

dr. inż. Zdzisław Hryciów

Wydział Mechaniczny
Wojskowa Akademia Techniczna
gen. Witolda Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, Polska
E-mail: zdzislaw.hryciow@wat.edu.pl

dr. inż. Wiesław Krason

Wydział Mechaniczny
Wojskowa Akademia Techniczna
gen. Witolda Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, Polska
E-mail: wieslaw.krason@wat.edu.pl

dr. inż. Józef Wysocki

Wydział Mechaniczny
Wojskowa Akademia Techniczna
gen. Witolda Urbanowicza 2, 00-908 Warszawa, Polska
E-mail: jozef.wysocki@wat.edu.pl

Badania eksperymentalne współczynnika tarcia pomiędzy piórami resoru wielopiórowego z uwzględnieniem stanu powierzchni ciernych

Słowa kluczowe: *resor wielopiórowy, badania laboratoryjne, pary cierne, chropowatość powierzchni, siły tarcia, statyczny i kinetyczny współczynnik tarcia*

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań symulacyjnych węzłów tarcia występujących pomiędzy piórami resoru, z uwzględnieniem stanu powierzchni współpracujących oraz wpływu prędkości ich wzajemnego przemieszczania, na wartości współczynników tarcia. Zaproponowano metodykę wyznaczania współczynników statycznych i kinetycznych tarcia. Do badań przygotowano dwa rodzaje próbek, które wycięto z pióra resoru prototypowego - tworzyły one modelowe pary cierne. Oceniono stan powierzchni próbek i wybrane właściwości mechaniczne. W badaniach eksperymentalnych uwzględniono: cztery prędkości poślizgu, cztery warianty stanu powierzchni oraz dwie wartości obciążenia normalnego. Badania par ciernych wykonano na stanowisku laboratoryjnym do pomiaru siły tarcia. Wyniki badań przedstawiono w postaci przebiegów czasowych siły tarcia, wykresów i zestawień tabelarycznych współczynników tarcia. Wykonano analizę porównawczą wyników w celu określenia wpływu warunków badań, na wartości wyznaczonych współczynników tarcia. Zaproponowane warunki badań są zbliżone do typowych warunków eksploatacyjnych pojazdów drogowych.

1. Wstęp

Resor stanowi sprężysty element zawieszenia, który odpowiada za przekazywanie sił i momentów pomiędzy kołami pojazdu i jego ramą, redukuje uderzenia powstające jako reakcje podłoża oddziałujące na jadący samochód oraz ma zasadniczy wpływ na stabilizację ruchu i komfort jazdy. Badania dowodzą, że tarcie w resorze znacząco oddziałuje na sztywność dynamiczną i drgania pojazdu. W wyniku względnego ruchu piór w resorze powstaje tarcie, które może przyczyniać się do niestabilności ruchu pojazdu i niekorzystnego

