie tworzy obraz optyczny. Oprogramowanie mikroskopu pozwala na wykonywanie zdjęć w trzech wymiarach techniką mozaiki, co umożliwia dokonywanie pomiarów (np. profilu powierzchni), a także na szczegółową analizę obrazu m.in. na liczenie ziaren struktury materiału rodzimego [124].

Przed przystąpieniem do analizy struktur geometrycznych na mikroskopie optycznym, kulki pomiarowe odpowiednio przygotowano tzn. dokładnie oczyszczono

oraz ponumerowano. Kolejno kulki z każdego testu badawczego (4 kulki pomiarowe), umieszczono w specjalnie przygotowanej szynie (rys. 5.25), umożliwiającej ich stabilizację, co zapewniło powtarzalność oraz wiarygodność otrzymanych wyników.

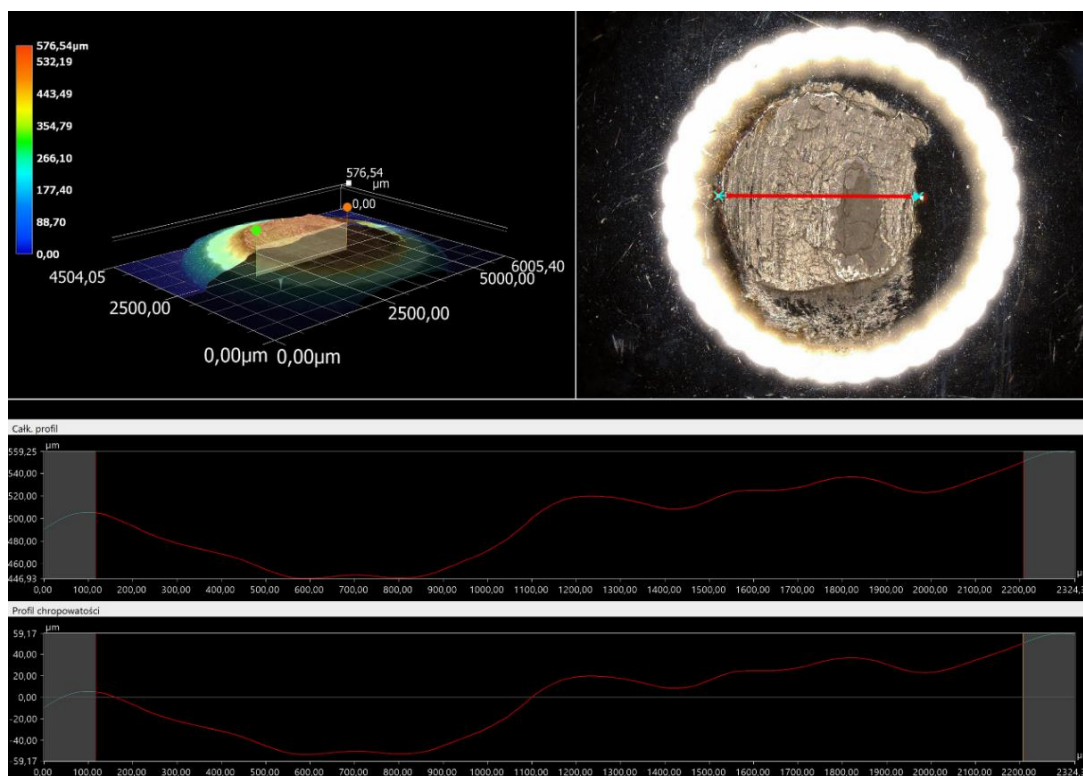


Rys 5.25. Kulki pomiarowe przygotowane do badań na mikroskopie cyfrowym [źródło własne]

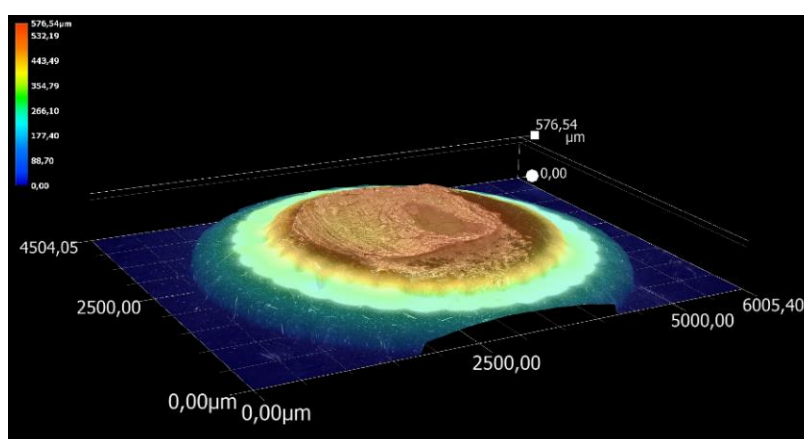
Wszystkie w ten sposób przygotowane próbki zostały poddane analizie optycznej na mikroskopie cyfrowym VHX-7000, przy 50-krotnym powiększeniu. W wyniku przeprowadzonej analizy uzyskano wartości charakterystycznych cech śladów wytarcia m.in. profilu powierzchni 2D (R_a , czyli średnią arytmetyczną rzędnych profilu chropowatości oraz R_z , czyli maksymalną wysokość profilu chropowatości), a także profilu powierzchni 3D (S_a , czyli średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia, S_z , czyli maksymalną wysokość profilu 3D oraz S_{ku} , czyli współczynnik skupienia rozkładu wysokości topografii powierzchni). W pracy przedstawiono analizy struktur geometrycznych śladów wytarc, powstałych na kulkach pomiarowych w trakcie testów z wykorzystaniem wszystkich zestawów badawczych, tylko dla wybranych, najbardziej reprezentatywnych kulek pomiarowych (jedna kulka górna oraz jedna z trzech kulek dolnych danego testu badawczego).

Zestaw badawczy nr 1

Na rysunkach 5.26 oraz 5.27 zaprezentowano obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych.



Rys. 5.26. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 1 [opracowanie własne]



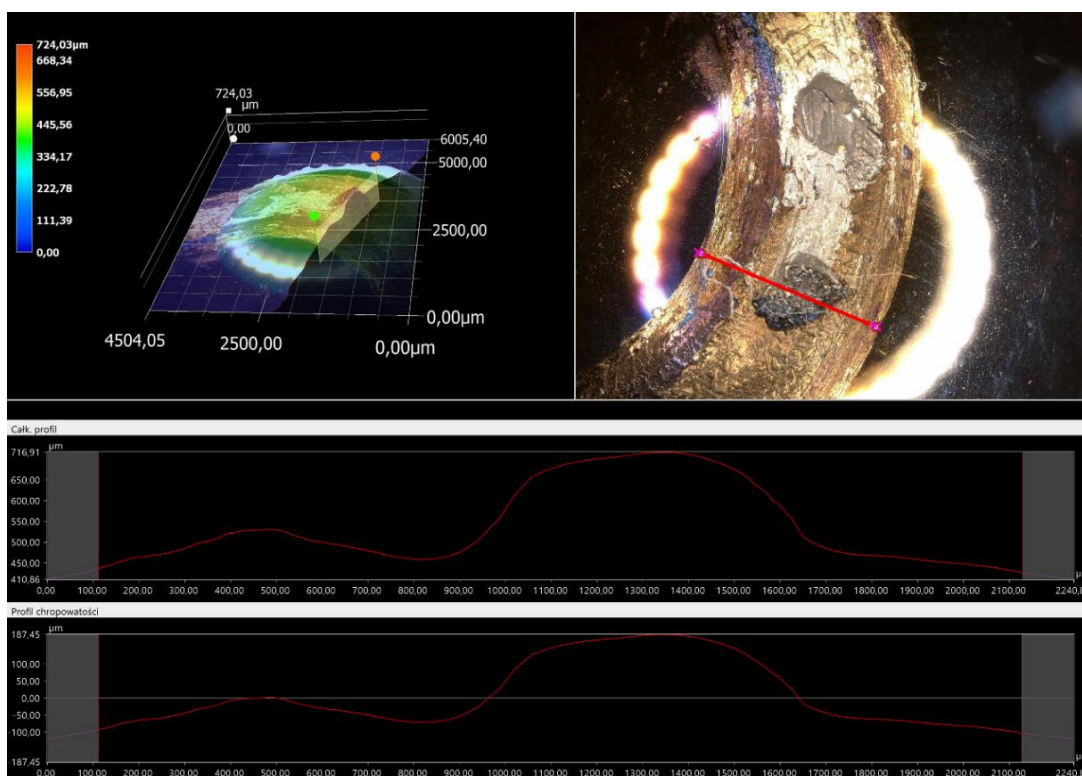
Rys. 5.27. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 1 [opracowanie własne]

W tabeli 5.49 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku dolnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 1.

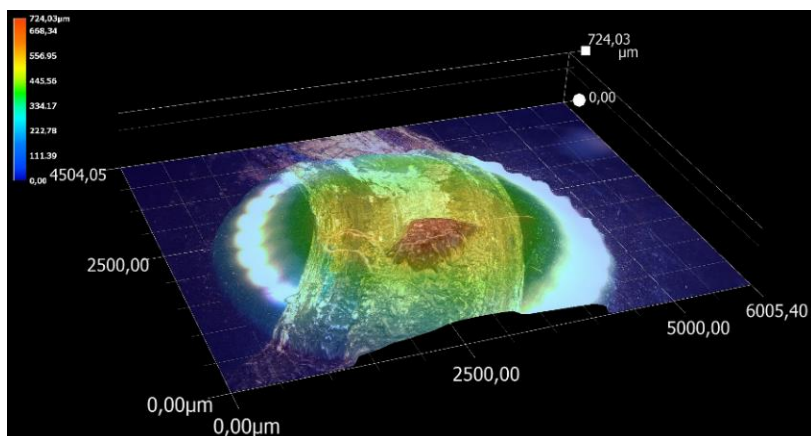
Tabela 5.49. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	28,96	μm	Sa	27,72	μm
Rz	103,11	μm	Sz	155,23	μm
Rp	49,96	μm	Sq	33,49	μm
Rv	53,15	μm	Ssk	-0,33	–
Rc	–	μm	Sku	2,31	–
Rt	103,46	μm	Sp	64,10	μm
Rq	32,49	μm	Sv	91,13	μm
Rsk	-0,60	–	Rozmiar obszaru	5839863,86	μm ²
Rku	1,73	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,13	–			
Długość próbkow.	2090,65	μm			

Na rysunkach 5.28 oraz 5.29 przedstawiono obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych.



Rys. 5.28. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 1 [opracowanie własne]



Rys. 5.29. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 1 [opracowanie własne]

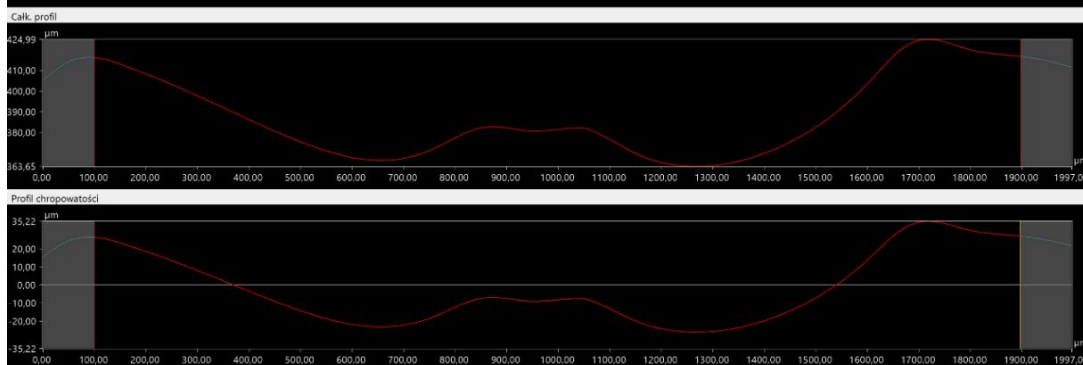
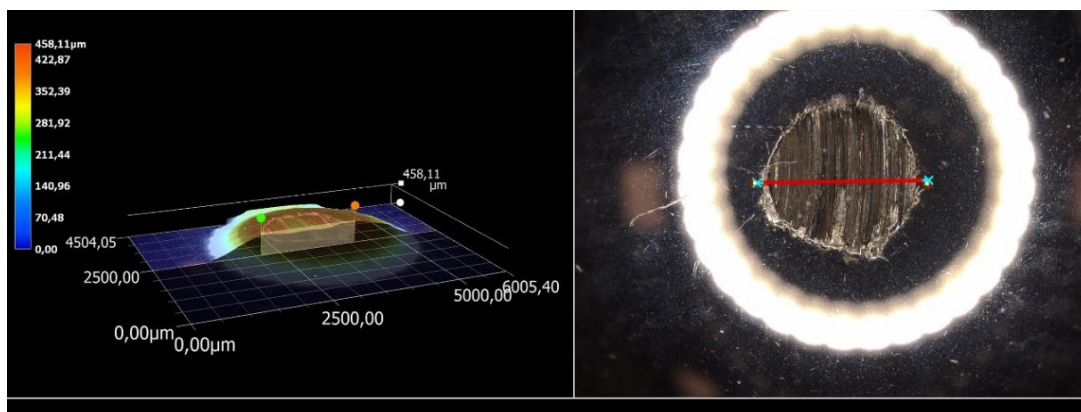
W tabeli 5.50 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku górnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 1.

Tabela 5.50. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

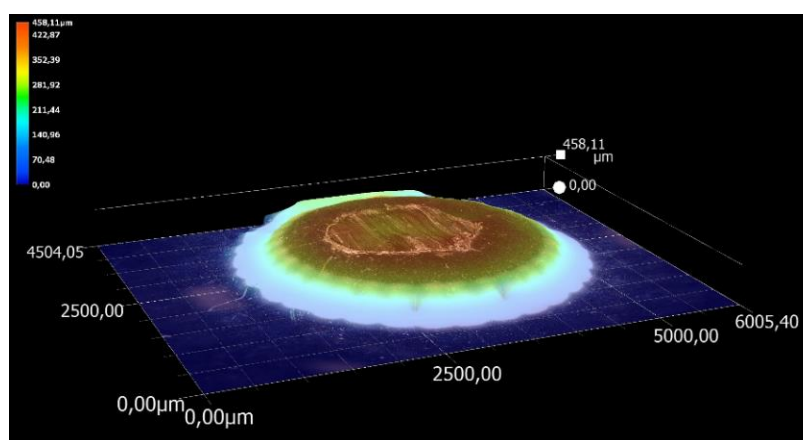
Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	80,00	μm	Sa	52,34	μm
Rz	289,13	μm	Sz	496,00	μm
Rp	187,45	μm	Sq	77,43	μm
Rv	101,68	μm	Ssk	1,13	–
Rc	257,94	μm	Sku	5,64	–
Rt	289,54	μm	Sp	281,07	μm
Rq	97,17	μm	Sv	214,93	μm
Rsk	1,13	–	Rozmiar obszaru	4382454,57	μm ²
Rku	2,38	–			
Rsm	1136,49	μm			
Rdq	0,52	–			
Długość próbkow.	2015,53	μm			

Zestaw badawczy nr 2

Na rysunkach 5.30 oraz 5.31 zaprezentowano obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej mokre liście, które w porze jesiennej zalegają na szynach, po których poruszają się wagony tramwajowe.



Rys. 5.30. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 2 [opracowanie własne]



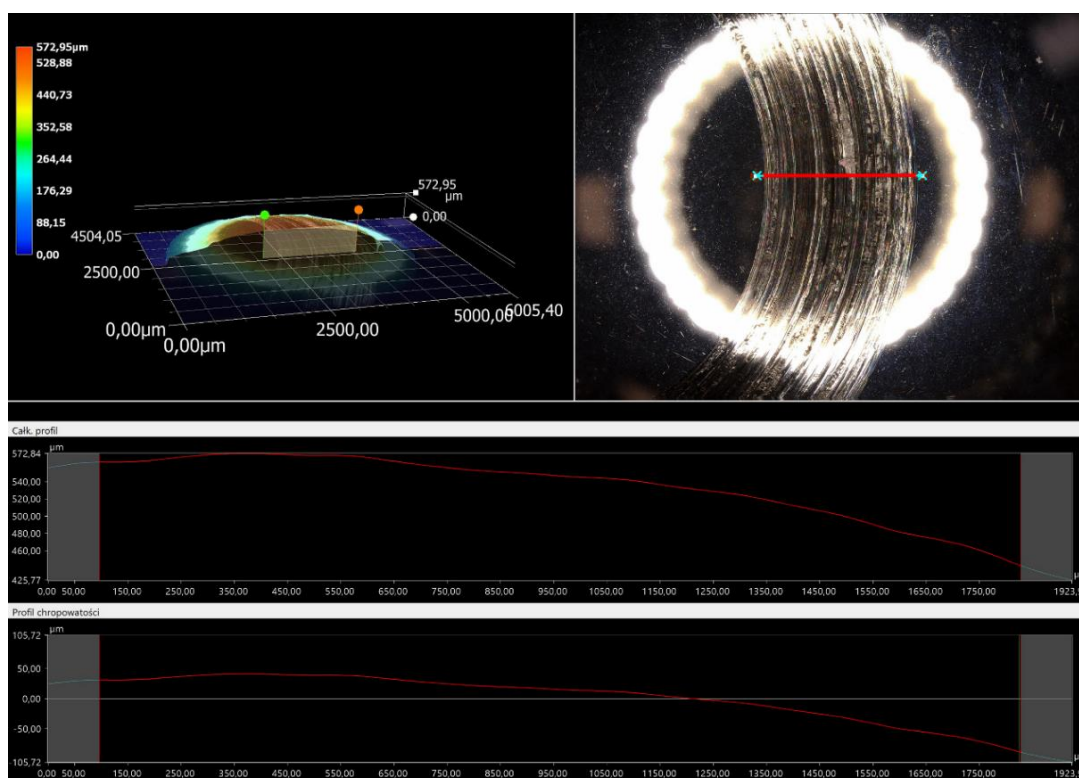
Rys. 5.31. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 2 [opracowanie własne]

W tabeli 5.51 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku dolnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 2.

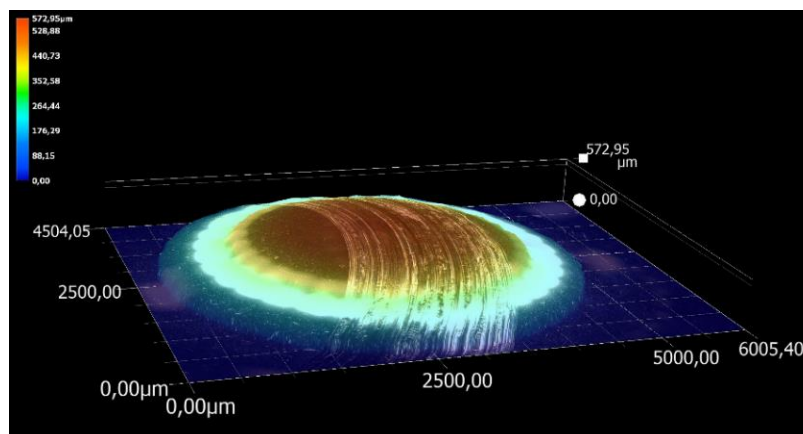
Tabela 5.51. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	17,19	μm	Sa	22,52	μm
Rz	61,34	μm	Sz	121,40	μm
Rp	35,22	μm	Sq	27,41	μm
Rv	26,12	μm	Ssk	-0,15	–
Rc	–	μm	Sku	2,45	–
Rt	61,34	μm	Sp	57,57	μm
Rq	19,36	μm	Sv	63,83	μm
Rsk	0,21	–	Rozmiar obszaru	2966508,64	μm ²
Rku	1,74	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,11	–			
Długość próbkow.	1796,74	μm			

Na rysunkach 5.32 oraz 5.33 przedstawiono obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej mokre liście, które w porze jesiennej zalegają na szynach, po których poruszają się wagony tramwajowe.



Rys. 5.32. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 2 [opracowanie własne]



Rys. 5.33. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 2 [opracowanie własne]

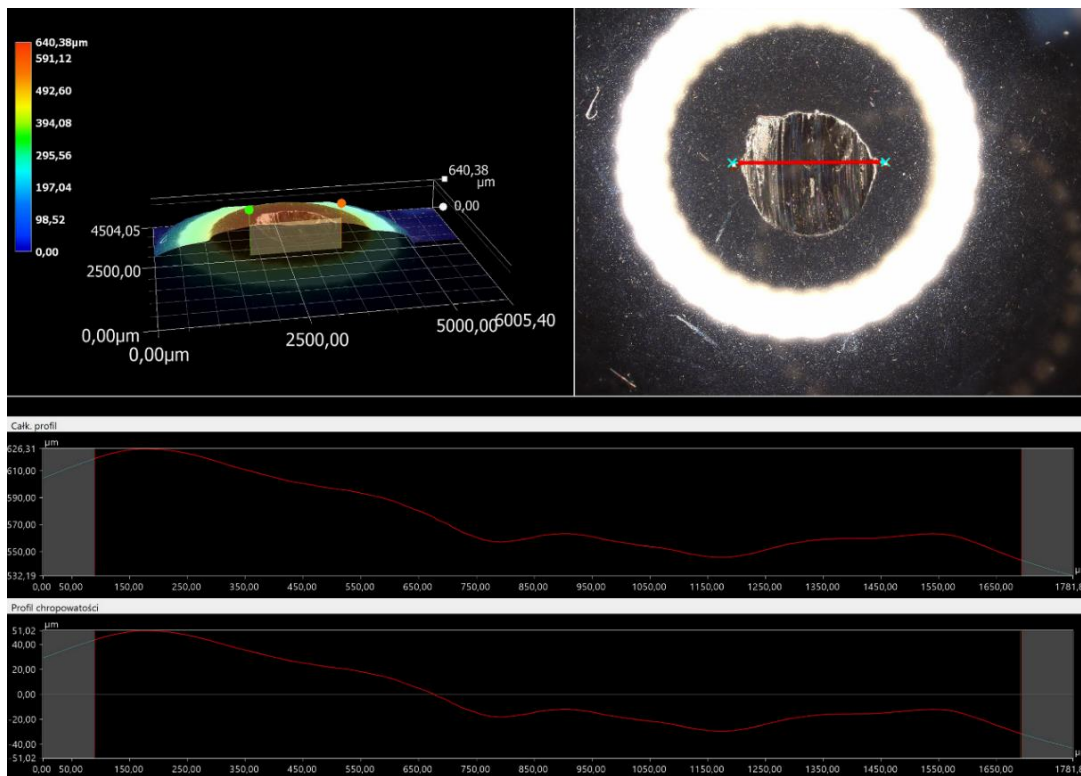
W tabeli 5.52 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku górnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 2.