wzrostu niesprężystego oporu w zawieszeniu. Szczególnie jest to widoczne na drogach o dobrych nawierzchniach. Siły dynamiczne, generowane przez nierówności drogi, mogą być zbyt małe do pokonania sił tarcia pomiędzy piórami. Wówczas obserwuje się zjawisko „blokowania resoru”, który zostaje wyłączony z pracy zawieszenia, a powstałe siły od nierówności drogowych przekazywane są bezpośrednio z koła na nadwozie. Prowadzi to do pogorszenia komfortu jazdy. W pracy [14] badano właściwości dynamiczne sztywności resoru wielopiórowego, w aspekcie projektowania konstrukcji ze szczególnym uwzględnieniem komfortu jazdy. Obiektem badań był resor do lekkiego pojazdu ciężarowego. Zależność wpływu tarcia, częstości i amplitudy drgań na sztywność dynamiczną resoru określono na podstawie badań eksperymentalnych i licznych testów numerycznych z wykorzystaniem MES. Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły zoptymalizować konstrukcję zawieszenia pojazdu pod względem właściwego doboru charakterystyk sprężystych i tłumiących. W efekcie znacząco polepszone komfort jazdy. Według [14] stwierdzono, że sztywność dynamiczna resoru piórowego zmienia się wraz z częstością, amplitudą i energią rozpraszaną wskutek tarcia. W pracy dowiedziono, że zmniejszenie tarcia pomiędzy piórami resoru jest najefektywniejszą drogą do poprawienia sztywności dynamicznej resoru wielopiórowego. Stan eksploatacyjny powierzchni piór resoru, ich podatność na zużycie jest przedmiotem badań przedstawionych w pracy [8]. W artykule zbadano wpływ naprężeń szczątkowych na trwałość elementów konstrukcyjnych, prognozując ich zużycie. Naprężenia szczątkowe zwykle powstają w wyniku obróbki powierzchniowej, takiej jak śrutowanie lub walcowanie. Celem eksperymentalnych badań było określenie wpływu tarcia i charakterystyki zużycia w wyniku oddziaływania naprężeń szczątkowych dla powierzchni ślizgowych, w stanie suchym i pomiaru tarcia międzyfazowego. Próbkę do badań wykonano z materiału SUP9 przeznaczonego do produkcji resorów piórowych. Naprężenia szczątkowe powstały na powierzchni piór w wyniku śrutowania. Profile naprężeń szczątkowych zostały zmierzone na powierzchni i pod powierzchnią metodą dyfrakcji rentgenowskiej. Testy ślizgowe przeprowadzono pod różnym naciskiem kontaktowym dla ustalonej prędkości ślizgu 0,035 m/s w celu określenia charakterystyk tarcia i zużycia powierzchni piór. Testy laboratoryjne resorów piórowych wykonano na maszynie wytrzymałościowej. Uzyskano krzywe obciążenie - przemieszczenie w postaci pętli histerezy, które stanowiły podstawę określenia siły tarcia oraz współczynnika tarcia pomiędzy piórami resoru. Porównano współczynniki tarcia, objętości zużycia i szybkości zużywania dla dwóch stanów powierzchni śrutowanych i próbek z materiałów nie poddawanych śrutowaniu. Oceniono, w ten sposób, wpływ naprężenia szczątkowego na charakterystykę trybologiczną.

W artykule [2] zaproponowano oszacowanie całkowitej siły generowanej przez resor piórowy jako złożenia siły sprężystej i siły tarcia suchego. Przyjęto model resoru, w którym nie uwzględniono wpływu zmiany prędkości względnych dla trących powierzchni piór resoru. Histereza w takim modelu jest silnie nieliniowa. Wykazano, że analizowany model można poprzez dyskretyzację i zmianę parametrów powiązać z modelem dyskretnym zmiennym w czasie, który zaproponowano w 1980 r. przez zespół kierowany przez Fanchera. Dla odwzorowania nieliniowego zachowania resoru piórowego, próbowano w pracy [2] zastosować klasyczny model resoru z liniową siłą sprężystą i liniową siłą tarcia wiskotycznego. Omówiono proces walidacji krzyżowej takich dwóch modeli nieliniowych z uwzględnieniem członów sił sprężystych oraz tłumiących, pochodzących od tarcia suchego i tarcia wiskotycznego. Nieliniowy model resoru przetestowano także podczas eksperymentów na rzeczywistym samochodzie ciężarowym.

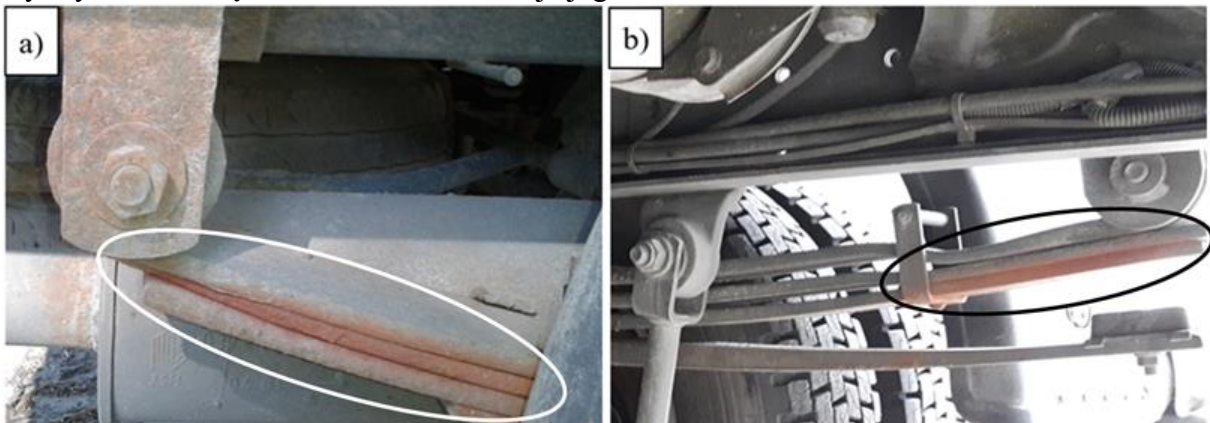
W literaturze [4, 5, 9, 11] można znaleźć wyniki symulacji komputerowej z zastosowaniem metody elementów skończonych dla różnych modeli resoru: od prostego modelu trzypiórowego do modeli wieloobiektowych [4, 9, 10]. Ta różnorodność sprawia, że

wykorzystuje się je na różnych etapach procesu konstruowania (modernizacji) pojazdu do analizy zjawisk fizycznych zachodzących w wybranych elementach, częściach i zespołach oraz całego pojazdu. Reprezentują one różny poziom złożoności i dokładności, a tym samym nakład pracy przy ich opracowaniu oraz wymagany czas obliczeniowy.

Na uwagę zasługuje artykuł [11], w którym autorzy koncentrują się na podejściu „multibody” i metodzie elementów skończonych (MES) w celu znalezienia kompromisu między dokładnością, a szybkością obliczeniową. Obszar badawczy obejmuje przeznaczenie pojazdu, ocenę dynamiki jego działania w zakresie obsługi i komfortu jazdy. Zaproponowano w nim ciekawą odmianę modelu numerycznego multibody, jako wieloobiektowego modelu zbudowanego w LMS Virtual. Lab Motion [11]. Każde pióro resoru dyskretyzowane jest w postaci brył sztywnych połączonych liniowymi belkami sprężystymi. Kontakt jest modelowany jako uproszczone oddziaływanie między kulkami, który ma tę zaletę, że jest wydajny obliczeniowo i nadaje się do tego typu aplikacji, w których obszary kontaktu są znane a priori (końcówki piór [5]).

Ze względu na szerokie wykorzystywanie w zawieszeniach zależnych samochodów ciężarowych i przyczep resorów wielopiórowych, problem ich zużycia w trakcie eksploatacji staje się bardzo istotny dla zaplecza technicznego przedsiębiorstw.

Jedną z wielu przyczyn intensywnego zużycia resorów piórowych są zaniedbania serwisowe. Na rys. 1 pokazano typowy przypadek zużycia resoru w wyniku korozji (obszary zaznaczone elipsami). Oddziaływanie środowiska zewnętrznego (woda, kurz itp.) na elementy sprężyste powoduje ich intensywne zużycie eksploatacyjne. Powstające produkty korozji wypełniają szczeliny, tworząc swoisty karb pomiędzy współpracującymi piórami. Zmianie ulegają warunki ich współpracy, a w szczególności krzywizny piór oraz pojawiają się dodatkowe luzy między piórami (zmiana warunków tarcia) [3]. W konsekwencji zmiennych obciążeń dynamicznych, oddziałujących na zawieszenie pojazdu, radykalnie zmienia się wytrzymałość zmęczeniowa resoru i maleje jego trwałość.