Tabela 5.52. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

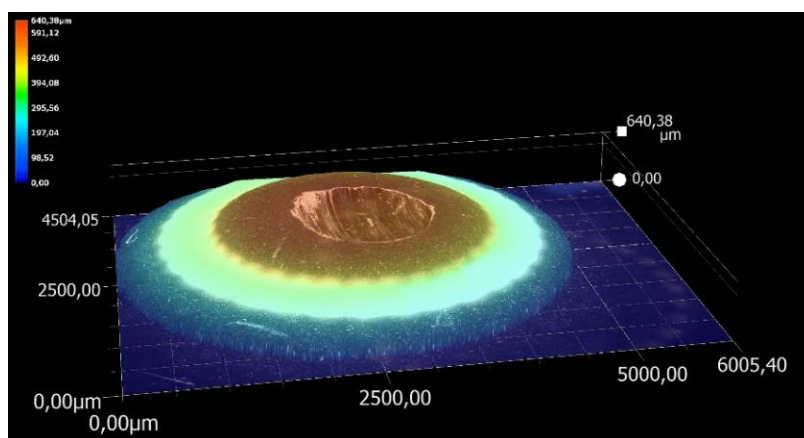
Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	30,67	μm	Sa	29,50	μm
Rz	129,35	μm	Sz	186,62	μm
Rp	41,36	μm	Sq	35,42	μm
Rv	87,99	μm	Ssk	-0,62	–
Rc	–	μm	Sku	2,84	–
Rt	129,82	μm	Sp	52,14	μm
Rq	35,92	μm	Sv	134,48	μm
Rsk	-0,57	–	Rozmiar obszaru	2524047,28	μm ²
Rku	2,29	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,10	–			
Długość próbkow.	1727,77	μm			

Zestaw badawczy nr 3

Na rysunkach 5.34 oraz 5.35 zaprezentowano obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej środek smarujący na bazie oleju lnianego, który jest wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.34. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej 3 [opracowanie własne]



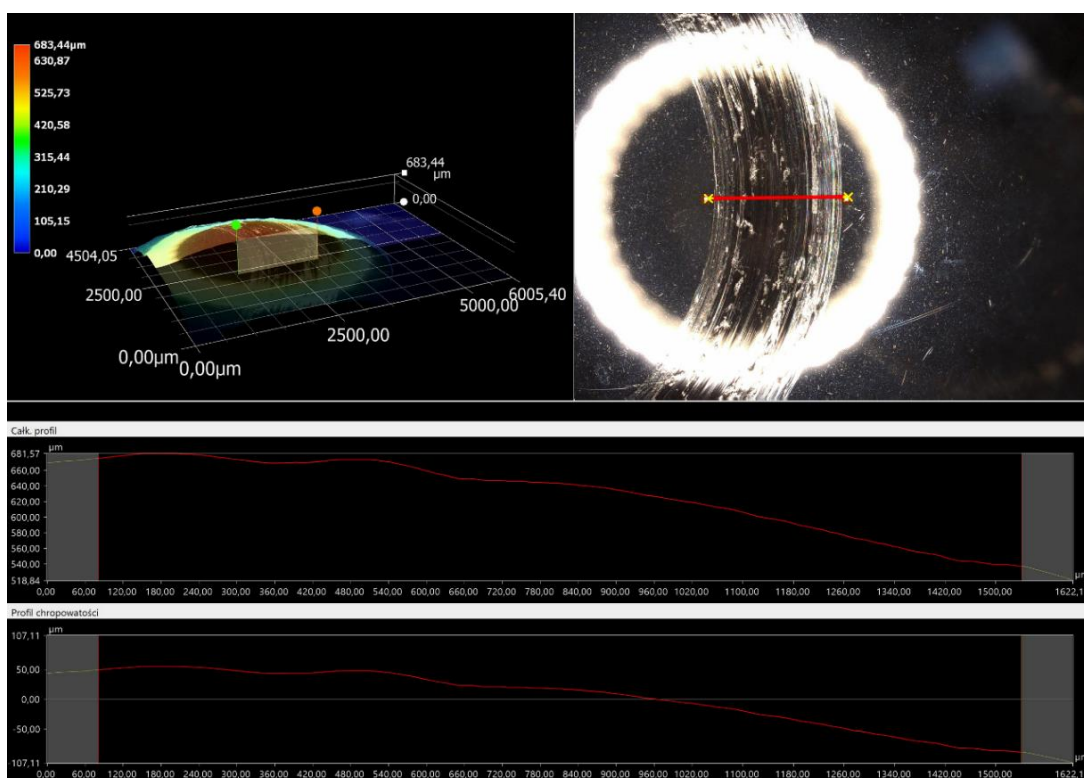
Rys. 5.35. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 3 [opracowanie własne]

W tabeli 5.53 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku dolnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 3.

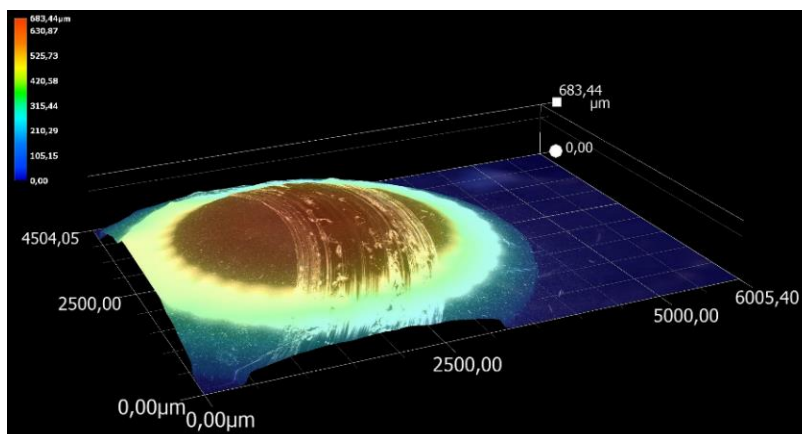
Tabela 5.53. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	23,02	μm	Sa	26,18	μm
Rz	82,28	μm	Sz	103,43	μm
Rp	51,02	μm	Sq	29,37	μm
Rv	31,26	μm	Ssk	0,26	–
Rc	–	μm	Sku	1,69	–
Rt	82,59	μm	Sp	57,13	μm
Rq	26,05	μm	Sv	46,30	μm
Rsk	0,79	–	Rozmiar obszaru	2110526,79	μm ²
Rku	2,10	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,10	–			
Długość próbkow.	1602,41	μm			

Na rysunkach 5.36 oraz 5.37 przedstawiono obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadłe do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej środek smarujący na bazie oleju lnianego, który jest wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.36. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 3 [opracowanie własne]



Rys. 5.37. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 3 [opracowanie własne]

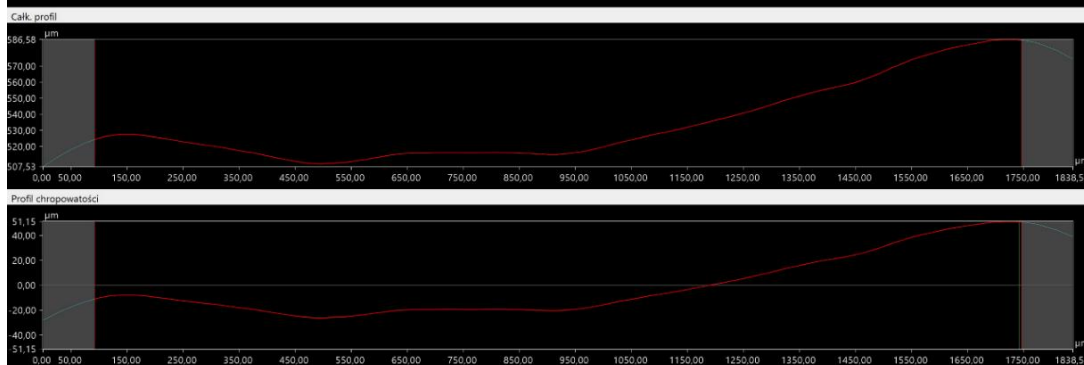
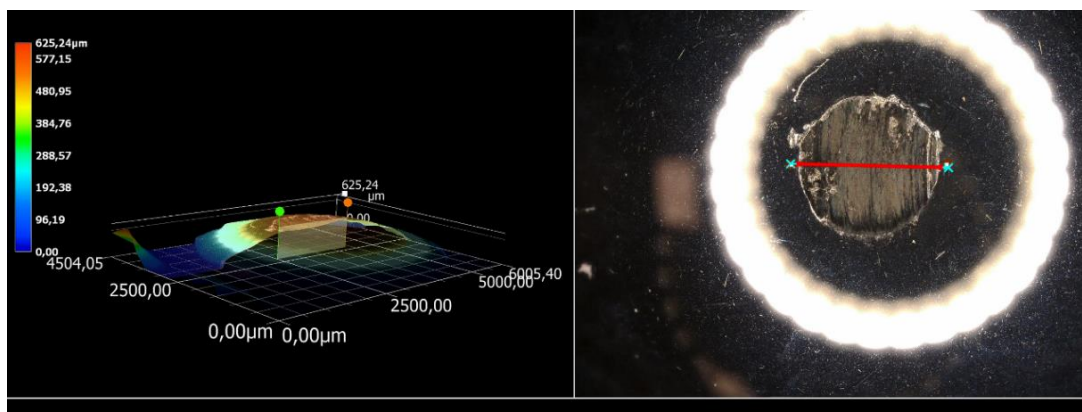
W tabeli 5.54 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku górnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 3.

Tabela 5.54. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

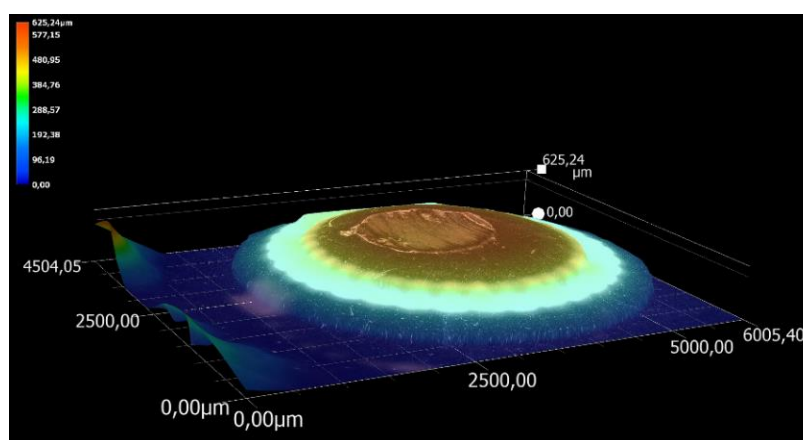
Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	39,86	μm	Sa	37,78	μm
Rz	144,17	μm	Sz	200,59	μm
Rp	55,62	μm	Sq	44,55	μm
Rv	88,55	μm	Ssk	-0,61	–
Rc	–	μm	Sku	2,33	–
Rt	144,31	μm	Sp	64,16	μm
Rq	45,81	μm	Sv	136,43	μm
Rsk	-0,42	–	Rozmiar obszaru	2146424,59	μm ²
Rku	1,90	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,13	–			
Długość próbkow.	1459,31	μm			

Zestaw badawczy nr 4

Na rysunkach 5.38 oraz 5.39 zaprezentowano obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej środek smarujący na bazie dwusiarczku molibdenu, który jest wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.38. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 4 [opracowanie własne]



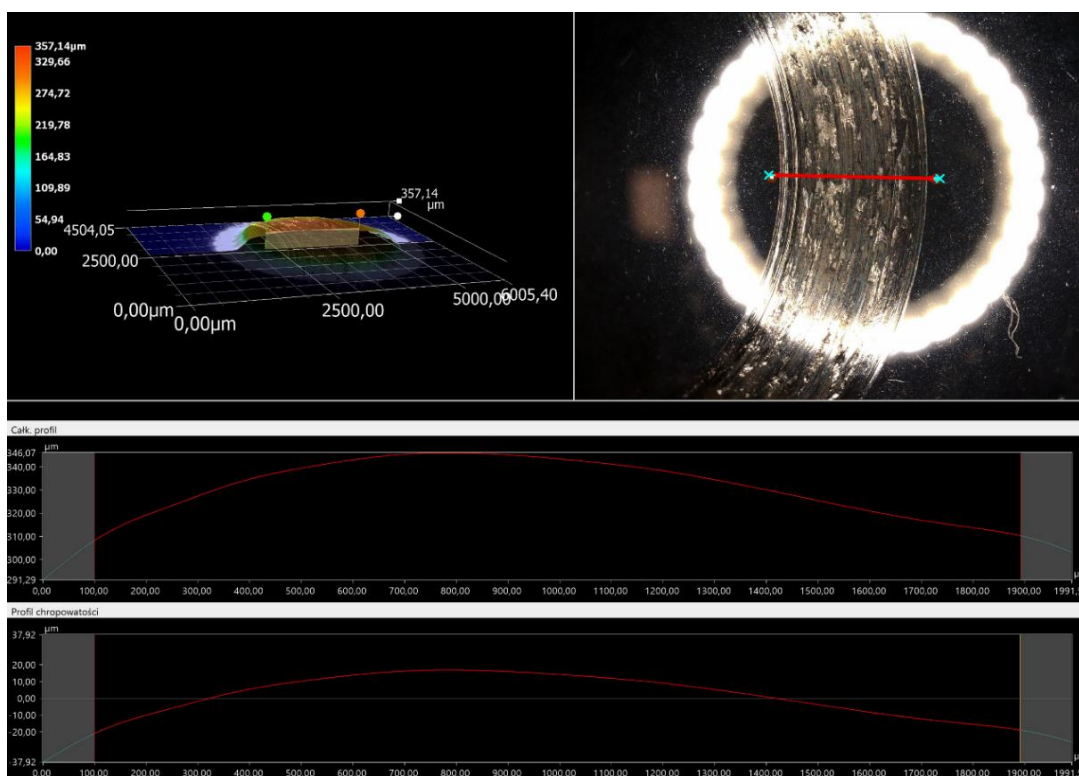
Rys. 5.39. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 4 [opracowanie własne]

W tabeli 5.55 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku dolnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 4.

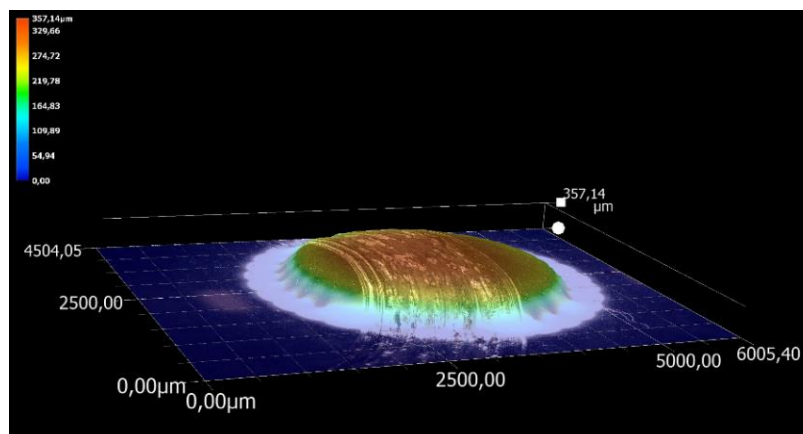
Tabela 5.55. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	20,31	μm	Sa	18,86	μm
Rz	77,33	μm	Sz	89,52	μm
Rp	51,15	μm	Sq	22,23	μm
Rv	26,17	μm	Ssk	0,52	–
Rc	–	μm	Sku	2,19	–
Rt	77,33	μm	Sp	55,24	μm
Rq	23,65	μm	Sv	34,28	μm
Rsk	0,80	–	Rozmiar obszaru	2241873,81	μm ²
Rku	2,39	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,07	–			
Długość próbkow.	1650,68	μm			

Na rysunkach 5.40 oraz 5.41 przedstawiono obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej środek smarujący na bazie dwusiarczku molibdenu, który jest wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.40. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 4 [opracowanie własne]



Rys. 5.41. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 4 [opracowanie własne]

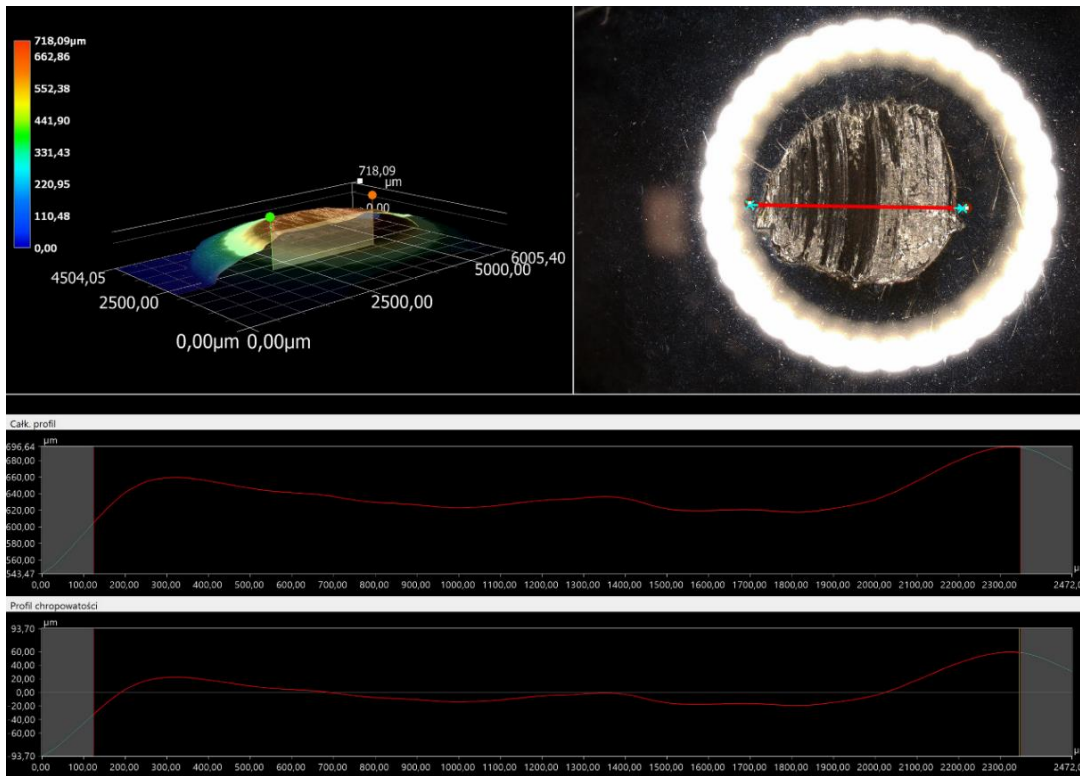
W tabeli 5.56 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku górnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 4.

Tabela 5.56. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

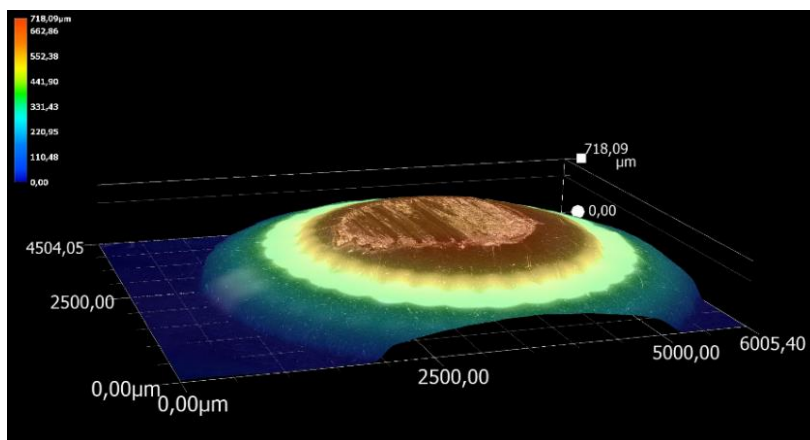
Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	10,52	μm	Sa	12,71	μm
Rz	37,77	μm	Sz	99,89	μm
Rp	16,86	μm	Sq	16,00	μm
Rv	20,91	μm	Ssk	-1,07	–
Rc	–	μm	Sku	4,13	–
Rt	37,77	μm	Sp	27,32	μm
Rq	11,74	μm	Sv	72,58	μm
Rsk	0,34	–	Rozmiar obszaru	2400561,60	μm ²
Rku	1,56	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,05	–			
Długość próbkow.	1791,31	μm			

Zestaw badawczy nr 5

Na rysunkach 5.42 oraz 5.43 zaprezentowano obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej stały środek smarujący w postaci sztyftu, który jest wykorzystywanych do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.42. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 5 [opracowanie własne]



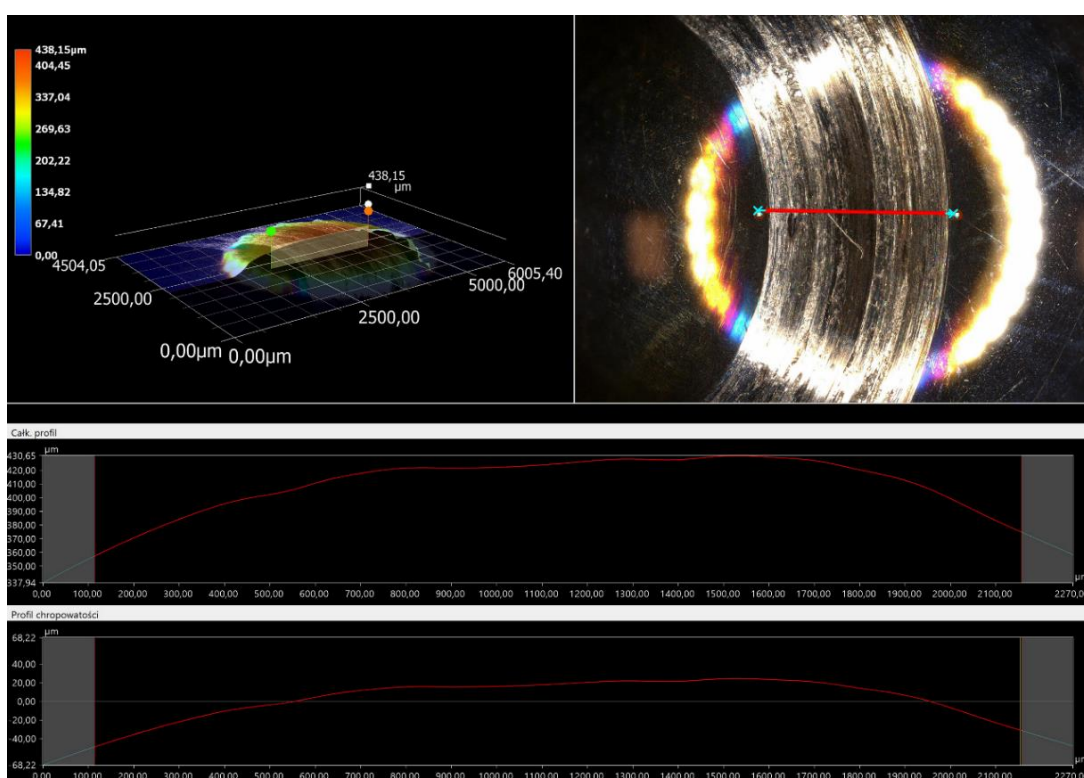
Rys. 5.43. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 5 [opracowanie własne]

W tabeli 5.57 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku dolnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 5.

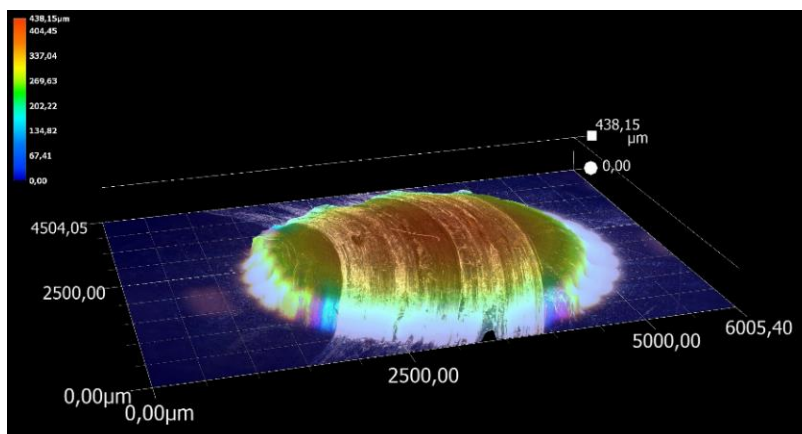
Tabela 5.57. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	14,83	μm	Sa	23,40	μm
Rz	91,01	μm	Sz	158,05	μm
Rp	59,47	μm	Sq	28,19	μm
Rv	31,54	μm	Ssk	0,40	–
Rc	42,01	μm	Sku	2,53	–
Rt	91,01	μm	Sp	72,83	μm
Rq	19,68	μm	Sv	85,22	μm
Rsk	1,52	–	Rozmiar obszaru	4530915,66	μm ²
Rku	4,67	–			
Rsm	1833,44	μm			
Rdq	0,14	–			
Długość próbkow.	2221,73	μm			

Na rysunkach 5.44 oraz 5.45 przedstawiono obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadłe do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej stały środek smarujący w postaci sztyftu, który jest wykorzystywanych do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.44. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 5 [opracowanie własne]



Rys. 5.45. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 5 [opracowanie własne]

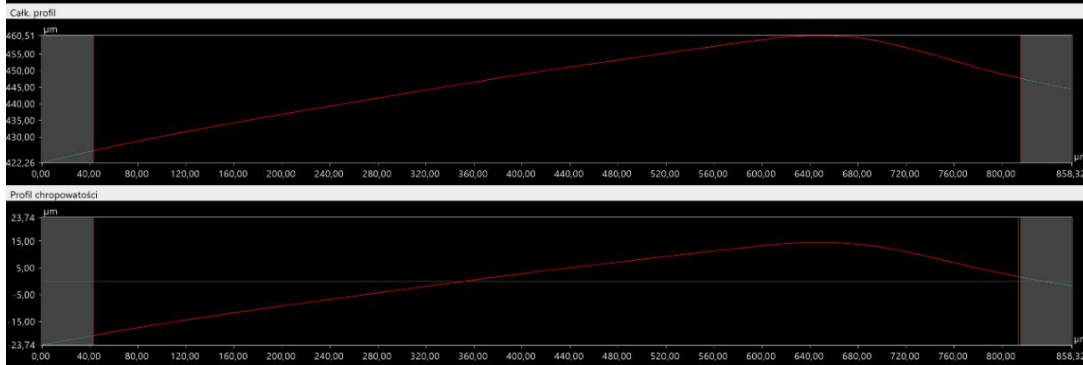
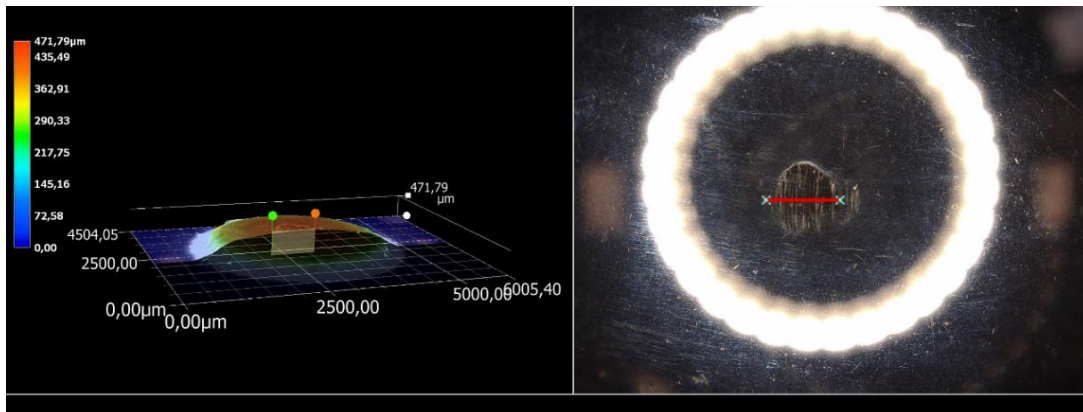
W tabeli 5.58 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku górnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 5.

Tabela 5.58. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

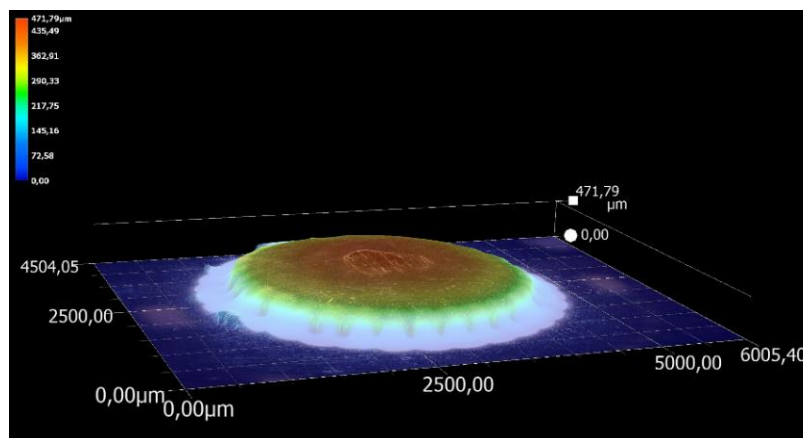
Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	17,31	μm	Sa	23,52	μm
Rz	73,14	μm	Sz	183,48	μm
Rp	24,49	μm	Sq	29,04	μm
Rv	48,65	μm	Ssk	-0,88	–
Rc	–	μm	Sku	3,43	–
Rt	73,14	μm	Sp	45,49	μm
Rq	19,47	μm	Sv	137,99	μm
Rsk	-0,15	–	Rozmiar obszaru	3461494,90	μm ²
Rku	2,00	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,08	–			
Długość próbkow.	2040,50	μm			

Zestaw badawczy nr 6

Na rysunkach 5.46 oraz 5.47 zaprezentowano obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej autorski środek smarujący mogący zostać zastosowany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.46. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 6 [opracowanie własne]



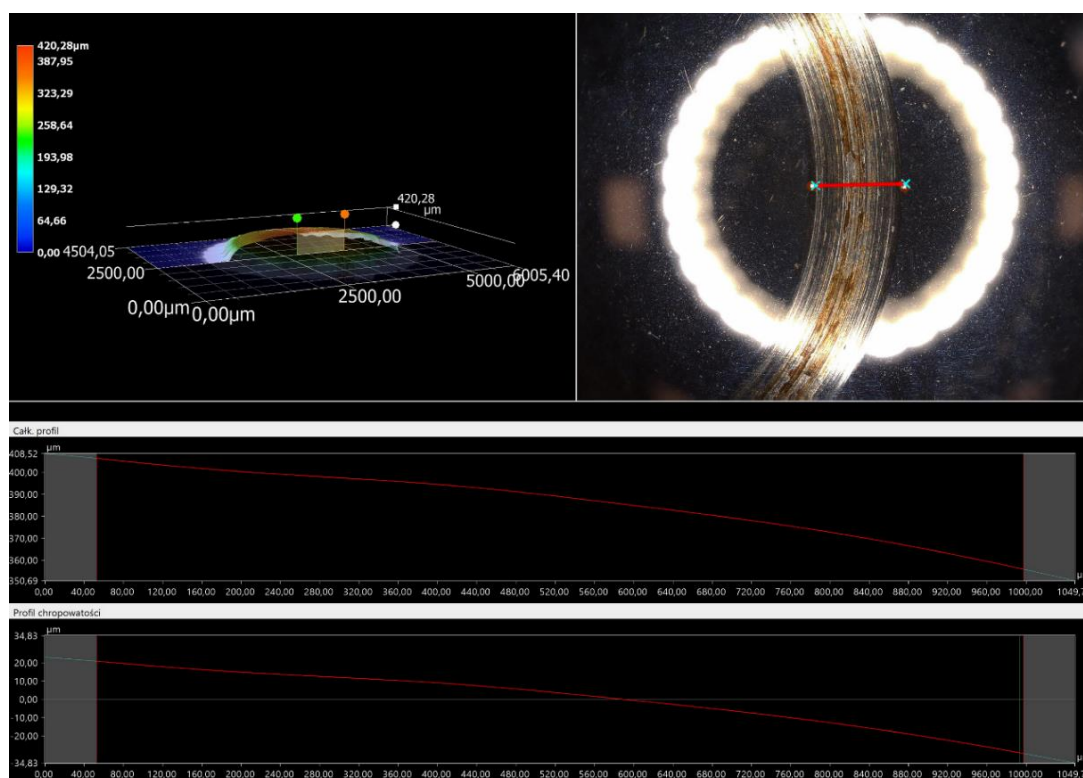
Rys. 5.47. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 6 [opracowanie własne]

W tabeli 5.59 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku dolnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 6.

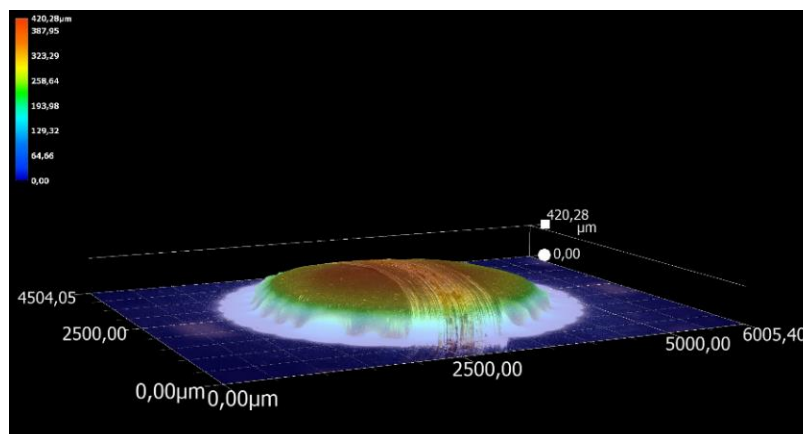
Tabela 5.59. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	8,95	μm	Sa	10,29	μm
Rz	34,58	μm	Sz	47,30	μm
Rp	14,50	μm	Sq	11,95	μm
Rv	20,08	μm	Ssk	-0,15	–
Rc	–	μm	Sku	1,88	–
Rt	34,58	μm	Sp	23,22	μm
Rq	10,24	μm	Sv	24,08	μm
Rsk	-0,09	–	Rozmiar obszaru	445870,26	μm ²
Rku	1,81	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,06	–			
Długość próbkow.	770,61	μm			

Na rysunkach 5.48 oraz 5.49 przedstawiono obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej autorski środek smarujący mogący zostać zastosowany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.48. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 6 [opracowanie własne]



Rys. 5.49. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 6 [opracowanie własne]

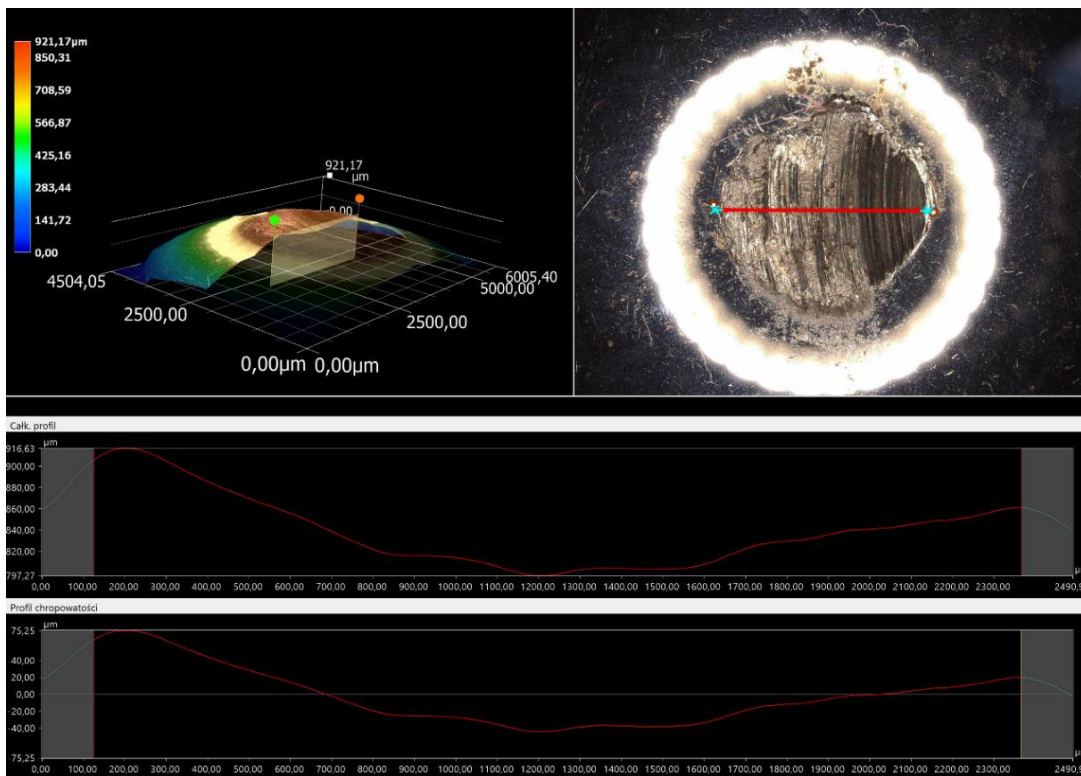
W tabeli 5.60 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku górnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 6.

Tabela 5.60. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

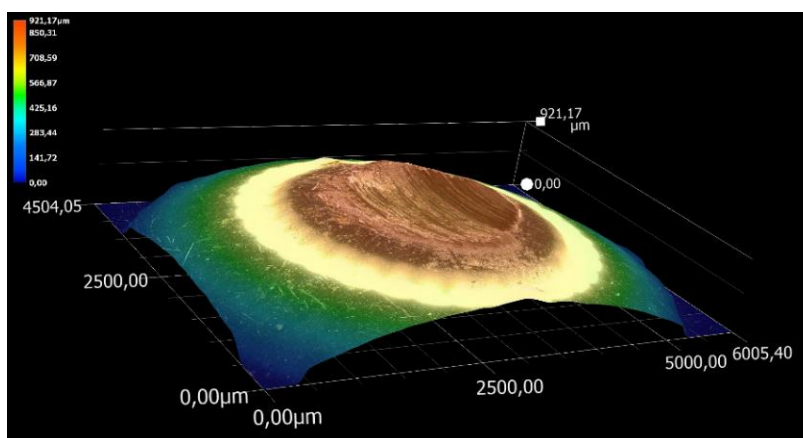
Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	11,90	μm	Sa	8,41	μm
Rz	50,02	μm	Sz	56,46	μm
Rp	20,79	μm	Sq	10,11	μm
Rv	29,23	μm	Ssk	-0,27	–
Rc	–	μm	Sku	2,39	–
Rt	50,22	μm	Sp	26,10	μm
Rq	13,79	μm	Sv	30,36	μm
Rsk	-0,34	–	Rozmiar obszaru	734304,98	μm ²
Rku	2,00	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,06	–			
Długość próbkow.	941,20	μm			

Zestaw badawczy nr 7

Na rysunkach 5.50 oraz 5.51 zaprezentowano obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych oraz mokre liście, które w porze jesiennej zalegają na szynach torowisk tramwajowych.



Rys. 5.50. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 7 [opracowanie własne]



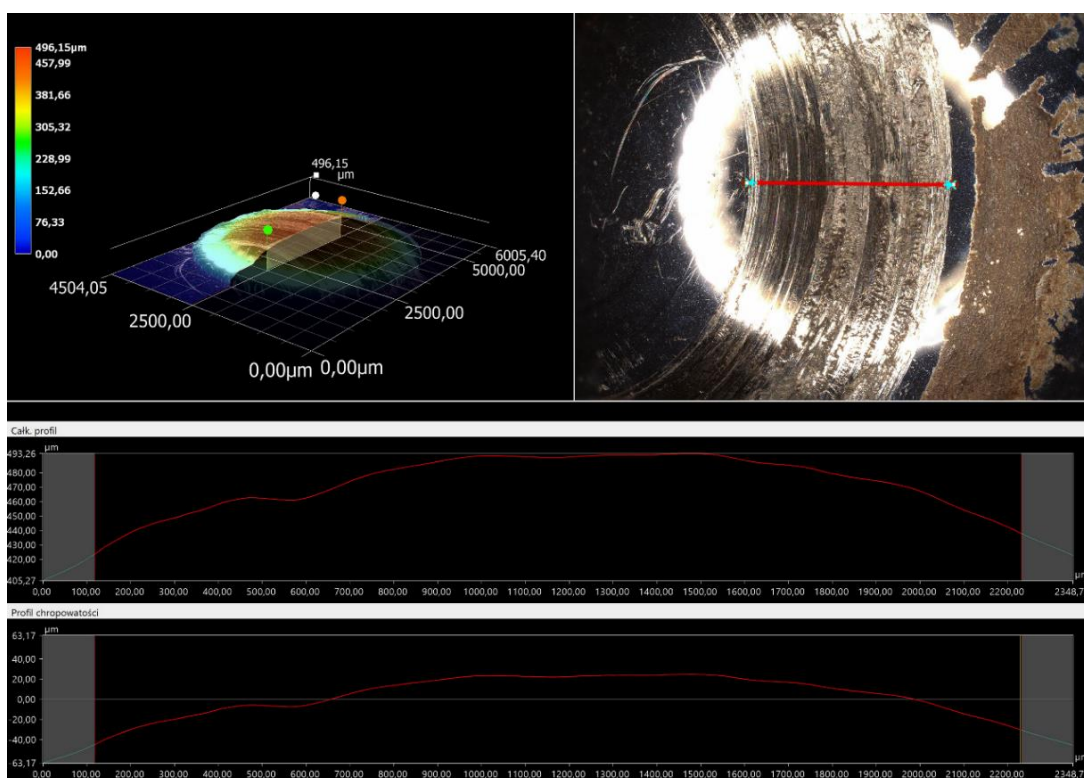
Rys. 5.51. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 7 [opracowanie własne]

W tabeli 5.61 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku dolnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 7.

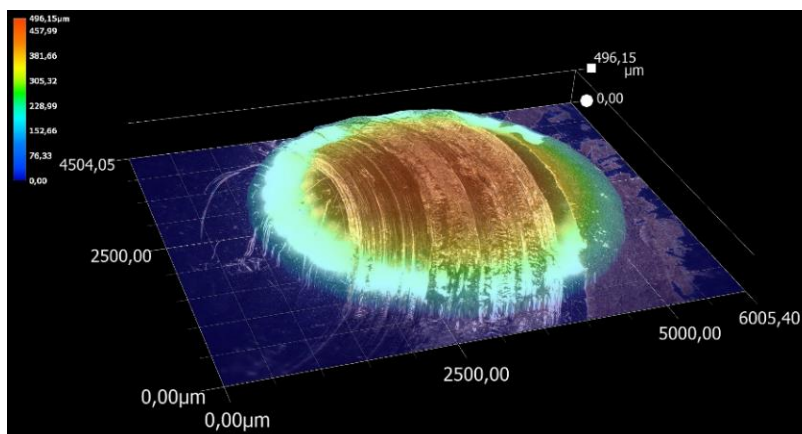
Tabela 5.61. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	27,42	μm	Sa	25,35	μm
Rz	119,35	μm	Sz	130,42	μm
Rp	75,25	μm	Sq	30,43	μm
Rv	44,10	μm	Ssk	0,11	–
Rc	–	μm	Sku	2,11	–
Rt	119,35	μm	Sp	67,44	μm
Rq	33,52	μm	Sv	62,98	μm
Rsk	0,57	–	Rozmiar obszaru	4747415,63	μm ²
Rku	2,53	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,11	–			
Długość próbkow.	2240,56	μm			

Na rysunkach 5.52 oraz 5.53 przedstawiono obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych oraz mokre liście, które w porze jesiennej zalegają na szynach torowisk tramwajowych.



Rys. 5.52. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 7 [opracowanie własne]



Rys. 5.53. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 7 [opracowanie własne]

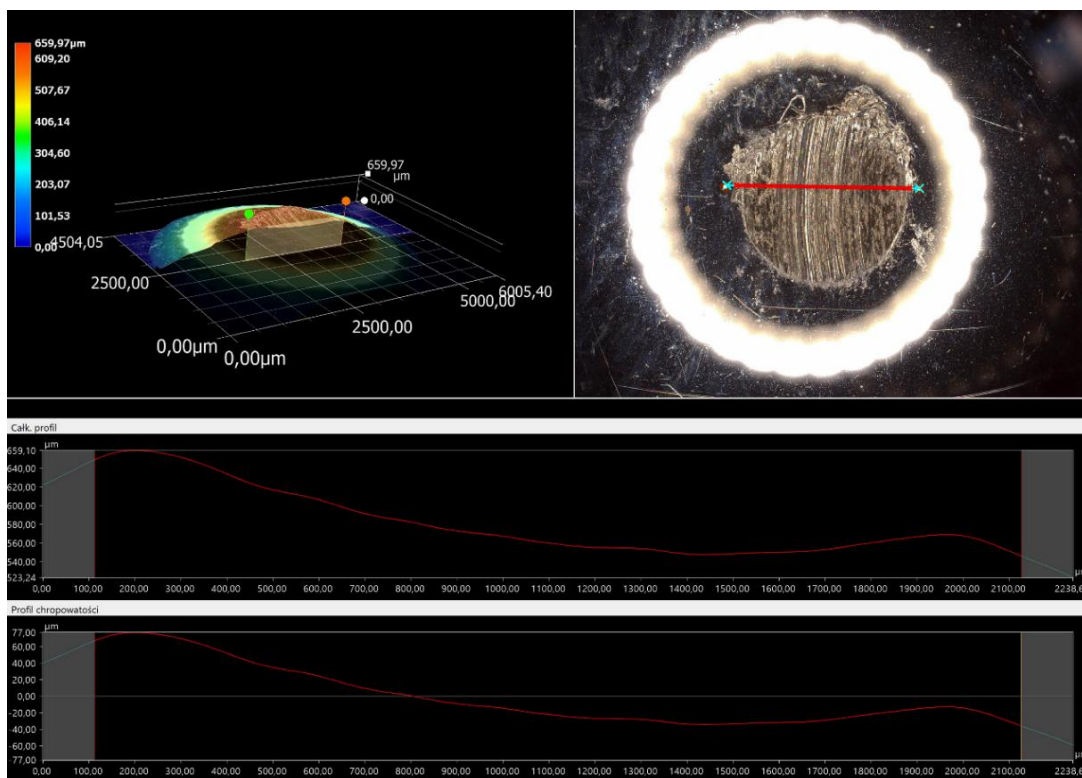
W tabeli 5.62 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku górnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 7.