Rys. 1. Przykłady niewłaściwej obsługi eksploatacyjnej elementów sprężystych w zawieszeniu tylnym samochodu: a) resor wielopiórowy, b) podwójny resor paraboliczny

Tarcie pomiędzy piórami resoru ma bardzo duży wpływ na parametry zawieszenia pojazdu, a poprzez to na jego charakterystyki eksploatacyjne. Możliwość uwzględnienia tarcia w metodach projektowania i diagnozowania resoru jest więc niezbędne do określenia stanu eksploatacyjnego zawieszenia i kompletnego pojazdu. Nowoczesne projektowanie zawieszenia pojazdu wymaga precyzyjnego opisu zjawiska tarcia i odpowiedniej definicji tarcia w postaci różnej klasy modeli [4, 5, 9, 11]. Do zdefiniowania takich modeli, szczególnie odwzorowujących zjawisko tarcia i zmian jego oddziaływania, konieczna jest znajomość współczynników tarcia statycznego i kinematycznego. W analizowanych pracach nie znaleziono także odpowiedzi na pytanie, jaki jest wpływ prędkości współpracujących powierzchni piór oraz wpływ stanu powierzchni piór resoru na wartości współczynników

tarcia statycznego i kinetycznego. Ze względu na różne przypadki tarcia, które występują pomiędzy piórami resoru, próba opracowana komplementarnego, spójnego i uniwersalnego modelu jest złożonym problemem badawczym.

W pracy opisano metodykę wyznaczania współczynników tarcia dla warunków badań zbliżonych do typowych warunków eksploatacyjnych pojazdów ciężarowych, które wyposażono w metalowe resory wielopiórowe. Wykonano analizę porównawczą wyników symulacji oraz określono wpływ warunków badań na wartości wyznaczonych współczynników tarcia.

2. Charakterystyka obiektu badań

2.1. Przygotowanie próbek i pomiar ich właściwości mechanicznych

Podstawowym celem badań eksperymentalnych było wyznaczenie współczynników tarcia statycznego i kinetycznego pomiędzy piórami resoru dla typowych dla tego elementu stanu struktury warstwy wierzchniej i wybranych warstw pośrednich między współpracującymi piórami. Z tego względu do badań użyto fragmentów pióra resoru wielopiórowego, przeznaczonego do zawieszenia tylnego samochodu ciężarowego o dmc 12 t. W programie badań laboratoryjnych przewidziano dwa komplety par ciernych złożonych z próbki i przeciwpróbki, które charakteryzowały się różnymi stanami powierzchni ciernych. Z pióra resoru wycięto cztery próbki:

- dwie próbki o wymiarach: 12 x 80 x 58 [mm];
- dwie przeciwpróbki o wymiarach: 12 x 80 x 145 [mm].

W ramach prac przygotowawczych w jednym komplecie (parze cierniej) ograniczono się jedynie do oczyszczenia jej z kurzu, pozostawiając powierzchnię zewnętrzną w stanie zastanym (powierzchnia pokryta warstwą rdzy), natomiast w drugiej parze cierniej oczyszczono warstwy wierzchnie, na których pojawiła się rdza, wżery, rysy itp. poprzez szlifowanie i wygładzanie. Tak przygotowane pary cierne były następnie wykorzystywane w badaniach laboratoryjnych. Na podstawie atestu hutniczego przyjęto skład chemiczny stali i porównano go z normą PN-74/H-84032 (tabela 1).

Tabela 1. Skład chemiczny stali 50HSA, z której wykonano próbki do badań

Oznaczenie		Udział [%] pierwiastków w składzie chemicznym							
		C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Cu
50HSA (wg PN-74/H-84032)	min	0,45	0,3	0,8	-	-	0,9	-	-
	max	0,55	0,6	1,2	0,03	0,03	1,2	0,4	0,25
Badana próbka		0,46	0,38	0,88	0,013	0,01	0,93	0,19	0,15

Analizując wyniki zawarte w tabeli 1 należy stwierdzić, że badana stal sprężynowa 50HSA spełnia pod względem składu chemicznego wymagania zawarte w normie.