Tabela 5.62. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

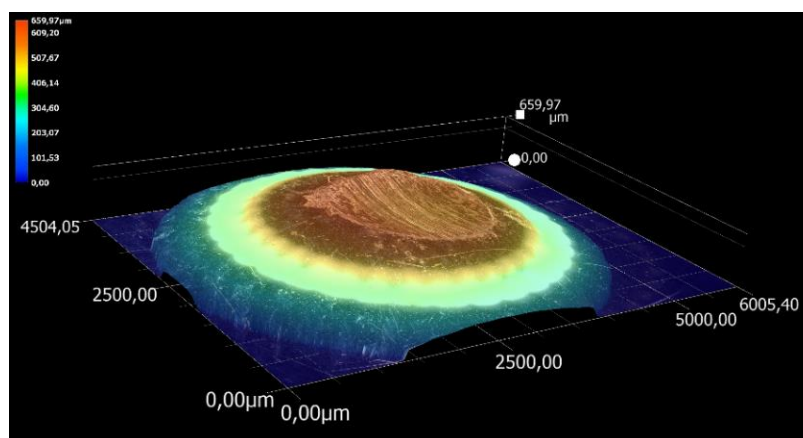
Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	16,77	μm	Sa	30,77	μm
Rz	69,49	μm	Sz	238,08	μm
Rp	24,82	μm	Sq	38,57	μm
Rv	44,67	μm	Ssk	-0,98	–
Rc	–	μm	Sku	3,95	–
Rt	69,49	μm	Sp	53,29	μm
Rq	18,86	μm	Sv	184,80	μm
Rsk	0,16	–	Rozmiar obszaru	4362001,17	μm ²
Rku	1,76	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,08	–			
Długość próbkow.	2110,98	μm			

Zestaw badawczy nr 8

Na rysunkach 5.54 oraz 5.55 zaprezentowano obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadłe do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych oraz środek smarujący na bazie oleju lnianego wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.54. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 8 [opracowanie własne]



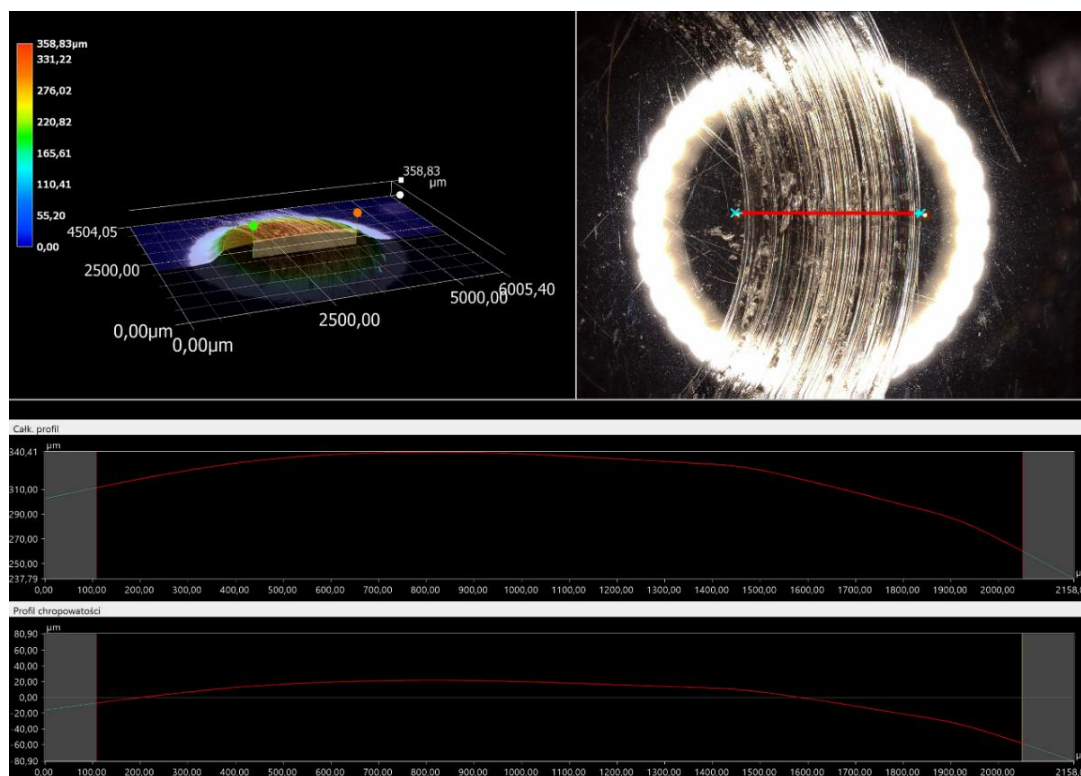
Rys. 5.55. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 8 [opracowanie własne]

W tabeli 5.63 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku dolnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 8.

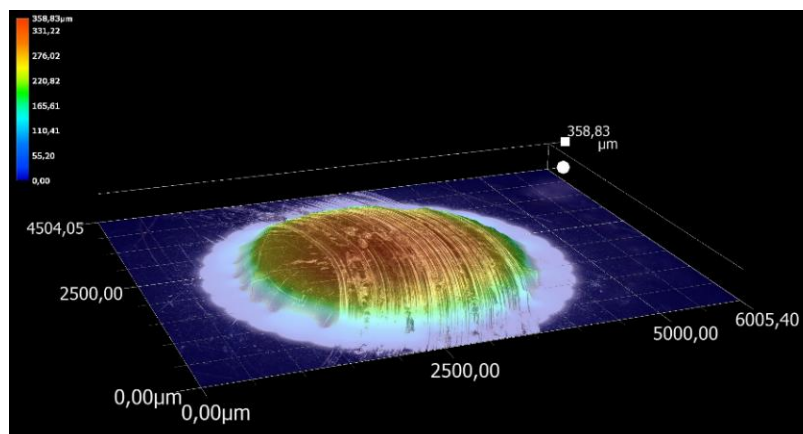
Tabela 5.63. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	29,61	μm	Sa	30,90	μm
Rz	112,24	μm	Sz	158,52	μm
Rp	77,00	μm	Sq	35,90	μm
Rv	35,23	μm	Ssk	0,32	–
Rc	–	μm	Sku	1,99	–
Rt	112,68	μm	Sp	74,08	μm
Rq	35,31	μm	Sv	84,44	μm
Rsk	1,01	–	Rozmiar obszaru	4083862,72	μm ²
Rku	2,65	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,10	–			
Długość próbkow.	2013,36	μm			

Na rysunkach 5.56 oraz 5.57 przedstawiono obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych oraz środek smarujący na bazie oleju lnianego wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.56. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 8 [opracowanie własne]



Rys. 5.57. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 8 [opracowanie własne]

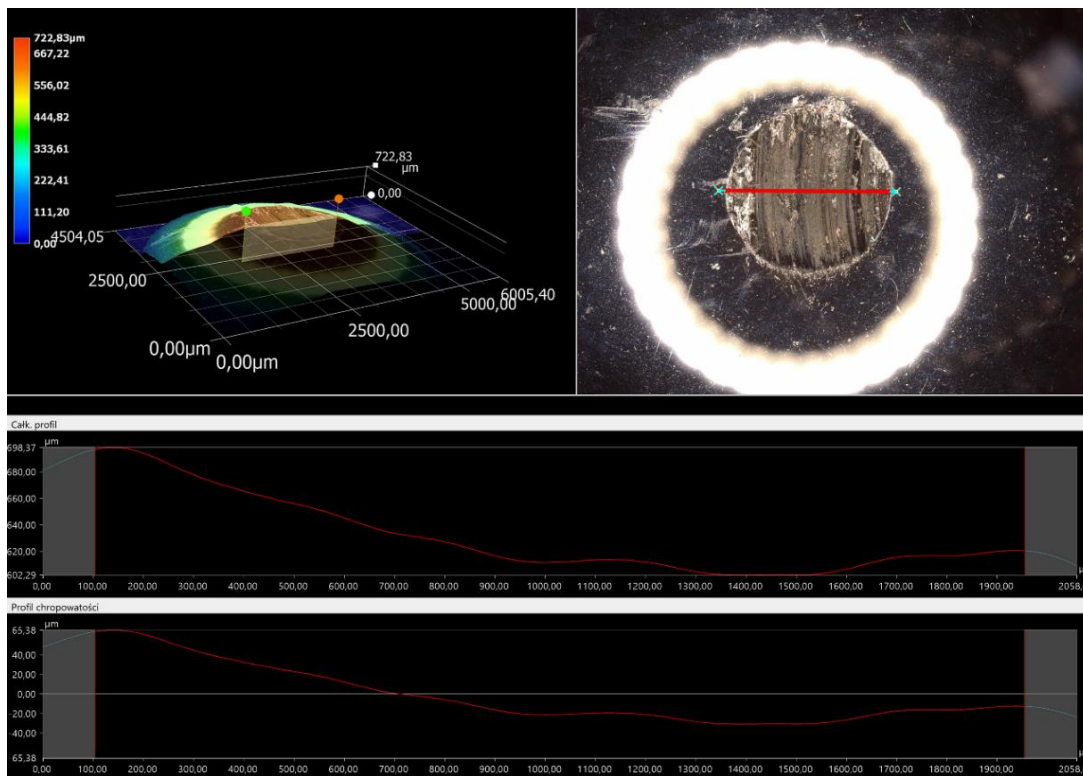
W tabeli 5.64 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku górnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 8.

Tabela 5.64. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

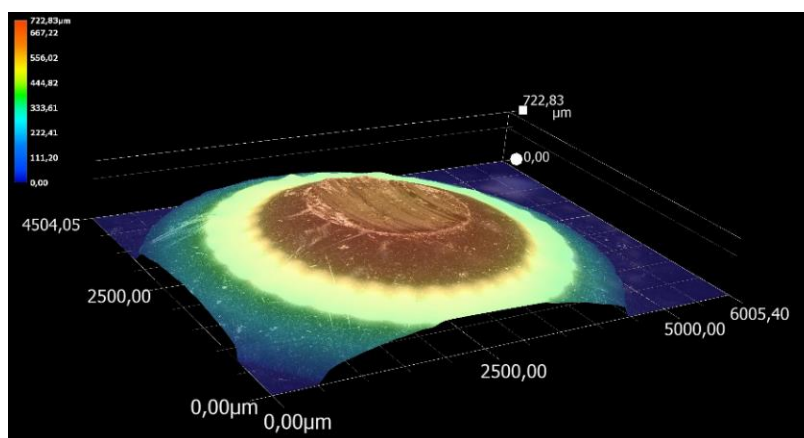
Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	16,75	μm	Sa	21,46	μm
Rz	79,72	μm	Sz	195,09	μm
Rp	21,72	μm	Sq	27,62	μm
Rv	58,00	μm	Ssk	-1,15	–
Rc	–	μm	Sku	4,51	–
Rt	80,14	μm	Sp	44,19	μm
Rq	19,81	μm	Sv	150,90	μm
Rsk	-0,64	–	Rozmiar obszaru	3368341,48	μm ²
Rku	2,87	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,07	–			
Długość próbkow.	1941,03	μm			

Zestaw badawczy nr 9

Na rysunkach 5.58 oraz 5.59 zaprezentowano obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych oraz środek smarujący na bazie dwusiarczku molibdenu wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.58. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 9 [opracowanie własne]



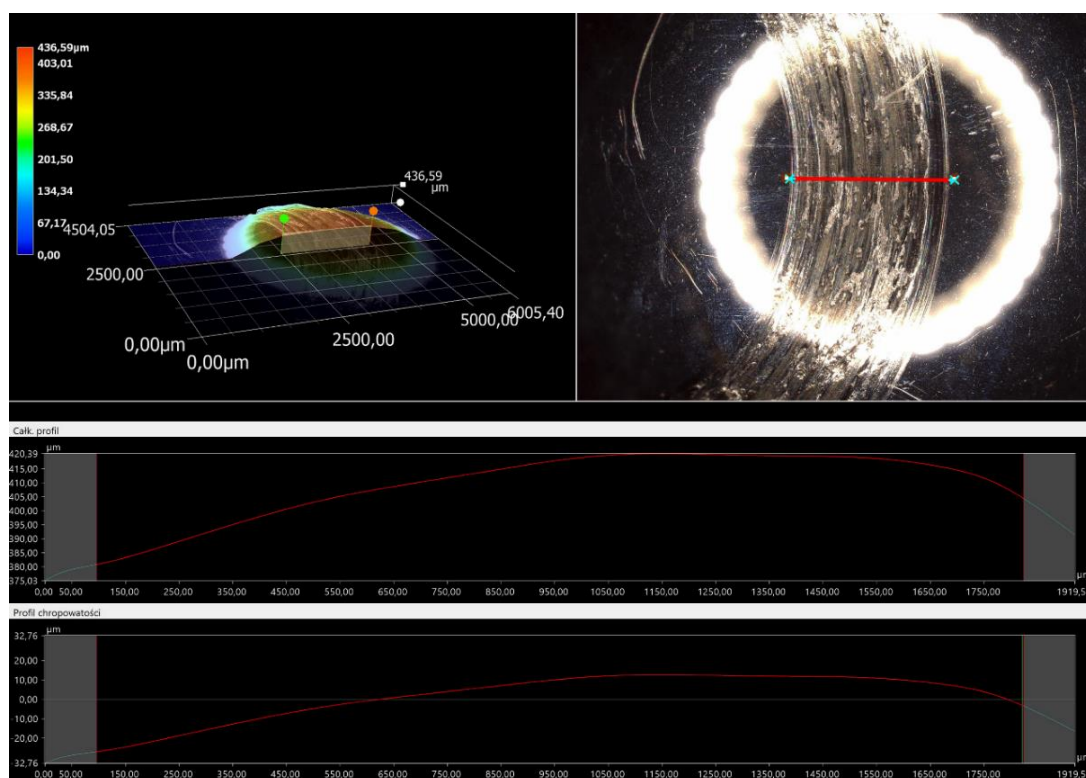
Rys. 5.59. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 9 [opracowanie własne]

W tabeli 5.65 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku dolnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 9.

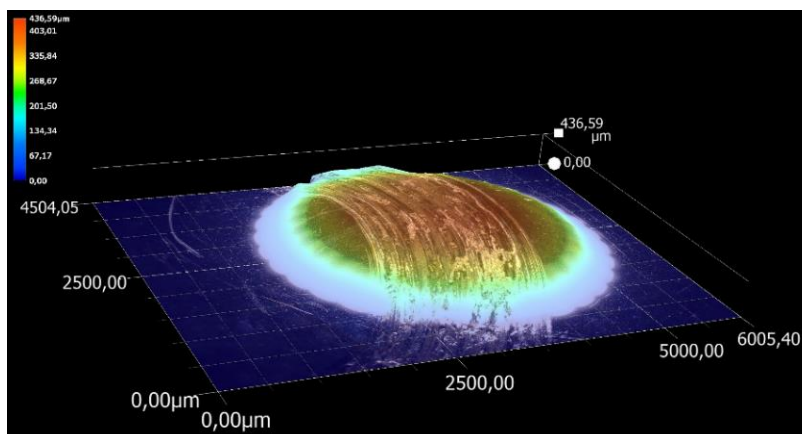
Tabela 5.65. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	24,44	μm	Sa	29,04	μm
Rz	96,08	μm	Sz	184,58	μm
Rp	65,38	μm	Sq	35,05	μm
Rv	30,70	μm	Ssk	0,31	–
Rc	–	μm	Sku	2,50	–
Rt	96,08	μm	Sp	81,97	μm
Rq	28,62	μm	Sv	102,61	μm
Rsk	0,82	–	Rozmiar obszaru	3445841,78	μm ²
Rku	2,55	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,08	–			
Długość próbkow.	1850,25	μm			

Na rysunkach 5.60 oraz 5.61 przedstawiono obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych oraz środek smarujący na bazie dwusiarczku molibdenu wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.60. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 9 [opracowanie własne]



Rys. 5.61. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 9 [opracowanie własne]

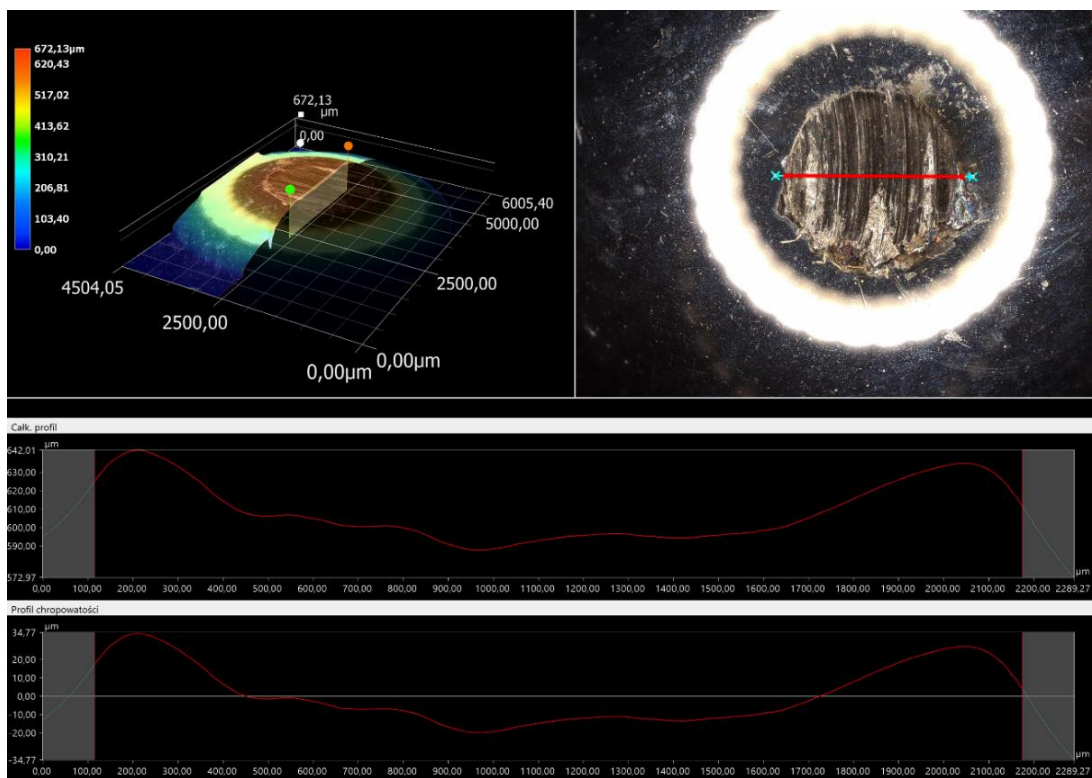
W tabeli 5.66 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku górnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 9.

Tabela 5.66. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

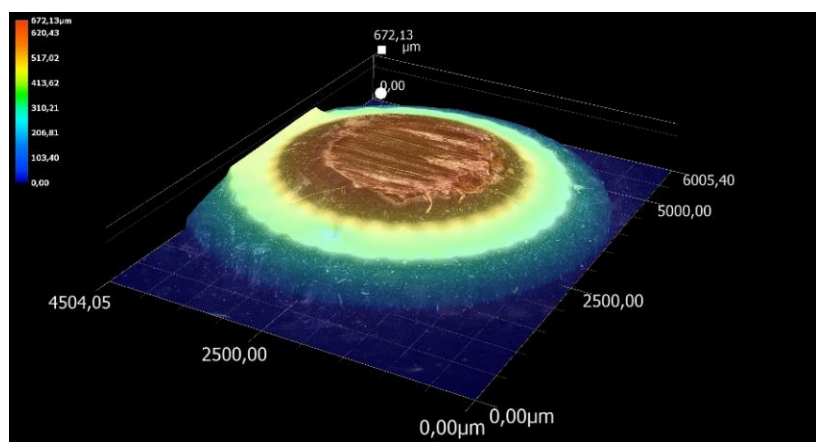
Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	10,02	μm	Sa	19,71	μm
Rz	39,59	μm	Sz	157,87	μm
Rp	12,60	μm	Sq	24,91	μm
Rv	26,99	μm	Ssk	-1,04	–
Rc	–	μm	Sku	3,97	–
Rt	39,59	μm	Sp	40,82	μm
Rq	11,61	μm	Sv	117,05	μm
Rsk	-0,47	–	Rozmiar obszaru	2809629,65	μm ²
Rku	2,21	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,04	–			
Długość próbkow.	1725,54	μm			

Zestaw badawczy nr 10

Na rysunkach 5.62 oraz 5.63 zaprezentowano obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych oraz stały środek smarujący w postaci sztyftu, który jest wykorzystywanych do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.62. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 10 [opracowanie własne]



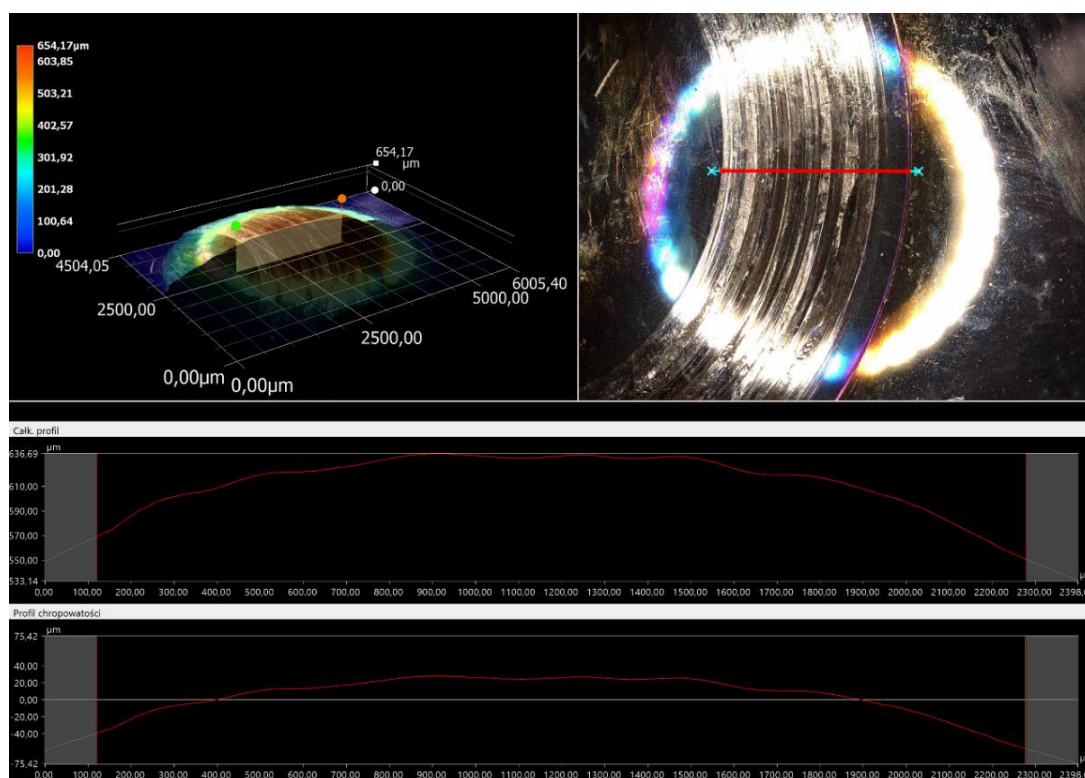
Rys. 5.63. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 10 [opracowanie własne]

W tabeli 5.67 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku dolnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 10.