Własności mechaniczne stali oceniono na próbkach wyciętych z pióra resoru. Badania przeprowadzono zgodnie z PN-04310 na maszynie wytrzymałościowej, na której określono wydłużenie A₅, przewężenie Z oraz moduł sprężystości podłużnej stali E. Dodatkowo określono twardość próbek twardościomierzem Brinella. Wyniki badań przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wybrane właściwości mechaniczne stali 50HSA

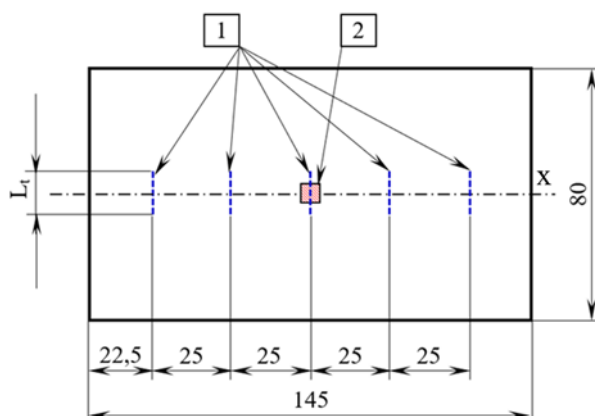
Oznaczenie	R _m [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]	HB	E [MPa]
Wartość	1086	18,1	27,4	320	2,03·10 ⁵

Na uwagę zasługuje obniżenie granicy wytrzymałości na rozciąganie (R_m) o ok. 18% w stosunku do wartości podanej w normie PN-74/H-84032.

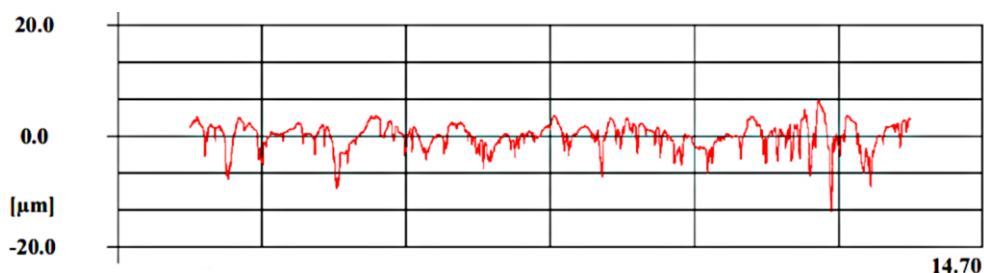
2.2. Ocena stanu powierzchni próbek

Ocenę stanu powierzchni elementów par ciernych wykonano na podstawie pomiaru chropowatości [6, 7, 13] na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w przyrząd pomiarowy typu HOMMELL TESTER T1000. Dla każdej próbki pomiary wykonywane były w kierunku poprzecznym do osi podłużnej x (rys.2a) pióra resoru (po jego szerokości) w trzech (dla próbki) lub pięciu (dla przeciwpróbki) miejscach po jego długości. Przyjęto długość odcinka pomiarowego $L_t = 14,7$ mm z odpowiadającym odcinkiem elementarnym $L_c = 2,5$ mm. Głowica pomiarowa przesuwała się z prędkością $0,5$ mm/s. Przykładowe wyniki pomiarów otrzymane dla próbek o dwóch stanach powierzchni przedstawiono w postaci profilogramów (rys. 2 b i c), wykonanych w rejonach środków geometrycznych powierzchni próbek (punkt przecięcia osi wzdluznej i poprzecznej próbki).