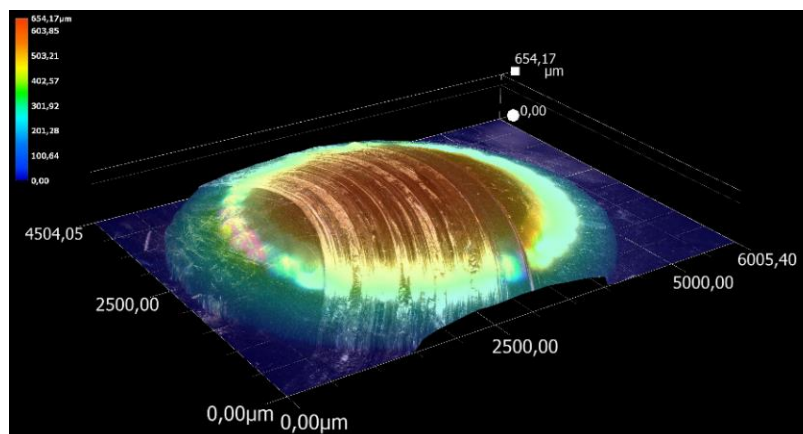
Tabela 5.67. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	13,55	μm	Sa	21,31	μm
Rz	54,18	μm	Sz	151,70	μm
Rp	34,27	μm	Sq	27,87	μm
Rv	19,91	μm	Ssk	-0,53	–
Rc	–	μm	Sku	3,57	–
Rt	54,18	μm	Sp	59,83	μm
Rq	15,96	μm	Sv	91,88	μm
Rsk	0,83	–	Rozmiar obszaru	4308850,15	μm ²
Rku	2,20	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,10	–			
Długość próbkow.	2059,71	μm			

Na rysunkach 5.64 oraz 5.65 przedstawiono obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych oraz stały środek smarujący w postaci sztyftu, który jest wykorzystywanych do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.64. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 10 [opracowanie własne]



Rys. 5.65. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 10 [opracowanie własne]

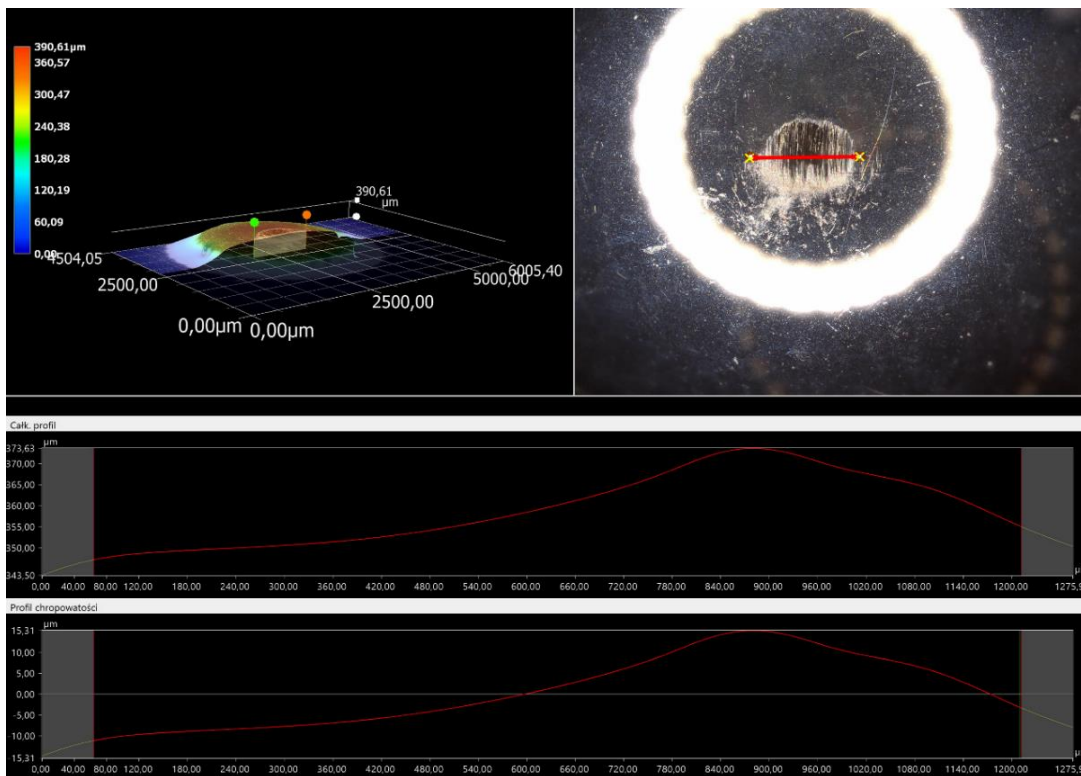
W tabeli 5.68 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku górnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 10.

Tabela 5.68. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

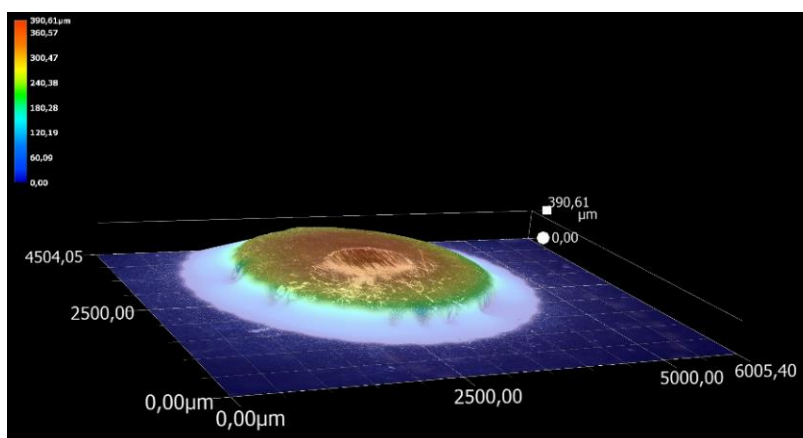
Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	19,77	μm	Sa	21,88	μm
Rz	85,54	μm	Sz	143,24	μm
Rp	28,12	μm	Sq	26,75	μm
Rv	57,42	μm	Ssk	-0,79	–
Rc	–	μm	Sku	3,13	–
Rt	85,87	μm	Sp	42,01	μm
Rq	22,72	μm	Sv	101,23	μm
Rsk	-0,18	–	Rozmiar obszaru	3151632,81	μm ²
Rku	2,14	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,10	–			
Długość próbkow.	2156,71	μm			

Zestaw badawczy nr 11

Na rysunkach 5.66 oraz 5.67 zaprezentowano obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych oraz autorski środek smarujący mogący zostać zastosowany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.66. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 11 [opracowanie własne]



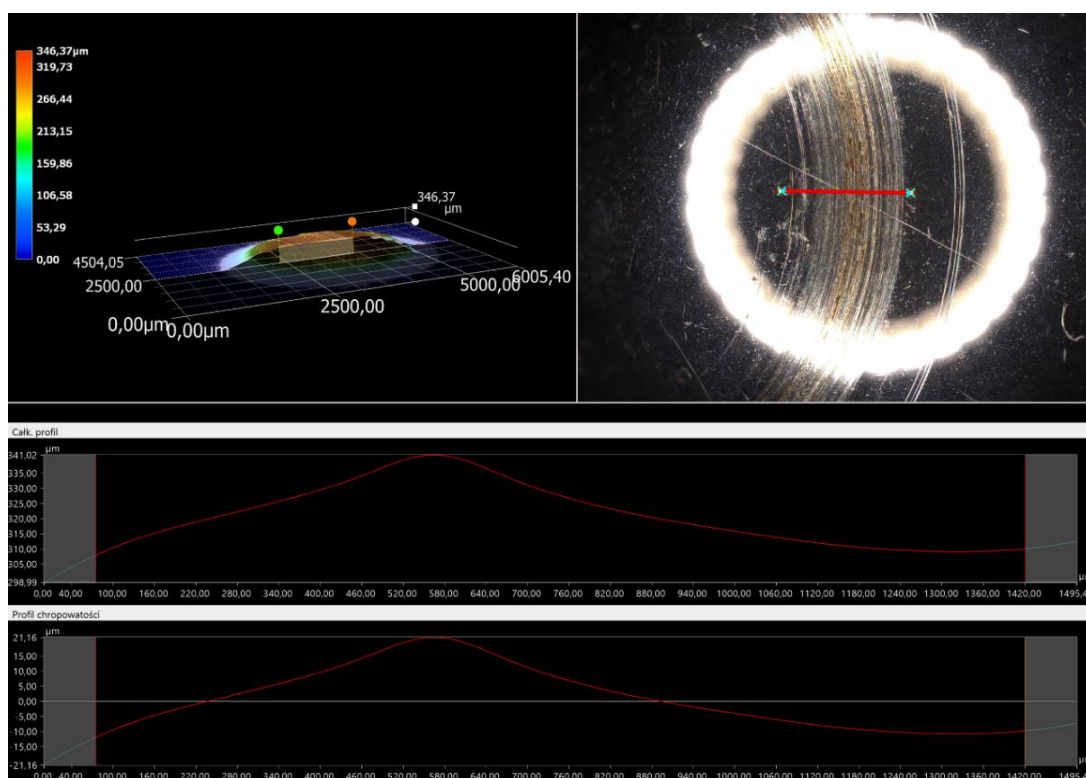
Rys. 5.67. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 11 [opracowanie własne]

W tabeli 5.69 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku dolnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 11.

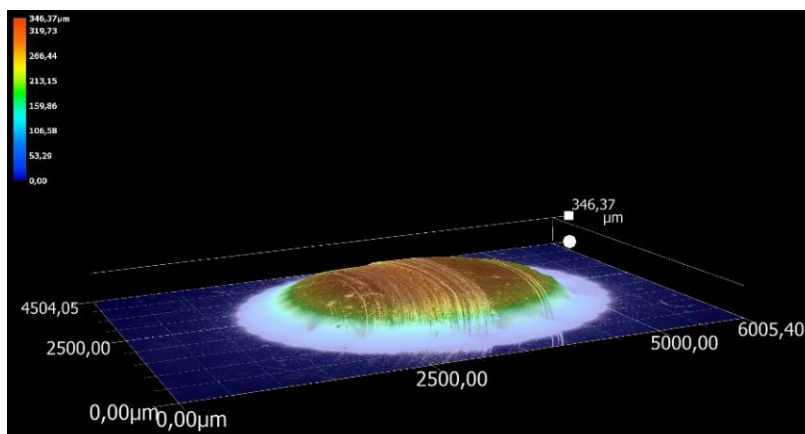
Tabela 5.69. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	7,28	μm	Sa	11,22	μm
Rz	26,41	μm	Sz	65,97	μm
Rp	15,31	μm	Sq	13,62	μm
Rv	11,10	μm	Ssk	-0,12	–
Rc	–	μm	Sku	2,40	–
Rt	26,41	μm	Sp	34,29	μm
Rq	8,33	μm	Sv	31,68	μm
Rsk	0,61	–	Rozmiar obszaru	902245,50	μm ²
Rku	1,85	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,05	–			
Długość próbkow.	1146,45	μm			

Na rysunkach 5.68 oraz 5.69 przedstawiono obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych oraz autorski środek smarujący mogący zostać zastosowany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.68. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 11 [opracowanie własne]



Rys. 5.69. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 11 [opracowanie własne]

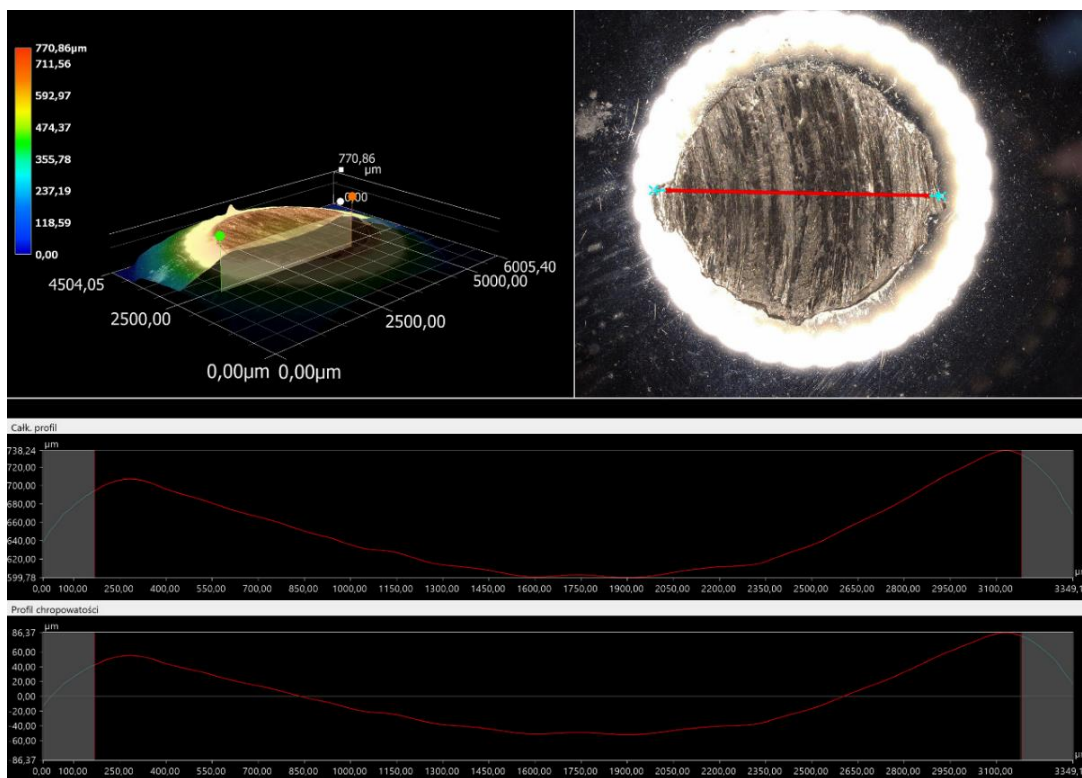
W tabeli 5.70 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku górnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 11.

Tabela 5.70. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

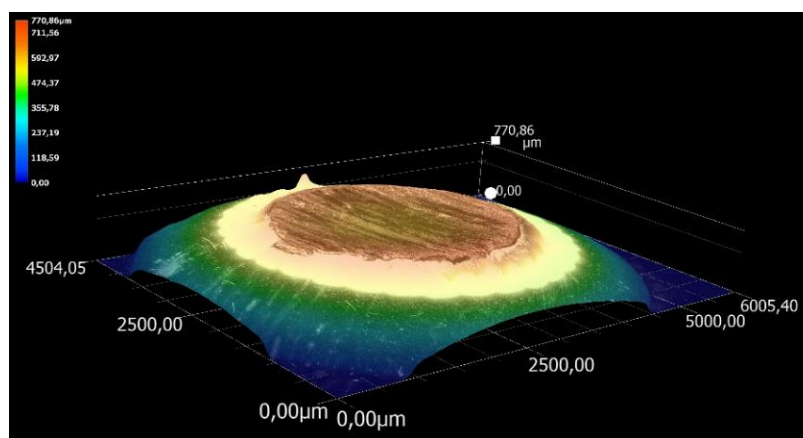
Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	8,53	μm	Sa	9,53	μm
Rz	33,05	μm	Sz	79,62	μm
Rp	21,16	μm	Sq	11,92	μm
Rv	11,89	μm	Ssk	0,07	–
Rc	–	μm	Sku	3,06	–
Rt	33,05	μm	Sp	35,64	μm
Rq	10,16	μm	Sv	43,98	μm
Rsk	0,88	–	Rozmiar obszaru	1560372,00	μm ²
Rku	2,30	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,06	–			
Długość próbkow.	1345,23	μm			

Zestaw badawczy nr 12

Na rysunkach 5.70 oraz 5.71 zaprezentowano obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych, materiał pozyskany z torowiska tramwajowego oraz środek smarujący na bazie oleju lnianego wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.70. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 12 [opracowanie własne]



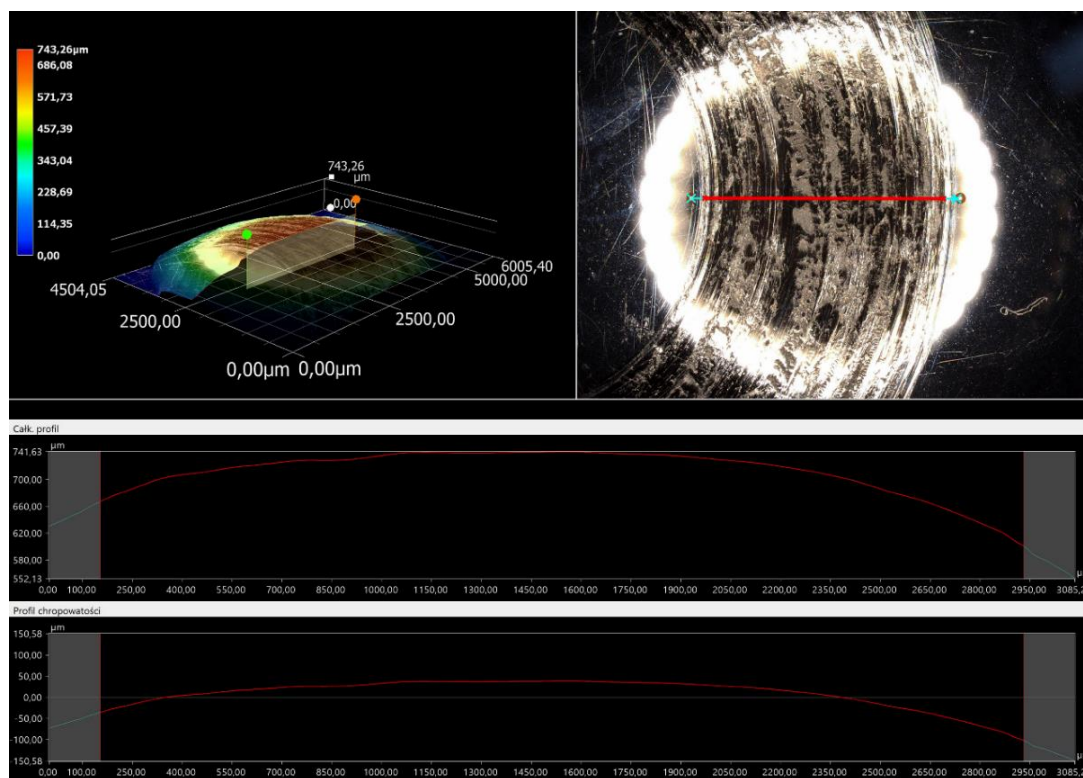
Rys. 5.71. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 12 [opracowanie własne]

W tabeli 5.71 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku dolnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 12.

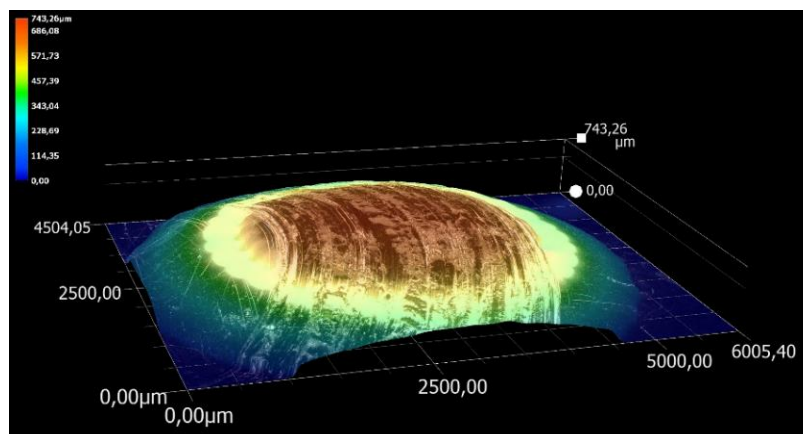
Tabela 5.71. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	37,63	μm	Sa	35,48	μm
Rz	138,47	μm	Sz	251,13	μm
Rp	86,37	μm	Sq	42,39	μm
Rv	52,10	μm	Ssk	-0,11	–
Rc	107,49	μm	Sku	2,37	–
Rt	138,47	μm	Sp	103,66	μm
Rq	42,57	μm	Sv	147,47	μm
Rsk	0,38	–	Rozmiar obszaru	8964990,73	μm ²
Rku	1,84	–			
Rsm	2576,55	μm			
Rdq	0,15	–			
Długość próbkow.	3303,25	μm			

Na rysunkach 5.72 oraz 5.73 przedstawiono obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych, materiał pozyskany z torowiska tramwajowego oraz środek smarujący na bazie oleju lnianego wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.72. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 12 [opracowanie własne]



Rys. 5.73. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 12 [opracowanie własne]

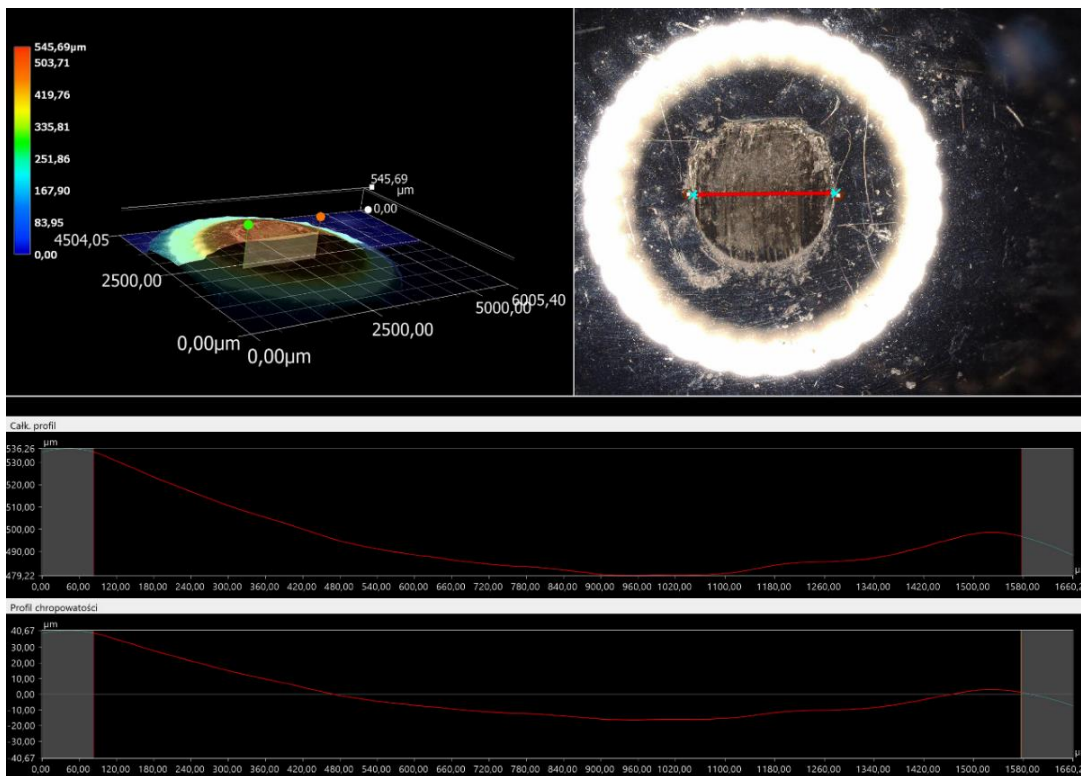
W tabeli 5.72 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku górnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych nr 12.

Tabela 5.72. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

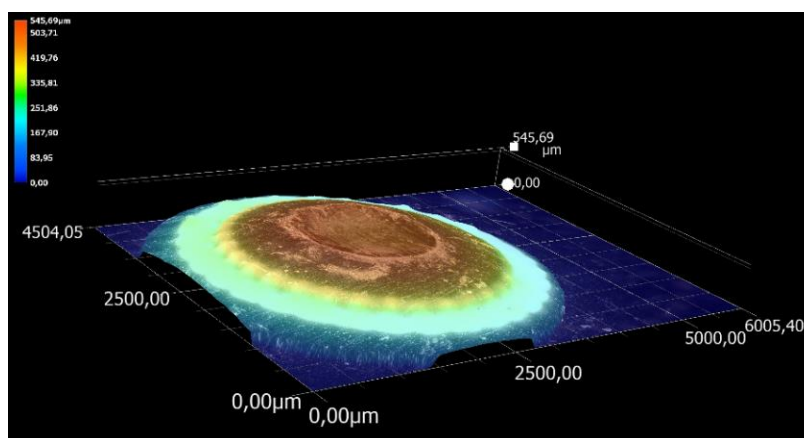
Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	29,50	μm	Sa	37,94	μm
Rz	140,12	μm	Sz	270,97	μm
Rp	38,93	μm	Sq	47,23	μm
Rv	101,20	μm	Ssk	-1,03	–
Rc	–	μm	Sku	3,97	–
Rt	140,83	μm	Sp	62,33	μm
Rq	34,31	μm	Sv	208,64	μm
Rsk	-0,43	–	Rozmiar obszaru	5859691,14	μm ²
Rku	2,65	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,11	–			
Długość próbkow.	2776,50	μm			

Zestaw badawczy nr 13

Na rysunkach 5.74 oraz 5.75 zaprezentowano obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych, materiał pozyskany z torowiska tramwajowego oraz środek smarujący na bazie dwusiarczku molibdenu wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.74. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 13 [opracowanie własne]



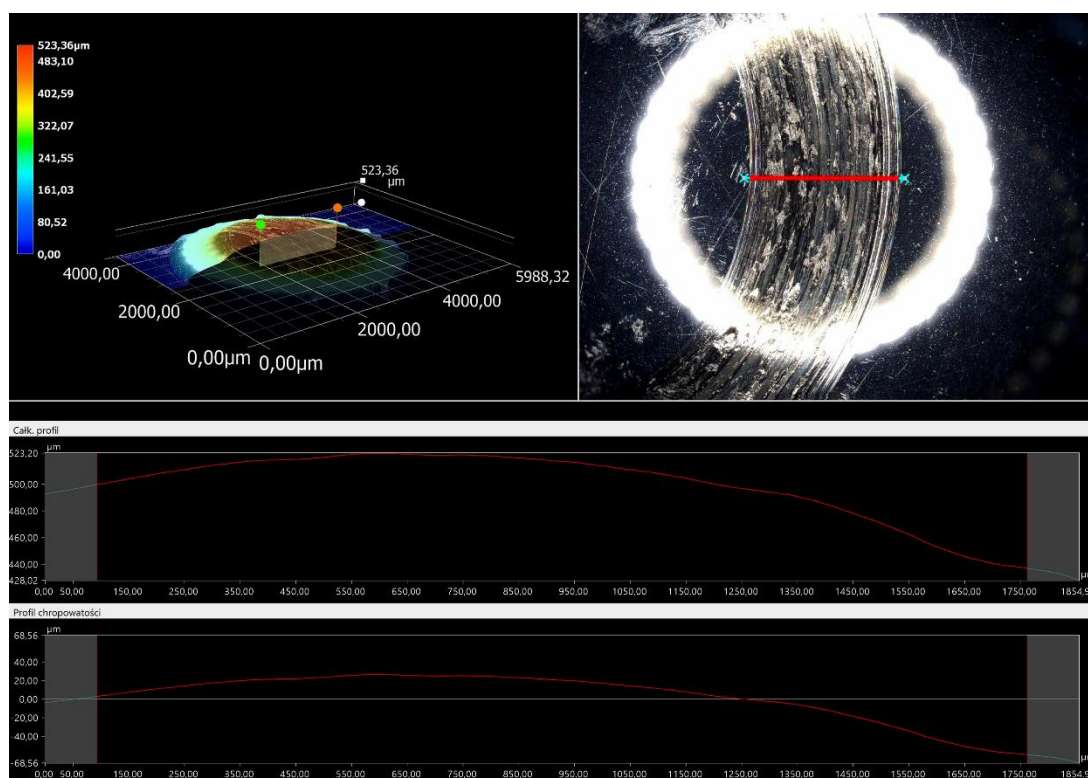
Rys. 5.75. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 13 [opracowanie własne]

W tabeli 5.73 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku dolnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 13.