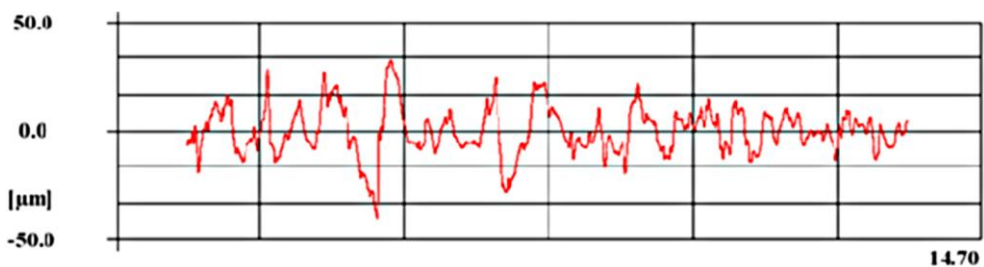
a)



b)



c)



Rys. 2. Profilogramy wykonane dla piór resoru: a) miejsca wykonania pomiarów: 1 – położenie odcinków pomiarowych, 2 – obszar, dla którego wykonano obraz 3D mikropowierzchni, b) próbka oczyszczona, c) próbka skorodowana

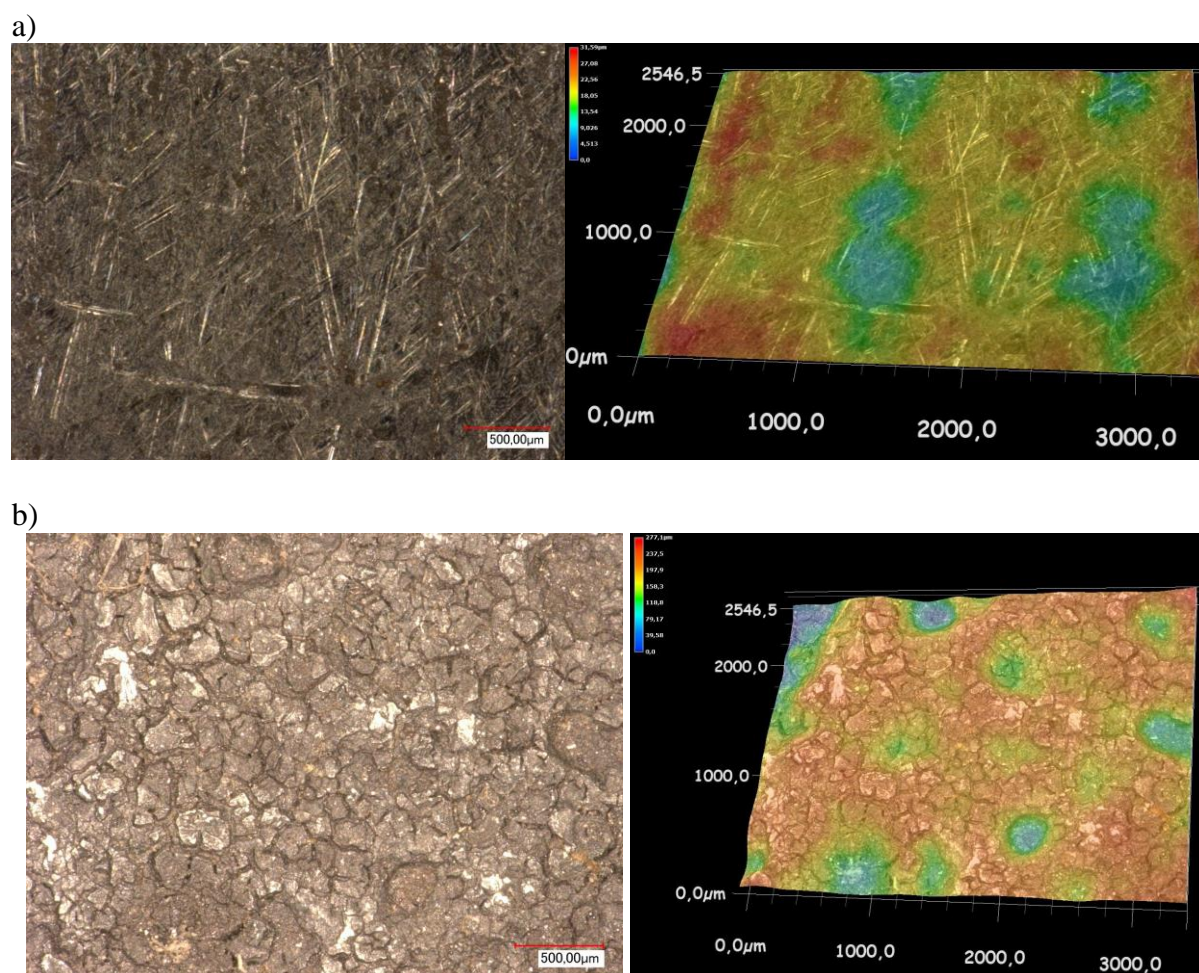
Jako uzupełnienie profilogramów pokazanych na rys. 2, w tabeli 3 przedstawiono podstawowe parametry nierówności dla pary cierniej w stanie skorodowanym i oczyszczonym. Zostały one określone przy zastosowaniu filtra wygładzającego zgodnego z normą DIN 4777.