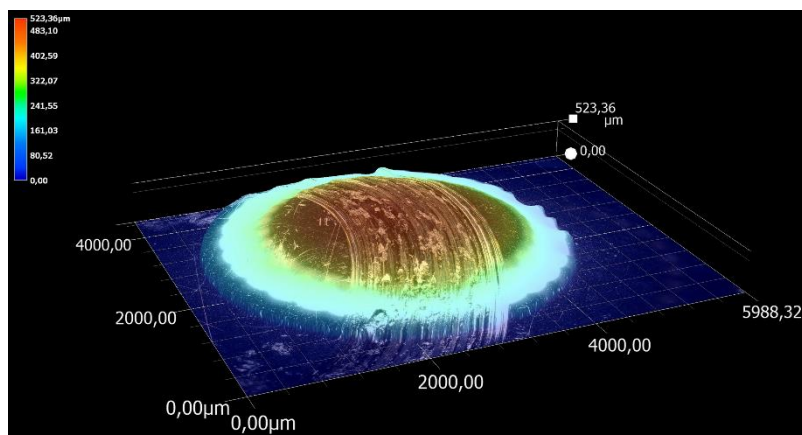
Tabela 5.73. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	11,97	μm	Sa	14,23	μm
Rz	55,46	μm	Sz	67,12	μm
Rp	39,10	μm	Sq	16,67	μm
Rv	16,36	μm	Ssk	0,33	–
Rc	–	μm	Sku	2,00	–
Rt	55,46	μm	Sp	38,87	μm
Rq	14,48	μm	Sv	28,25	μm
Rsk	0,77	–	Rozmiar obszaru	2445781,71	μm ²
Rku	2,89	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,06	–			
Długość próbkow.	1493,36	μm			

Na rysunkach 5.76 oraz 5.77 przedstawiono obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych, materiał pozyskany z torowiska tramwajowego oraz środek smarujący na bazie dwusiarczku molibdenu wykorzystywany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.76. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 13 [opracowanie własne]



Rys. 5.77. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 13 [opracowanie własne]

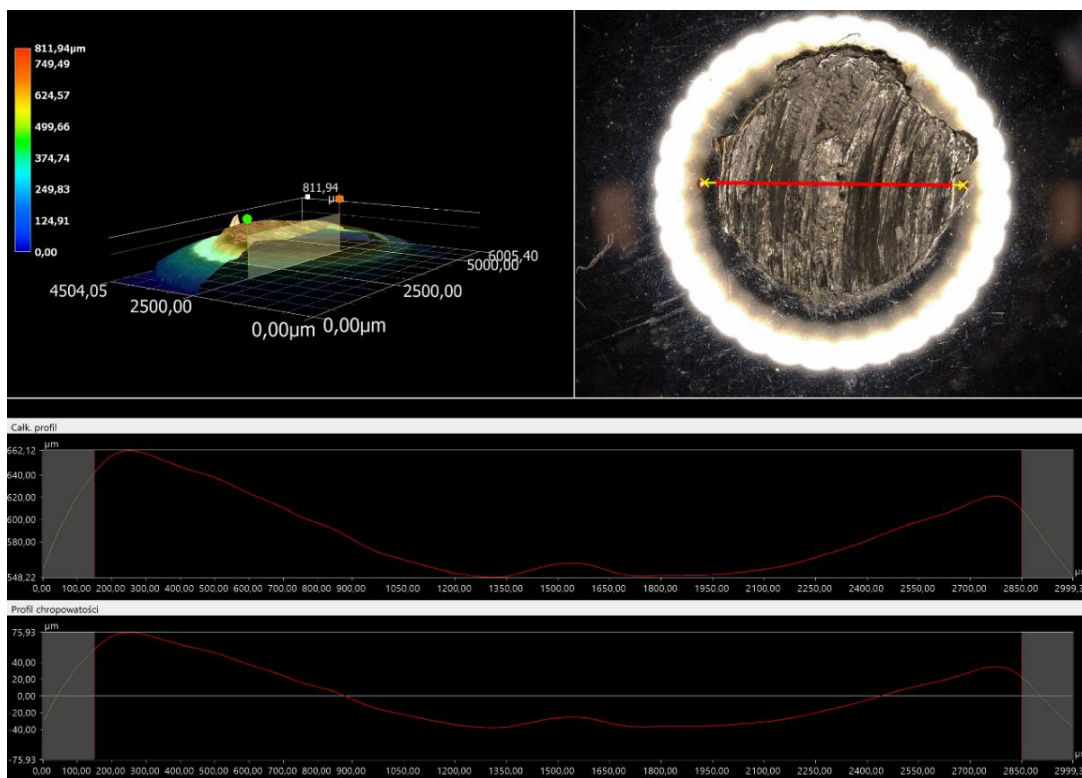
W tabeli 5.74 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku górnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 13.

Tabela 5.74. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

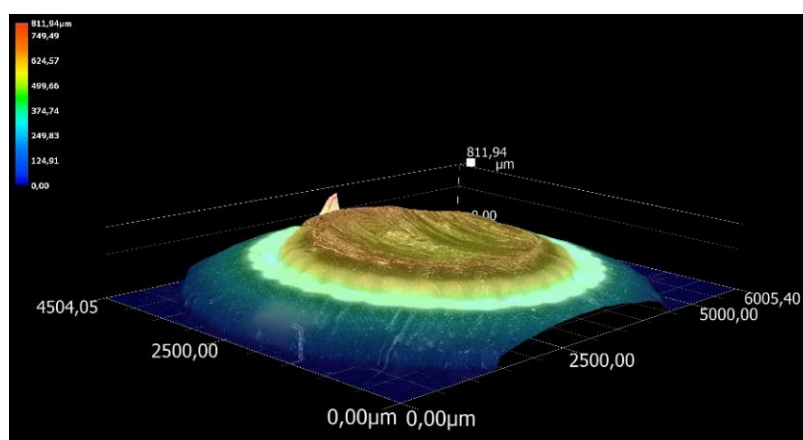
Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	21,01	μm	Sa	19,05	μm
Rz	85,96	μm	Sz	119,72	μm
Rp	26,62	μm	Sq	23,96	μm
Rv	59,34	μm	Ssk	-0,99	–
Rc	–	μm	Sku	3,18	–
Rt	86,09	μm	Sp	31,59	μm
Rq	25,04	μm	Sv	88,13	μm
Rsk	-0,77	–	Rozmiar obszaru	2074956,68	μm ²
Rku	2,63	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,08	–			
Długość próbkow.	1667,83	μm			

Zestaw badawczy nr 14

Na rysunkach 5.78 oraz 5.79 zaprezentowano obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych, materiał pozyskany z torowiska tramwajowego oraz stały środek smarujący w postaci sztyftu, który jest wykorzystywanych do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.78. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 14 [opracowanie własne]



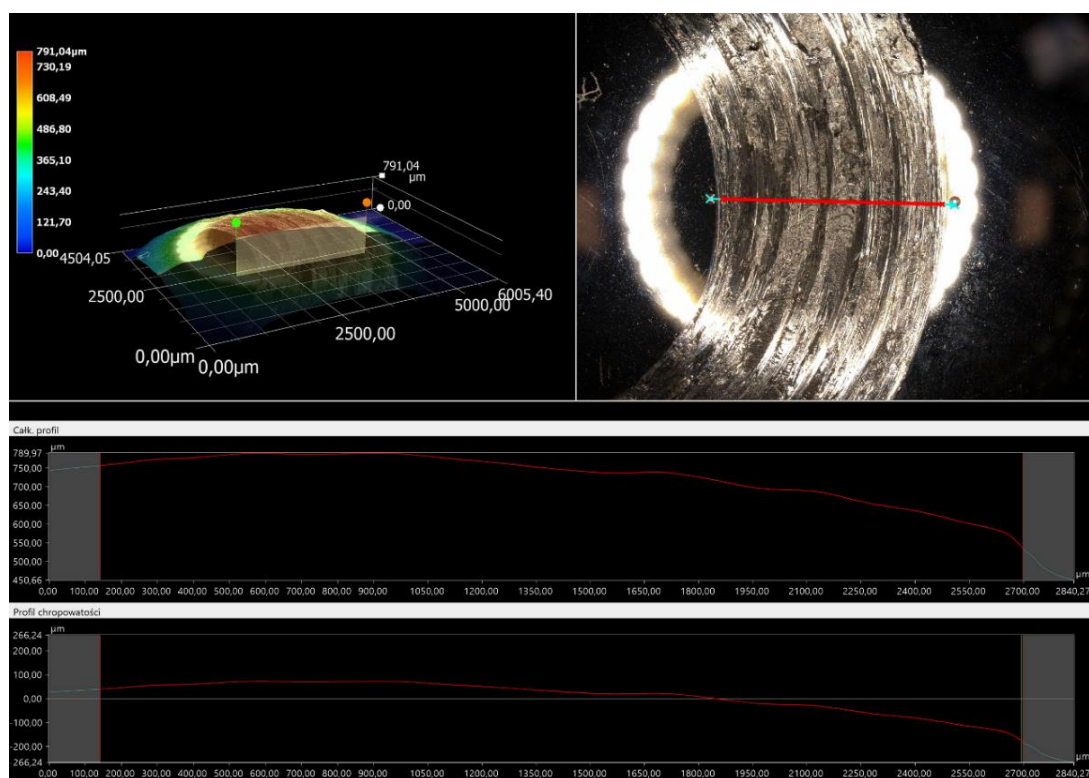
Rys. 5.79. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 14 [opracowanie własne]

W tabeli 5.75 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku dolnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 14.

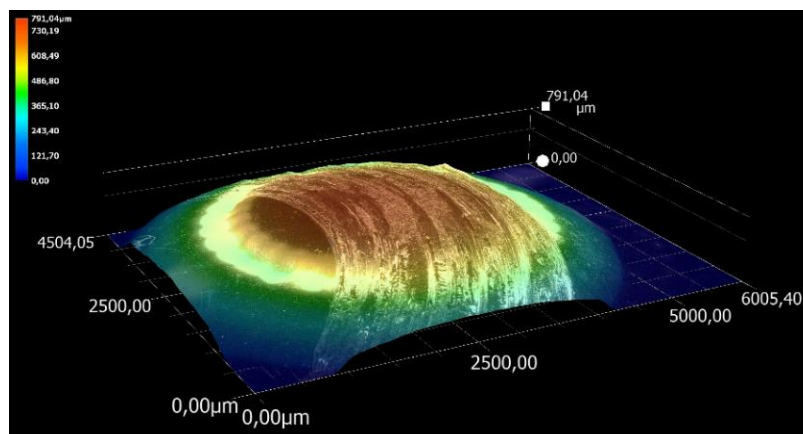
Tabela 5.75. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	31,00	μm	Sa	37,86	μm
Rz	113,90	μm	Sz	324,65	μm
Rp	75,93	μm	Sq	48,94	μm
Rv	37,96	μm	Ssk	-0,76	–
Rc	–	μm	Sku	4,88	–
Rt	113,90	μm	Sp	96,72	μm
Rq	35,48	μm	Sv	227,93	μm
Rsk	0,66	–	Rozmiar obszaru	8216284,88	μm ²
Rku	2,15	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,11	–			
Długość próbkow.	2698,96	μm			

Na rysunkach 5.80 oraz 5.81 przedstawiono obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych, materiał pozyskany z torowiska tramwajowego oraz stały środek smarujący w postaci sztyftu, który jest wykorzystywanych do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.80. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 14 [opracowanie własne]



Rys. 5.81. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 14 [opracowanie własne]

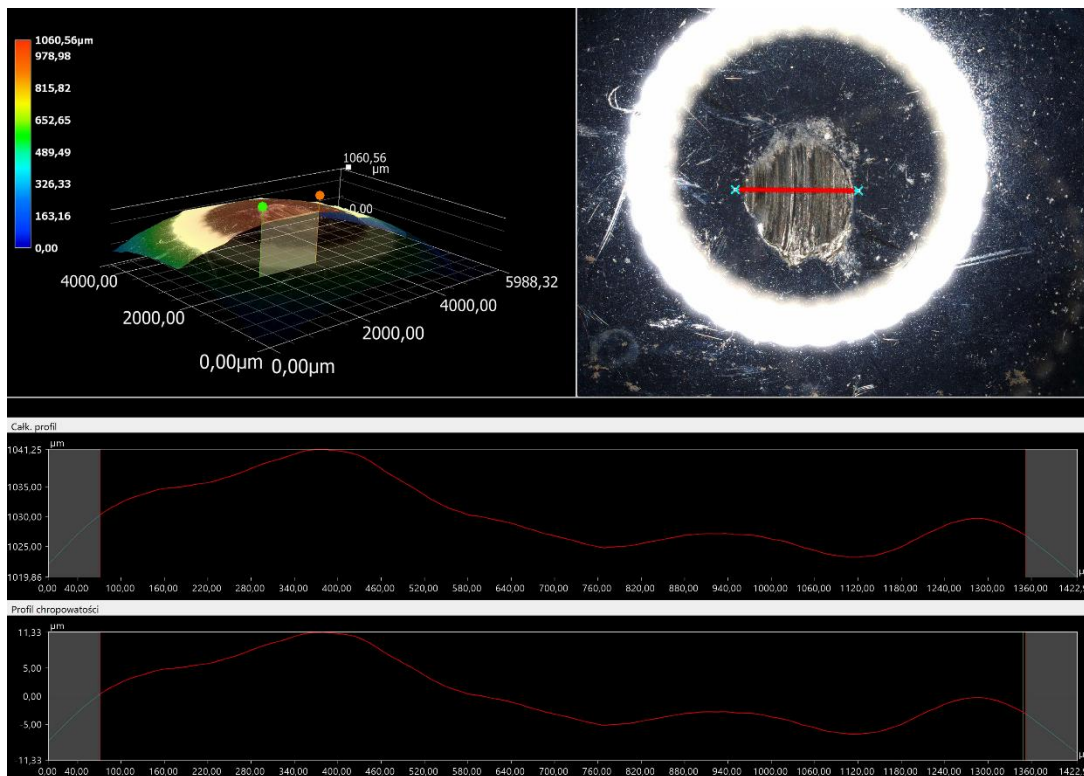
W tabeli 5.76 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku górnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 14.

Tabela 5.76. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

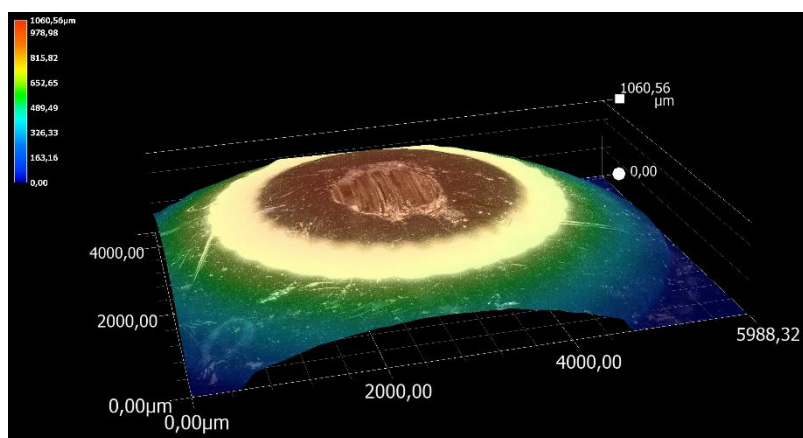
Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	54,79	μm	Sa	52,24	μm
Rz	249,56	μm	Sz	305,57	μm
Rp	73,07	μm	Sq	62,86	μm
Rv	176,50	μm	Ssk	-0,75	–
Rc	–	μm	Sku	2,95	–
Rt	251,81	μm	Sp	87,48	μm
Rq	63,17	μm	Sv	218,09	μm
Rsk	-0,43	–	Rozmiar obszaru	5154048,75	μm ²
Rku	2,29	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,17	–			
Długość próbkow.	2552,49	μm			

Zestaw badawczy nr 15

Na rysunkach 5.82 oraz 5.83 zaprezentowano obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadle do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych, materiał pozyskany z torowiska tramwajowego oraz autorski środek smarujący mogący zostać zastosowany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.82. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 15 [opracowanie własne]



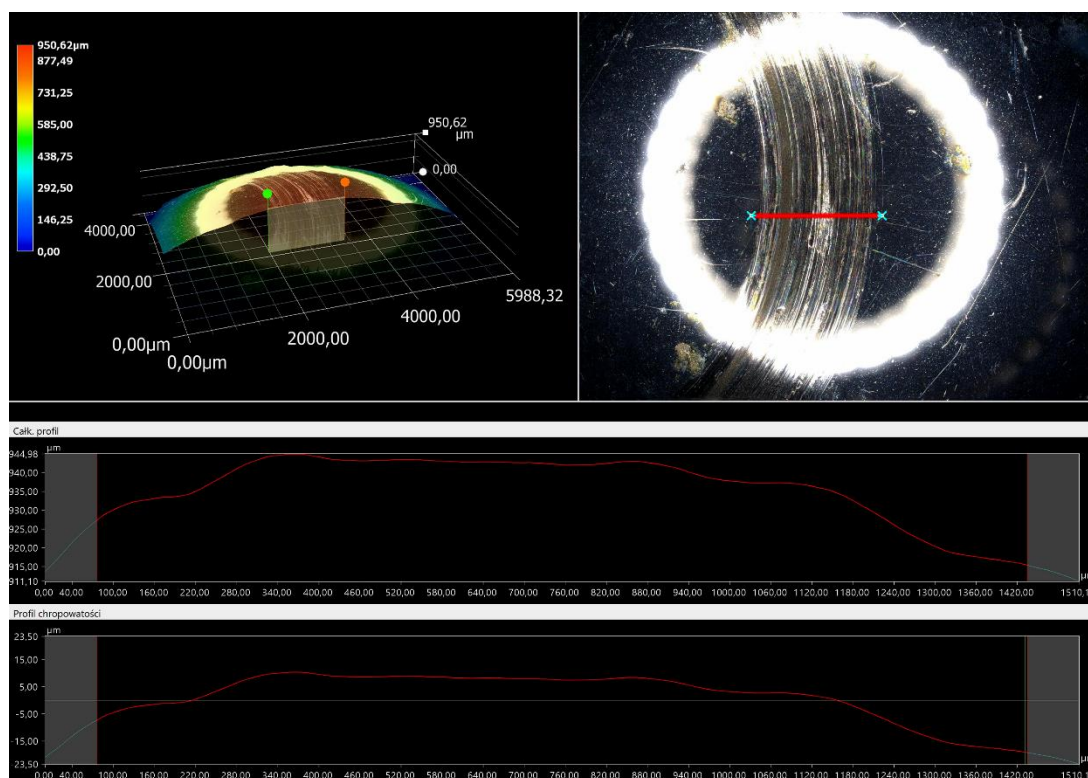
Rys. 5.83. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na dolnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 15 [opracowanie własne]

W tabeli 5.77 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku dolnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 15.

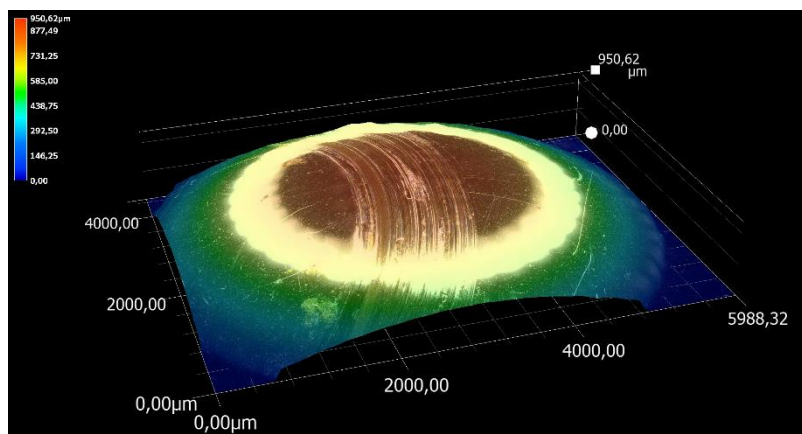
Tabela 5.77. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	4,61	μm	Sa	11,66	μm
Rz	18,06	μm	Sz	53,73	μm
Rp	11,33	μm	Sq	13,74	μm
Rv	6,74	μm	Ssk	0,48	–
Rc	–	μm	Sku	2,12	–
Rt	18,06	μm	Sp	30,36	μm
Rq	5,47	μm	Sv	23,37	μm
Rsk	0,90	–	Rozmiar obszaru	1275230,91	μm ²
Rku	2,32	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,04	–			
Długość próbkow.	1277,32	μm			

Na rysunkach 5.84 oraz 5.85 przedstawiono obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni (wyznaczonym prostopadłe do kierunku ruchu wężła tarcia), a także widok izometryczny tego śladu, zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej, zawierającej piasek kwarcowy, stosowany w piasecznicach wagonów tramwajowych, materiał pozyskany z torowiska tramwajowego oraz autorski środek smarujący mogący zostać zastosowany do smarowania obrzeży kół jezdnych pojazdów szynowych.



Rys. 5.84. Obraz śladu wytarcia wraz z przekrojem profilu powierzchni zidentyfikowany na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 15 [opracowanie własne]



Rys. 5.85. Widok izometryczny śladu wytarcia powstałego na górnej kulce pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 15 [opracowanie własne]

W tabeli 5.78 zestawiono otrzymane charakterystyczne parametry chropowatości wyznaczonego profilu linii oraz całej badanej powierzchni, w przypadku górnej kulki pomiarowej po biegu testowym z wykorzystaniem kompozycji badawczej nr 15.

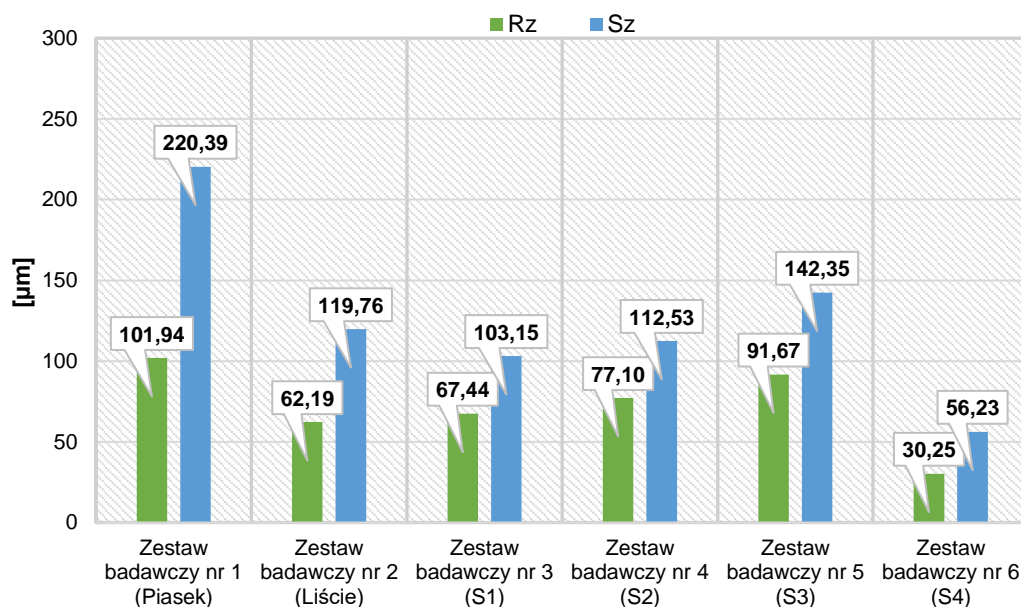
Tabela 5.78. Charakterystyczne wartości parametrów chropowatości profilu linii oraz badanej powierzchni [opracowanie własne]

Parametr	Wartość	Jednostka	Parametr	Wartość	Jednostka
Ra	7,34	μm	Sa	7,53	μm
Rz	29,40	μm	Sz	46,90	μm
Rp	10,38	μm	Sq	9,03	μm
Rv	19,03	μm	Ssk	-0,85	–
Rc	–	μm	Sku	2,98	–
Rt	29,50	μm	Sp	14,31	μm
Rq	8,56	μm	Sv	32,59	μm
Rsk	-0,43	–	Rozmiar obszaru	1397669,68	μm ²
Rku	2,23	–			
Rsm	–	μm			
Rdq	0,05	–			
Długość próbkow.	1356,25	μm			

Analiza struktury geometrycznej powierzchni modelowych kompozycji badawczych

Przeprowadzona na podstawie wyników badań przy użyciu mikroskopu cyfrowego VHX-7000, analiza struktury geometrycznej śladów wytarcia, powstałych na kulkach pomiarowych w trakcie testów, w warunkach określonych przez wszystkie kompozycje badawcze, pozwoliła wyznaczyć charakterystyczne parametry śladów wytarcia, biorąc pod uwagę profil powierzchni 2D, a także 3D. Umożliwiło to określenie wpływu modyfikatorów tarcia na stan powierzchni jednorodnych kulek pomiarowych, a następnie dokonanie oceny śladów wytarcia wraz z identyfikacją profilu ich chropowatości.

Na rysunku 5.86 zestawiono średnie wartości parametru Rz (maksymalna wysokość profilu chropowatości) i Sz (maksymalna wysokość chropowatości powierzchni), dotyczące śladów wytarcia, powstałych na dolnych kulkach pomiarowych w trakcie trwania testów z wykorzystaniem kompozycji badawczych od 1 do 6.

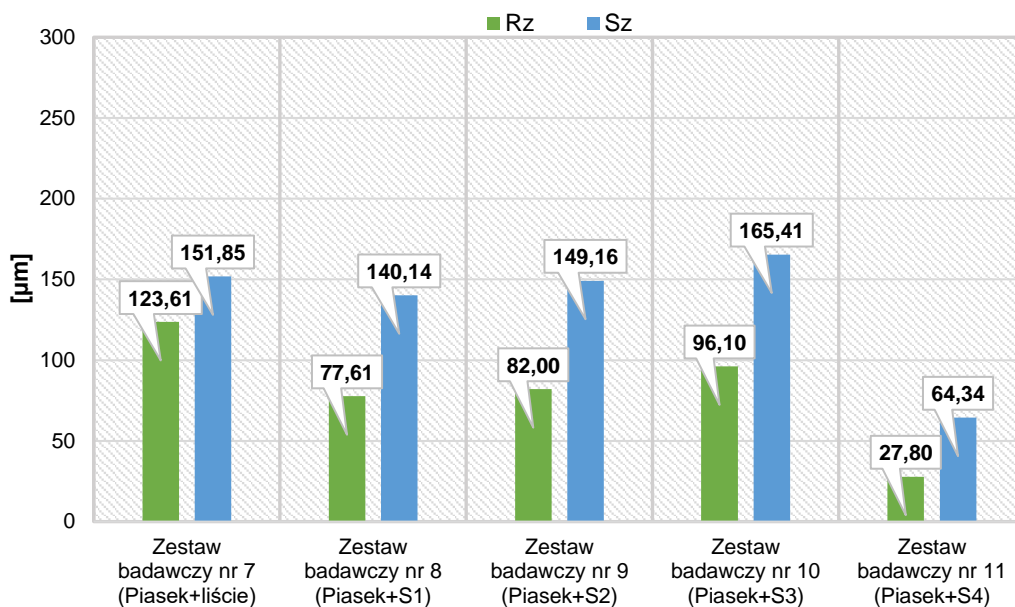


Rys. 5.86. Zestawienie średnich wartości parametru Rz i Sz powierzchni śladów wytarcia powstałych na dolnych kulkach pomiarowych w trakcie trwania testów z wykorzystaniem kompozycji badawczych od 1 do 6 [opracowanie własne]

Dla modelowych kompozycji badawczych, w skład których wchodziły substancje smarujące od S1 do S4, najmniejsze wartości parametrów Rz – 30,25 [µm] i Sz – 56,23 [µm] otrzymano w przypadku autorskiego środka smarującego (S4). W przypadku komercyjnych substancji smarujących, zalecanych przez producentów taboru tramwajowego, najniższe wartości Rz wynoszące 67,44 [µm] oraz Sz wynoszące 103,15 [µm], uzyskano przy zestawie badawczym, zawierającym środek smarujący na bazie oleju lnianego (S1). Z kolei najwyższe parametry chropowatości wyznaczono przy kompozycji badawczej S3, tzn. Rz – 91,67 [µm] oraz Sz – 142,35 [µm]. Natomiast w przypadku zestawu badawczego zawierającego piasek

kwarcowy, wyznaczono średnią wartość Rz równą 101,94 [μm] oraz Sz w granicach 220,39 [μm].

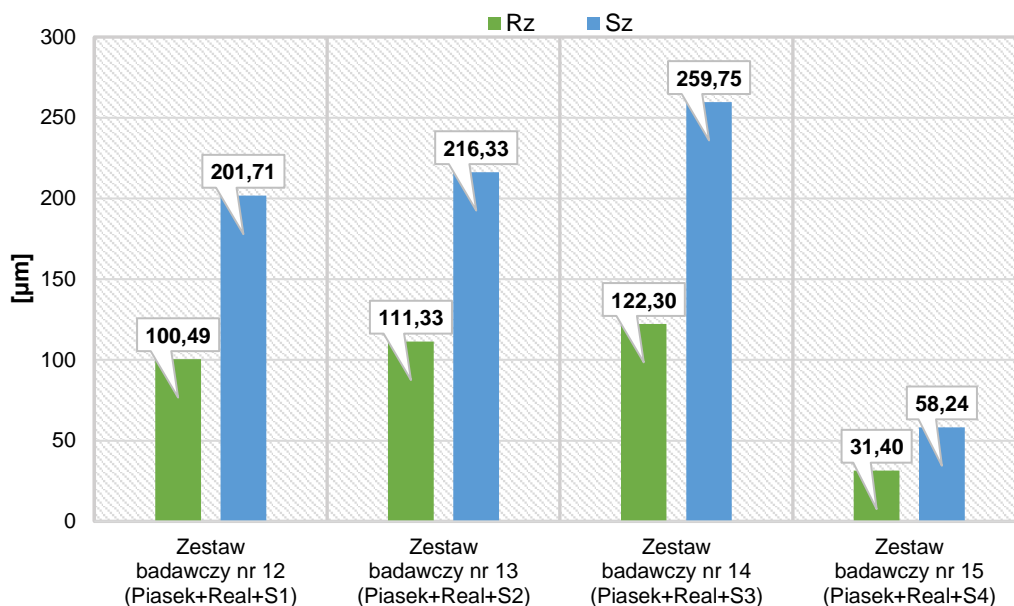
Na rysunku 5.87 zestawiono średnie wartości parametru Rz (maksymalna wysokość profilu chropowatości) i Sz (maksymalna wysokość chropowatości powierzchni), dotyczące śladów wytarcia, powstałych na dolnych kulkach pomiarowych w trakcie trwania testów z wykorzystaniem kompozycji badawczych od 7 do 11.



Rys. 5.87. Zestawienie średnich wartości parametru Rz i Sz powierzchni śladów wytarcia powstałych na dolnych kulkach pomiarowych w trakcie trwania testów z wykorzystaniem kompozycji badawczych od 7 do 11 [opracowanie własne]

W przypadku modelowych kompozycji badawczych, zawierających zanieczyszczenie w postaci piasku kwarcowego, najmniejsze wartości Rz – 27,80 [μm] i Sz – 64,34 [μm] otrzymano w przypadku autorskiego środka smarującego (Piasek+S4). Natomiast wśród pozostałych kompozycji badawczych, w skład których wchodziły komercyjne substancje smarujące, najlepsze parametry chropowatości zidentyfikowano przy zestawie badawczym, zawierającym płynny środek smarujący na bazie oleju lnianego (Piasek+S1), a najgorsze po badaniach z wykorzystaniem stałego środka smarującego (Piasek+S3). Z kolei przy kompozycji badawczej, składającej się z piasku kwarcowego oraz mokrych liści uzyskano wartości parametrów Rz - 123,61 [μm] oraz wartość Sz - 151,85 [μm].

Na rysunku 5.88 zestawiono średnie wartości parametru Rz (maksymalna wysokość profilu chropowatości) i Sz (maksymalna wysokość chropowatości powierzchni) dotyczącym śladów wytarcia, powstałych na dolnych kulkach pomiarowych w trakcie trwania testów z wykorzystaniem kompozycji badawczych od 12 do 15.



Rys. 5.88. Zestawienie średnich wartości parametru Rz i Sz powierzchni śladów wytarcia powstałych na dolnych kulkach pomiarowych w trakcie trwania testów z wykorzystaniem kompozycji badawczych od 12 do 15 [opracowanie własne]

Dla zestawów badawczych zawierających substancje smarujące od S1 do S4 oraz reprezentatywne dla warunków eksploatacji: piasek kwarcowy, a także mieszaninę zanieczyszczeń środowiskowych, w tym środków smarnych stosowanych na pojazdach oraz wykorzystywanych w smarownicach torowych (Real), najlepszy rezultat uzyskano przy autorskim środku smarującym (Piasek+Real+S4): Rz - 31,40 [µm] oraz Sz - 58,23 [µm]. Z kolei w przypadku pozostałych kompozycji badawczych, w skład których wchodziły komercyjne substancje smarujące, najlepsze parametry chropowatości otrzymano przy zestawie badawczym, zawierającym płynny środek smarujący na bazie oleju lnianego (Piasek+Real+S1), a najgorsze przy stałym środku smarującym w postaci sztyftu (Piasek+Real+S3).

Analizując struktury geometrycznej śladów wytarcia, powstałych na kulkach pomiarowych, z wykorzystaniem zestawów badawczych od S1 do S4, zauważalne jest iż maksymalna wysokość chropowatości powierzchni (Sz) w przypadku autorskiej substancji smarującej S4 w porównaniu do komercyjnych środków smarujących, wykorzystywanych przez tramwajowych operatorów komunikacji miejskiej, jest mniejsza 1,8-krotnie w stosunku do S1, 2-krotnie w stosunku do S2 oraz 2,5-krotnie w stosunku do S3. Zanieczyszczenie kompozycji badawczych, zawierających środki smarujące od S1 do S4, zarówno piaskiem kwarcowym (Piasek), jak również piaskiem kwarcowym i mieszaniną zanieczyszczeń środowiskowych (Real), spowodował we wszystkich wariantach wzrost wartości maksymalnej wysokości chropowatości powierzchni (Sz). W przypadku autorskiego środka smarującego (S4) zidentyfikowano wzrost wartości parametru Sz o około 4% w stosunku do zestawu badawczego zawierającego piasek kwarcowy i mieszaninę zanieczyszczeń środowiskowych (Piasek+Real+S4), a także o około 14% w stosunku do kompozycji badawczej Piasek+S4.

Proponowany przez autora niniejszej rozprawy środek smarujący, charakteryzował się we wszystkich wariantach wykonanych badań niskimi parametrami chropowatości. Stąd też wykorzystanie tego środka, celem smarowania obrzeży kół jezdnych, korzystanie wpłynie na jakość elementów współpracujących w układzie koło-szyna, co w konsekwencji przełoży się na niższą emisję hałasu. Ponadto parametr Sz w granicach 50 [μm] umożliwia tworzenie się tzw. kieszeni smarowych, wydłużających czas smarowania, co potwierdzają również inne opracowania naukowe, a także doświadczenie eksploatacyjne.

6. Podsumowanie i wnioski

Zagadnienia związane z miejscem styku koła jezdnego z główką szyny to interdyscyplinarna dziedzina, która od lat jest przedmiotem badań wielu ośrodków naukowych, obejmująca takie nauki takie jak m.in. tribologia, materiałoznawstwo, wytrzymałość materiałów, czy podstawy niezawodności. Wynika to z faktu, iż skojarzenie takich elementów współpracujących ma otwarty charakter, z dużym wpływem stale zmieniających się warunków eksploatacji, w tym zewnętrznych czynników środowiska. Celem naukowym niniejszej rozprawy doktorskiej było zbadanie wpływu wybranych czynników, wpływających na trwałość obręczy kół tramwajowych. Przeprowadzona szczegółowo analiza obecnego stanu wiedzy, a także pozyskane dane eksploatacyjne, dotyczące obręczy kół tramwajowych wybranych wagonów użytkowanych przez operatorów komunikacji w Polsce, były podstawą do podjęcia badań umożliwiających realizację założonego celu.

W pierwszej kolejności, w rozdziale 4.2 przeprowadzono badania wpływu typu konstrukcji układu biegowego na niezawodność i trwałość obręczy kół jezdnych, wybranych typów wagonów tramwajów. Uzyskane z kart pomiarowych dane eksploatacyjne, dotyczące średnicy okręgu tocznego koła jezdnego w zależności od przebytej drogi, pozwoliły na wyznaczenie trwałości umownej obręczy, za pomocą funkcji niezawodności $R(t)$ przy określonych warunkach eksploatacji.

Kolejno w rozdziale 5.4 dokonano oceny wpływu wybranych modyfikatorów tarcia, w tym komercyjnych substancji smarujących zalecanych przez wiodących producentów nowoczesnych niskopodłogowych wagonów tramwajowych, na intensywność zużycia i wartość współczynnika tarcia, z wykorzystaniem modelowych kompozycji badawczych, które odzwierciedlają rzeczywiste warunki eksploatacji w układzie koło - szyna. W tym celu przeprowadzono badania, przy wykorzystaniu zaplanowanych zestawów badawczych, na testerze tribologicznym T-02U, z wykorzystaniem metody polegającej na oznaczeniu obciążenia zacierającego P_t oraz granicznego nacisku zatarcia p_{oz} . Wyniki te umożliwiły w sposób pośredni określenie wpływu modyfikatorów tarcia na współpracę elementów skojarzonych w układzie koło-szyna.

Wykorzystane do badań tribologicznych kulki pomiarowe, pochodzące ze wszystkich kompozycji badawczych, zostały poddane analizie struktury geometrycznej śladów wytarcia przy użyciu mikroskopu cyfrowego VHX-7000. Miało to na celu określenie wpływu modyfikatorów tarcia na stan badanych powierzchni, poprzez identyfikację zmian mikrostruktury oraz wyznaczenie charakterystycznych parametrów chropowatości profilu powierzchni 2D i 3D.

Celem użytecznym pracy było opracowanie innowacyjnej substancji smarującej (składającej się z bezpiecznych dla środowiska składników), zmniejszającej intensywność procesów zużywania się kół, przy zachowaniu właściwych parametrów użytkowych wagonu tramwajowego. Zagadnienie to jest dość istotne, gdyż operatorzy

komunikacji tramwajowej dążą do wydłużenia czasu eksploatacji obręczy kół tramwajowych, co w konsekwencji skutkuje obniżeniem kosztów obsługi.

Podjęte w pracy działania i otrzymane wyniki, jak również analizy umożliwiają sformułowanie wniosków, które podzielono na trzy grupy: wnioski poznawcze, utylitarne oraz co do kierunków dalszych badań.

Wnioski poznawcze

Analiza przeprowadzonych badań, opisanych w niniejszej rozprawie, dotycząca wybranych czynników wpływających na trwałość obręczy kół tramwajowych, wykazała że:

- determinującym czynnikiem, wpływającym na intensywność zużycia obręczy kół jezdnych jest rodzaj rozwiązania konstrukcyjnego układu biegowego, zastosowanego w wagonach tramwajowych. Zgodnie z otrzymywanymi wynikami przeprowadzonych analiz, zastosowanie obrotowego wózka tocznego w wagonach typu NGT8, z rozprzęgniętymi zestawami kołowymi na osiach portalowych, umożliwia wydłużenie trwałości umownej obręczy aż o około 55% w stosunku do nieobrotowego wózka tocznego z osiami portalowymi, zabudowanego w wagonach typu NGT6;
- zalecane przez producentów taboru tramwajowego, komercyjne substancje smarujące obrzeża kół jezdnych, różnią się w zależności od składu i zawartych w nich dodatków, pod kątem skuteczności ochrony powierzchni przed zużyciem, co wykazano w sposób pośredni za pomocą modelowego skojarzenia badawczego;
- dodanie piasku kwarcowego do komercyjnych środków smarujących stosowanych na obrzeża kół jezdnych, celem odzwierciedlenia rzeczywistych warunków eksploatacji, skutkowało we wszystkich badanych wariantach zwiększeniem zużycia o około 5%;
- dodanie do kompozycji badawczych piasku kwarcowego oraz mieszaniny zanieczyszczeń pochodzących ze środowiska, spowodowało znacznie większy wzrost zużycia, aczkolwiek różnił się on w zależności od danego środka smarującego (od około 12% do nawet 50%).

Wnioski utylitarne

W ramach niniejszej pracy doktorskiej, sformułowano następujący wniosek o znaczeniu utylitarным:

- opracowana autorska substancja smarująca z uwagi na otrzymane najlepsze rezultaty odnośnie średniego zużycia oraz średniego współczynnika tarcia na obrzeżu koła jezdnego, który powinien wynosić nie więcej niż 0,1, cechuje się wysokim potencjałem wdrożeniowym.

Kierunki dalszych badań

Opisane w niniejszej rozprawie badania oraz ich wyniki skłaniają do podjęcia w tym zakresie dalszych prac, które będą miały na celu:

- przygotowanie autorskiej substancji smarującej, przeznaczonej do smarowania obrzeży kół jezdnych, dostosowanej do wymogów systemów smarowania obecnie wykorzystywanych w wagonach tramwajowych, co mogłoby potwierdzić skuteczność jej stosowania;
- opracowanie środka smarującego, który mogłoby zostać zastosowany bezpośrednio na główkę szyny w obrębie kręgu tocznego, gdzie niezbędna jest wysoka przyczepność, ze względu na wymagane właściwości trakcyjne, a w szczególności zachowanie normatywnych dróg hamowania;
- zaproponowanie uniwersalnego, wielosezonowego środka smarującego, który mógłby zostać zastosowany zarówno w obrębie kręgu tocznego, jak i boku obrzeża koła jezdnego, przy jednoczesnym zapewnieniu wymaganych właściwości trakcyjnych, jak również ograniczeniu intensywności zużycia elementów współpracujących w układzie koło-szyna;
- przeprowadzenie długodystansowych badań poligonowych, które potwierdzą skuteczność działania proponowanej substancji smarującej, w wybranych typach wagonów tramwajowych, w warunkach rzeczywistej eksploatacji;
- opracowanie, z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych, algorytmu dobierającego właściwości substancji smarującej, do konkretnego rozwiązania konstrukcyjnego układu biegowego, uwzględniającego dostosowanie do regionalnych warunków klimatycznych.

7. Bibliografia

- [1] K. Karwala i M. Michnej, Zestawy kołowe pojazdów szynowych. Wybrane zagadnienia. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2015.
- [2] „Bochumer Verein Verkehrstechnik GmbH”. <https://www.bochumer-verein.de>.
- [3] „BONATRANS GROUP a.s.” <https://www.ghh-bonatrans.com>.
- [4] J. Kolář, „Design of a wheelset drive”, Transactions on Electrical Engineering, t. 4, nr 1, 2015.
- [5] A. Chudzikiewicz (red.) i M. Kostrzewski (red.), Pojazdy tramwajowe z niezależnie obracającymi się kołami. Wybrane zagadnienia w zakresie modelowania i badania układu pojazd szynowy-tor w zastosowaniu do pojazdów tramwajowych. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2019.
- [6] „TRANSPORT SZYNOWY”. <https://www.transportszynowy.pl>.
- [7] S. Guzowski, M. Michnej, i G. Zając, „Tribological wear of wheel rims in rail vehicles in operating conditions”, Tribologia, t. 268, nr 4, 2016.
- [8] G. Zając i S. Jurga, „Badania trwałości obręczy kół tramwajowych eksploatowanych w MPK S.A. w Krakowie”, Problemy Eksploatacji, nr 2, 2009.
- [9] M. Słowiński, „Materials used in the structure of rail vehicle wheels”, Pojazdy Szynowe / Rail Vehicles, nr 4, 2021.
- [10] „PN-H-84027-06, Stal dla kolejnictwa - Obręcze do kół pojazdów szynowych - Gatunki”.
- [11] S. Jurga i I. Zwierzyk-Klimek, „Diagnostyka kół pojazdów szynowych, w aspekcie poprawy ich trwałości, w nowoczesnych systemach transportu miejskiego”, Zeszyty Naukowe. Transport / Politechnika Śląska, t. 60, 2005.
- [12] S. Grulkowski i J. Zariczny, „Znaczenie dopasowania układu koło-szyna w transporcie tramwajowym - przegląd doświadczeń”, TTS Technika Transportu Szynowego, t. 9, 2012.
- [13] S. Finke, T. Piechowiak, K. Bryk, i A. Sienicki, „Proposal to modify the wheel profile of Poznan Fast Tram”, Pojazdy Szynowe / Rail Vehicles, nr 4, 2016.
- [14] T. Staśkiewicz, „Kształtowanie profilu koła tramwajowego w aspekcie oddziaływania dynamicznego z szyną”, Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, 2020.
- [15] „PN-K-88251, Zestawy kołowe taboru tramwajowego - Kontur bieżni kół elastycznych wagonów tramwajowych”.
- [16] „PN-K-92016, Tramwajowe zestawy kołowe, elastyczne - Obręcze obrobione - Wymagania i badania”.
- [17] S. Kwaśniewski, F. J. Restel, i Ł. Wolniewicz, „Problemy zużycia szyn i kół tramwajowych w warunkach wrocławskich”, Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej. Transport, t. 115, 2017.
- [18] G. Zając, Wieloaspektowe badania empiryczne z zakresu zużycia obręczy kół pojazdów szynowych. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2019.
- [19] Z. Romaniszyn, Podwozia wózkowe pojazdów szynowych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2005.
- [20] J. Makuch, „Koleje miejskie, Konstrukcje torów tramwajowych, wykład, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Politechnika Wrocławska”. <http://www.zits.pwr.wroc.pl/makuch>.