Tabela 3. Wybrane parametry nierówności powierzchni dla pary ciernej

Parametr [μm]	Próbka	
	skorodowana	oczyszczona
R_{max}	65,88	21,96
R_z	50,80	14,90
R_a	8,74	1,89
R_t	66,58	22,12
W_a	10,50	1,64

Wyniki, przedstawione w tabeli, stanowią średnią arytmetyczną z pięciu pomiarów. Analizując wyniki, zawarte w tabeli 3, należy stwierdzić, że maksymalne wysokości chropowatości (R_{max}), największe wysokości rzędnych profilu (R_z) oraz całkowita wysokość profilu (R_t) dla próbki oczyszczonej stanowią ok. jedną trzecią (ok. 33%) wartości określonych dla próbki skorodowanej.

Wybrane wyniki badań pokazano na rys. 3. Stanowią one obrazy 3D badanych mikropowierzchni przy powiększeniu x 100.



Rys. 3. Widok powierzchni próbek (powiększenie x100) i obrazy 3-D mikropowierzchni:
 a) dla próbki oczyszczonej – max. głębokość nierówności powierzchni wynosi 37,6 μm ,
 b) dla próbki skorodowanej - max. głębokość nierówności powierzchni wynosi 277,1 μm

Na obrazach tych, dla próbki skorodowanej, uwidacznia się wyraźnie geometria powierzchni. Widoczne są miejsca nagromadzenia warstwy tlenków żelaza [15], a pomiędzy

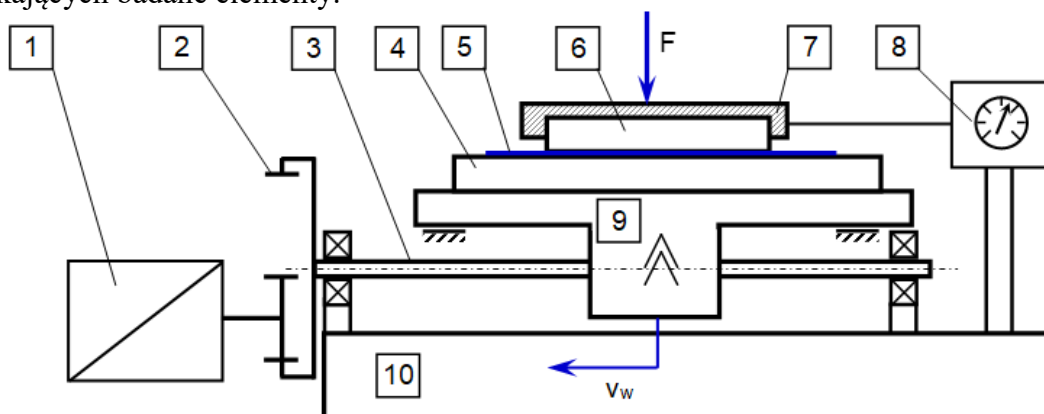
nimi wgłębienia i wżery. Wpłynie to na otrzymane wartości współczynników tarcia [12]. Widoczne na powierzchni próbki oczyszczonej rysy są efektem wcześniejszego jej szlifowania.