- [21] T. Czauderna, „Konstrukcje torów tramwajowych”, TTS Technika Transportu Szynowego, nr 9, 2004.
- [22] „PN-EN 14811:2019-06, Kolejnictwo - Tor - Szyny specjalne - Szyny rowkowe i związane z nimi profile konstrukcyjne”.
- [23] „PN-EN 13674-1+A1:2017-07, Kolejnictwo - Tor - Szyna - część 1: Szyny kolejowe Vignole'a o masie 46 kg/m i większej”.
- [24] R. Lewis i U. Olofsson, „Mapping rail wear regimes and transitions”, *Wear*, t. 257, nr 7–8, 2004.
- [25] Y. Ye, Y. Sun, S. Dongfang, D. Shi, i M. Hecht, „Optimizing wheel profiles and suspensions for railway vehicles operating on specific lines to reduce wheel wear: a case study”, *Multibody System Dynamics*, t. 51, nr 1, 2021.
- [26] H. Soleimani i M. Moavenian, „Tribological Aspects of Wheel–Rail Contact: A Review of Wear Mechanisms and Effective Factors on Rolling Contact Fatigue”, *Urban Rail Transit*, t. 3, nr 4, ss. 227–237, 2017.
- [27] A. Chudzikiewicz i J. Korzeb, „Simulation study of wheels wear in low-floor tram with independently rotating wheels”, *Archive of Applied Mechanics*, t. 88, nr 1–2, 2018.
- [28] F. W. Carter, „On the action of a locomotive driving wheel”, *Proceedings of the Royal Society of London.*, t. 112, 1926.
- [29] O. Polach, „Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit”, *Wear*, t. 258, nr 7, 2005.
- [30] R. Galas, „Friction modification within wheel-rail contact”, doctoral thesis, Brno University of Technology, 2017.
- [31] Y. Zhu, „Adhesion in the wheel-rail contact”, doctoral thesis, Royal Institute of Technology, 2013.
- [32] E. Vollebregt, „Detailed wheel/rail geometry processing with the conformal contact approach”, *Multibody System Dynamics*, t. 52, nr 2, 2021.
- [33] S. Iwnicki (eds.), M. Spiryagin (eds.), C. Cole (eds.), i T. McSweeney (eds.), *Handbook of railway vehicle dynamics*, Second edition. CRC Press, 2019.
- [34] A. Chudzikiewicz, B. Sowiński, i A. Szulczyk, „Zagrozenie bezpieczeństwa ruchu pojazdów szynowych spowodowane stanem toru”, *Problemy Eksploatacji*, nr 4, 2009.
- [35] M. Dusza, „Wpływ czynników środowiskowych na stateczność i bezpieczeństwo ruchu modelu pojazdu szynowego”, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, t. 105, 2015.
- [36] T. Staśkiewicz i T. Nowakowski, „Analiza współpracy koła tramwajowego z szyną w warunkach rzeczywistej eksploatacji”, *Problemy Kolejnictwa*, t. 60, nr 171, 2016.
- [37] S. Jurga i P. Piec, „Metoda monitoringu zużycia kół jezdnych tramwaju”, *Pojazdy Szynowe*, t. 3, 2002.
- [38] J. Kalousek i E. Magel, „Modifying and managing friction”, n: *Railway Track & Structures*, t. 93, 1997.
- [39] R. Lewis (eds.) i U. Olofsson (eds.), *Wheel-rail interface handbook*. Woodhead Publishing, 2009.
- [40] U. Olofsson, Y. Zhu, S. Abbasi, R. Lewis, i S. Lewis, „Tribology of the wheel-rail contact-aspects of wear, particle emission and adhesion”, *Vehicle System Dynamics*, t. 51, nr 7, 2013.

- [41] A. Chudzikiewicz i I. Góra, „Modelowanie i koncepcja badań symulacyjnych właściwości dynamicznych kolejowego zestawu kołowego z zastosowaniem innowacyjnych powłok samosmarownych”, *Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej*, t. 118, 2017.
- [42] R. Żuchowski, A. Nowoświat, i I. Kucharski, „Reduction of tram noise by using a rail lubrication device”, *Applied Acoustics*, t. 210, 2023.
- [43] „Zarząd Dróg Miasta Krakowa - Wytyczne w zakresie projektowania infrastruktury w ramach zadań realizowanych przez jednostkę; Załącznik nr 5 - Wytyczne do projektowania infrastruktury tramwajowej”. <https://zdmk.krakow.pl/>.
- [44] W. Czyczuła i M. Rochel, „Operational problems of tramway infrastructure in sharp curves”, *Technical Transactions*, 2021.
- [45] „SKF Group - Managing friction successfully”. <https://www.skf.com/>.
- [46] „Bibus Menos sp. z o.o.” <https://www.bibusmenos.pl>.
- [47] P. Szablowska i M. Rochel, „Ways of protection from noise pollution in railway and tramway infrastructure”, *Journal of Civil Engineering and Transport*, t. 2, nr 1, 2020.
- [48] V. Deák, „Zmniejszanie hałasu podczas jazdy tramwajów po łuku – system smarowania obrzeży kół”, *Technika Transportu Szynowego*, t. 7–8, 2004.
- [49] A. Wójtowicz i H. Bąkowski, „Oszczędności wynikające ze smarowania obrzeży kół w łukach o różnym promieniu”, *TTS Technika Transportu Szynowego*, nr 2–3, 2013.
- [50] „Sécheron SA - Wheel flange lubricators”. <https://www.secheron.com>.
- [51] „REBS Zentralschmiertechnik GmbH - wheel flange lubrication”. <https://www.rebs.de>.
- [52] „AW SOLUTIONS - NSP-WFL Ekologiczny system smarowania obrzeży kół”. <https://aw-solutions.pl>.
- [53] S. R. Lewis, S. Riley, D. I. Fletcher, i R. Lewis, „Optimisation of a railway sanding system for optimal grain entrainment into the wheel–rail contact”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, t. 232, nr 1, 2018.
- [54] R. Dychto i R. Pietruszewski, „Badania procesu hamowania pojazdu szynowego”, *AUTOBUSY – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, nr 12, 2016.
- [55] „Sanding Systems”. <https://www.knorr-bremsecvs.com>.
- [56] „BN-70/6726-01, Tabor kolejowy - Pojazdy trakcyjne - Piasek do piasecznic”.
- [57] A. Sowa, „Teoria eksploatacji i diagnostyka pojazdów szynowych: zagadnienia wybrane”, *Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, 2019.
- [58] S. Płaza (red.), L. Margielewski (red.), i G. Celichowski (red.), *Wstęp do tribologii i tribochemia*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, 2005.
- [59] M. Pasieczko (red.) i M. Kindrachuk (red.), *Tribologia*. Politechnika Lubelska, 2017.
- [60] A. Brzeźny, J. Marszałek, i A. Sowa, „Kryteria decyzyjne odnowy zarysu kół kolejowych”, *TTS Technika Transportu Szynowego*, nr 10, 2014.
- [61] M. Sobaś, „Wheel wear during the operation of rail vehicles. Causes and effects”, *Pojazdy Szynowe / Rail Vehicles*, nr 2, 2021.
- [62] S. Kowalski i P. Lachowski, „Wybrane uszkodzenia i zużycia zestawów kołowych pojazdów szynowych”, *AUTOBUSY – Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe*, nr 12, 2018.
- [63] P. Piec, „Studium eksploatacyjne zużycia zestawów kołowych pojazdów szynowych w aspekcie holistycznej tribologii”, *Logistyka*, t. 6, 2015.

- [64] M. Górowski, „Hamulce w pojazdach szynowych. Podstawowa charakterystyka, budowa i eksploatacja”, *Paragraf na drodze*, nr 2/2023, 2023.
- [65] S. M. Zakharov i I. G. Goryacheva, „Rolling contact fatigue defects in freight car wheels”, *Wear*, t. 258, nr 7, 2005.
- [66] M. Słowiński, „The characteristics of the selected types of wheel wear and their effect on the rail vehicle – track interaction”, *Rail Vehicles/Pojazdy Szynowe*, nr 1–2, 2022.
- [67] J. V. . R. Silva e Silva, F. A. Antonioli, C. S. Endlich, A. C. Pires, C. Scandian, i G. F. M. dos Santos, „Influence of wheel tread wear on Rolling Contact Fatigue and on the dynamics of railway vehicles”, *Wear*, t. 523, 2023.
- [68] M. Paczkowska, Ł. Wojciechowski, G. Kinal, K. Ostrowska, i P. Okoniewicz, „Analiza efektów zużywania się wybranych obręczy kół tramwajowych w aglomeracji poznańskiej”, *Inżynieria Materiałowa*, t. 36, nr 6, 2015.
- [69] Ł. Wojciechowski, B. Gapiński, B. Firlik, i T. G. Mathia, „Characteristics of tram wheel wear: Focus on mechanism identification and surface topography”, *Tribology International*, t. 150, 2020.
- [70] S. Grulkowski i J. Zariczny, „Charakterystyka zużyć, wad i uszkodzeń szyn w torach tramwajowych”, *Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji w Krakowie*, nr 2, 2015.
- [71] M. Kostrzewski i R. Konowrocki, „Ocena stanu wybranych odcinków toru testowego z wykorzystaniem wskaźnika jakości toru”, *Pojazdy Szynowe*, t. 2, 2014.
- [72] W. A. Bednarek, „Zużycie faliste szyn toru kolejowego (przyczyny i środki zaradcze)”, *Archiwum Instytutu Inżynierii Lądowej*, nr 20, 2015.
- [73] A. Chudzikiewicz, *Elementy diagnostyki pojazdów szynowych*. Warszawa-Radom: Politechnika Warszawska i Instytut Technologii Eksploatacji, 2002.
- [74] S. Niziński (red.) i R. Michalski (red.), *Utrzymanie pojazdów i maszyn*. Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, 2007.
- [75] M. Hebda, T. Mazur, i H. Pelc, *Teoria eksploatacji pojazdów*. Warszawa: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 1978.
- [76] A. Sowa, *Ocena stanu technicznego pojazdów szynowych na podstawie cech zdeterminowanych*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2013.
- [77] M. Kuźnar, *Metoda trójwartościowej oceny stanu technicznego nakładki ślizgowej odbieraka prądu pojazdu szynowego*. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2020.
- [78] B. Firlik, T. Staśkiewicz, W. Jaśkowski, i L. Wittenbeck, „Optimisation of a tram wheel profile using a biologically inspired algorithm”, *Wear*, t. 430–431, 2019.
- [79] Z. Chen, L. Ling, Y. Sun, Y. Zhou, K. Wang, i W. Zhai, „Optimization of a tram wheel profile to reduce flange wear on sharp curves”, *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, t. 2, 2020.
- [80] B. Liu, T. X. Mei, i S. Bruni, „Design and optimisation of wheel-rail profiles for adhesion improvement”, *Vehicle System Dynamics, International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility*, t. 54, nr 3, 2016.
- [81] D. Crosbee, P. D. Allen, i R. Carroll, „Analysis of design and performance of tram-train profiles for dual-operation running”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, t. 231, nr 5, 2017.

- [82] Á. Vinkó i P. Bocz, „Proposal for the wheel profile of the new tram-train vehicle in Hungary”, Proceedings of the 4th International Conference on Road and Rail Infrastructure – CETRA 2016: Road and Rail Infrastructure IV, 2016.
- [83] R. K. Steele i R. P. Reiff, „Rail: its behaviour and relationship to total system wear”, Proceedings of the 2nd Heavy Haul Conference, 1982.
- [84] R. Lewis, P. Christoforou, W. J. Wang, A. Beagles, M. Burstow, i S. R. Lewis, „Investigation of the influence of rail hardness on the wear of rail and wheel materials under dry conditions (ICRI wear mapping project)”, *Wear*, t. 430–431, 2019.
- [85] J.-W. Seo, H.-M. Hur, i S.-J. Kwon, „Effect of mechanical properties of rail and wheel on wear and rolling contact fatigue”, *Metals*, t. 12, nr 4. 2022.
- [86] Y. Hu i in., „Experimental study on wear properties of wheel and rail materials with different hardness values”, *Wear*, t. 477, 2021.
- [87] Y. Hu i in., „Investigation on wear and rolling contact fatigue of wheel-rail materials under various wheel/rail hardness ratio and creepage conditions”, *Tribology International*, t. 143, 2020.
- [88] S. Żak, T. Zygmunt, J. Kasprówicz, i K. Kozera, „Nowy gatunek stali na szyny tramwajowe”, *TTS Technika Transportu Szynowego*, nr 3, 2018.
- [89] M. Tsadik i D. Tilahun, „Extent of adhesion losses in the wheel-rail contact under contaminated conditions”, *Journal of the European Economic Association*, t. 147, 2016.
- [90] C. Hardwick, R. Lewis, i U. Olofsson, „Low adhesion due to oxide formation in the presence of NaCl”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, t. 228, 2013.
- [91] D. Y. Antipin, V. I. Vorobiev, O. A. Shishkina, i D. A. Bondarenko, „Modern methods of modifying the frictional state of the wheel-rail system”, *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, nr 1, 2021.
- [92] H. Bąkowski, „The influence of solid lubricants used for the lubrication of wheel flanges on railways to reduce the corrosion of rails”, *Tribologia*, t. 268, nr 4, 2016.
- [93] R. Melnik, A. Chudzikiewicz, S. Koziak, M. Opala, i J. Dižo, „Dynamic properties and wear analysis of a rail vehicle with wheels' self-lubricating coatings”, *Communications - Scientific Letters of the University of Žilina*, t. 23, nr 1, 2021.
- [94] J. Pombo, J. Ambrósio, M. Pereira, R. Dwyer-Joyce, C. Ariado, i N. Kuka, „A railway wheel wear prediction tool based on a multibody software”, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, t. 48, 2010.
- [95] A. Ekberg, E. Kabo, i R. Lundén, „Rail and wheel health management”, *Wear*, t. 526–527, 2023.
- [96] B. Firlik, T. Staśkiewicz, i M. Słowiński, „Thermal imaging of the wheel-rail interface”, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 2023.
- [97] „PN-K-92008, Komunikacja miejska - Skrajnia kinematyczna wagonów tramwajowych”.
- [98] „PN-EN 13306:2018-01, Obsługiwanie - Terminologia dotycząca obsługiwaniania”.
- [99] S. Legutko, *Eksplatacja maszyn*. Poznań: Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, 2007.
- [100] E. Macha i A. Niesłony, *Niezawodność systemów mechatronicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2010.

- [101] S. Młynarski, Problemy prognozowania niezawodności pojazdów eksploatowanych w transporcie drogowym. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2018.
- [102] „Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne S.A. w Krakowie”. <https://www.mpk.krakow.pl/>.
- [103] J. Kołodziej, „Krakowskie tramwaje NGT6 – druga seria”, Technika Transportu Szynowego, t. 5, 2003.
- [104] Q. Li i in., „Analysis on the effect of starved elastohydrodynamic lubrication on the adhesion behavior and fatigue index of wheel-rail contact”, Wear, t. 510–511, 2022.
- [105] J. X. Li i in., „Wear and damage behaviours of wheel and rail materials: Effects of friction modifier and environmental temperature”, Wear, t. 523, 2023.
- [106] Z. Lawrowski, Tribologia: tarcie, zużywanie i smarowanie. Wydawnictwo Naukowe PWN, 1993.
- [107] R. Michalczewski, W. Piekoszewski, M. Szczerek, i W. Tuszyński, „The lubricant-coating interaction in rolling and sliding contacts”, Tribology International, t. 42, nr 4, 2009.
- [108] R. I. Amaro, R. C. Martins, J. O. Seabra, N. M. Renevier, i D. G. Teer, „Molybdenum disulphide/titanium low friction coating for gears application”, Tribology International, t. 38, nr 4, 2005.
- [109] M. Steinmann, A. Müller, i H. Meerkamm, „A new type of tribological coating for machine elements based on carbon, molybdenum disulphide and titanium diboride”, Tribology International, t. 37, nr 11, 2004.
- [110] A. Xie i in., „Enabling ultra-low wear and long-lived lubrication by DLC–supramolecular gel composite lubrication system under extreme contact stress”, Tribology International, t. 193, s. 109364, 2024.
- [111] J. Namieśnik (red.) i P. Konieczko (red.), „Ocena i kontrola jakości wyników pomiarów analitycznych”, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2017.
- [112] M. Barszcz, Wpływ samoorganizacji powierzchni podczas tarcia powłok ze stopu eutektycznego Fe-Mn-C-B na trwałość wybranych elementów maszyn. Rozprawa doktorska, Politechnika Lubelska, 2015.
- [113] Aparat czterokulowy T-02U. Radom: Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Technologii Eksploatacji.
- [114] Uniwersalny aparat czterokulowy T-02U do tribologicznych badań środków smarowych i materiałów konstrukcyjnych. Radom: Instytut Technologii Eksploatacji - Państwowy Instytut Badawczy.
- [115] M. Kalbarczyk, R. Michalczewski, W. Piekoszewski, i M. Szczerek, „The influence of oils on the scuffing of concentrated friction joints with low-friction coated elements”, Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability, t. 15, nr 4, 2013.
- [116] „PN-75/M-86452, Łożyska toczne, Kulki”.
- [117] A. Chodkiewicz i T. Kałdoński, „Analiza krajowych norm dotyczących badania właściwości smarnościowych na aparatach czterokulowych stosowanych w Polsce”, Biuletyn Wojskowej Akademii Technicznej, t. 69, nr 1, 2020.
- [118] „PN-76/C-04147, Przetwory naftowe, Badanie właściwości smarnych olejów i smarów”.
- [119] R. Michalczewski, M. Szczerek, W. Tuszyński, i J. Wulczyński, „Aparat czterokulowy do badania właściwości przeciwzuzyciowych, przeciwzatarciowych i powierzchniowej trwałości zmęczeniowej z możliwością podgrzewania środka smarowego”, Tribologia, t. nr 1, nr 48, 2009.

- [120] A. Matuszewska, „Tribologiczna ocena efektywności środków smarowych przeznaczonych do stalowych węzłów tarcia”, Rozprawa doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków, 2008.
- [121] M. Malinowska i D. Zera, „Analiza zmian smarności oleju silnikowego stosowanego w silniku Cegielski-Sulzer 3AL25/30”, Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni, t. 96, 2016.
- [122] „PN-EN 13979-1, Kolejnictwo, Zestawy kołowe i wózki, Koła monoblokowe, Procedura zatwierdzenia technicznego, Część 1: Koła kute i walcowane”.
- [123] T. Kuminek, „Wpływ obciążenia tramwaju na przemieszczenie elementów elastycznego koła tramwajowego”, Zeszyty Naukowe. Transport / Politechnika Śląska, t. 81, 2013.
- [124] „Keyence International (Belgium) NV/SA”. <https://www.keyence.com/>.
- [125] A. Gnatowski, R. Gołębski, J. Petru, i M. Pagac, „Analysis of thermomechanical properties and the influence of machining process on the surface structure of composites manufactured from metal chips with a polymer matrix.”, Polymers, t. 14, nr 17, 2022.

Streszczenie

Komunikacja tramwajowa, obsługująca duże potoki pasażerskie, stanowi kluczowy element publicznego transportu zbiorowego w aglomeracjach miejskich. Jej konkurencyjność wobec transportu samochodowego, wiąże się z zapewnieniem odpowiedniej niezawodności i efektywności ekonomicznej, o której w dużej mierze decyduje stan techniczny taboru oraz jakość nawierzchni torowej. Stąd też kluczowe jest badanie zjawisk, zachodzących w układzie koło – szyna, które ze względu na współpracę w warunkach otwartego węzła tarcia, stanowią zagadnienie interdyscyplinarne, łączące wiele dziedzin nauki takich jak: metaloznawstwo, tribologia, wytrzymałość materiałów, podstawy niezawodności oraz dynamika pojazdów, związana z zastosowanym układem biegowym wagonu tramwajowego. Na bezpieczeństwo, komfort pasażerów, a także zużycie elementów tego skojarzenia ciernego mają wpływ czynniki takie jak m.in.: typ zastosowanego układu biegowego pojazdu, geometria profilu obręczy koła oraz szyny, materiały z jakich zostały one wykonane, typ styku i jego lokalizacja oraz siły występujące w tym układzie.

Niniejsza praca dotyczy badań wpływu wybranych cech konstrukcyjnych układu biegowego na niezawodność i trwałość obręczy kół tramwajowych w ujęciu wieloaspektowym, przy jednoczesnej weryfikacji wielu czynników decydujących o tym procesie. W pierwszej kolejności przeprowadzono analizę porównawczą wpływu, wybranych typów rozwiązań konstrukcyjnych, stosowanych w obecnie eksploatowanych wagonach tramwajowych, na trwałość obręczy kół jezdnych. Przeprowadzono kolejno laboratoryjne badania przy użyciu testera tribologicznego T-02U z wykorzystaniem zestawów badawczych, zawierających wybrane modyfikatory tarcia, które mogą występować lub być aplikowane w obszar współpracy koła z szyną (co odzwierciedla rzeczywiste warunki eksploatacji). Umożliwiły one w sposób pośredni określenie wpływu wybranych modyfikatorów tarcia na intensywność zużycia i wartość współczynnika tarcia przy użyciu modelowego skojarzenia badawczego. Przeprowadzono również szczegółową analizę i ocenę struktur geometrycznych, zaobserwowanych na powierzchniach kulek pomiarowych. Działania te pozwoliły na opracowanie przez zespół badawczy, pod kierownictwem autora pracy, innowacyjnej substancji smarującej, która mogłaby być z powodzeniem zastosowana do smarowania obrzeży kół tramwajowych, umożliwiając w ten sposób zmniejszenie intensywności procesów zużywania się kół, przy zachowaniu właściwych cech użytkowych wagonu tramwajowego.

Summary

Tram transport, serving large passenger flows, is a key element of public collective transport in urban agglomerations. Its competitiveness compared to road transport is related to ensuring appropriate reliability and economic efficiency, which is largely determined by the technical condition of the rolling stock and the quality of the track surface. Therefore, it is crucial to study the phenomena occurring in the wheel-rail system, which, due to the cooperation in the conditions of an open friction node, constitute an interdisciplinary issue, combining many fields of science such as: metal science, tribology, strength of materials, foundations of reliability and vehicle dynamics related to with the running system of a tram car. The safety, comfort of passengers, as well as the wear of the elements of this friction association are influenced by factors such as: the type of vehicle running system used, the geometry of the wheel rim profile and rails, the materials from which they are made, the type of contact and its location, and the forces occurring in this system.

This work examines the impact of selected design features of the running system on the reliability and durability of tram wheel rims in a multi-aspect approach, while verifying many factors determining this process. First, a comparative analysis of the impact of selected types of construction solutions used in currently used tram cars on the durability of road wheel rims was carried out. Laboratory tests were carried out using the T-02U tribological tester using test kits containing selected friction modifiers that may occur or be applied to the wheel-rail cooperation area (reflecting actual operating conditions). They made it possible to indirectly determine the impact of selected friction modifiers on the wear intensity and the value of the friction coefficient using a model research association. A detailed analysis and assessment of the geometric structures observed on the surfaces of the measuring balls was also carried out. These activities allowed the research team, under the leadership of the author of the work, to develop an innovative lubricant that could be successfully used to lubricate the rims of tram wheels, thus reducing the intensity of wheel wear processes while maintaining the proper functional characteristics of the tram car.