Na uwagę zasługuje zmiana profilu falistości (W_a), która zmniejszyła się dla próbki oczyszczonej ok. 6,5 krotnie w odniesieniu do próbki skorodowanej (tab.3). Dodatkowo w miejscach pomiarowych chropowatości wykonano mikroskopem optycznym obrazy 3D powierzchni ciernych (rys. 2a, ozn. 2). Do tego celu wykorzystano stanowisko laboratoryjne, wyposażone w przyrząd pomiarowy typu KEYENCE VHX-1000.

3. Badania eksperymentalne współczynnika tarcia

3.1. Zakres badań

Badania przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym do pomiaru siły tarcia (rys.4), w pomieszczeniu zamkniętym, w temperaturze otoczenia na poziomie $22 \pm 0,1^0$ C. Stanowisko umożliwia uzyskanie względnego ruchu jednego elementu pary cierniej, zamocowanego na przesuwnej stole, względem drugiego, utrzymywanego w uchwycie. Uchwyt połączony jest poprzez czujnik siły z korpusem stanowiska. Przesuwny stół wprawiany jest w ruch przez reduktor planetarny, napędzany silnikiem elektrycznym. Poprzez zmianę prędkości obrotowej silnika możliwa jest zmiana prędkości poślizgu elementów pary cierniej. W trakcie prowadzenia próby utrzymywana jest stała prędkość przesuwu. Zmiana obciążenia normalnego (F) realizowana jest poprzez zmianę liczby odważników o znanych masach dociskających badane elementy.



Rys. 4. Schemat stanowiska pomiarowego: 1 – silnik, 2 – reduktor planetarny, 3 – śruba napędowa, 4 – próbka, 5 – warstwa pośrednia (smar grafitowy lub woda), 6 – przeciwpróbka, 7 – uchwyt, 8 – wskaźnik siły, 9 – przesuwny stolik, 10 - korpus

Badania eksperymentalne przeprowadzono dla dwóch rodzajów par ciernych. Pierwsza para pokryta była warstwą rdzy, drugą natomiast oczyszczono przed próbą.

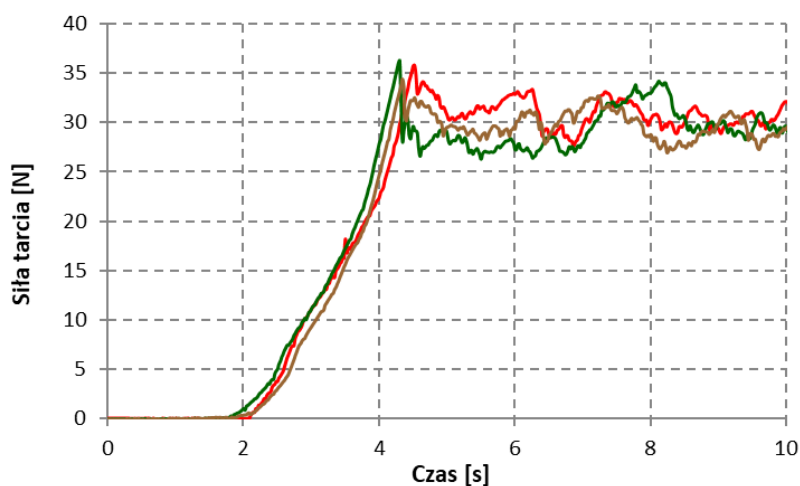
Dla każdej pary zmieniano zarówno warunki obciążenia, stan warstwy pośredniej, jak i prędkość poślizgu. Badania przeprowadzono dla dwóch obciążeń, wynoszących odpowiednio $F = 58$ i 107 N. Względna prędkość poślizgu wynosiła odpowiednio $v_w = 0,0515; 0,111; 0,225$ i $0,348$ mm/s. Wartości te wynikają przede wszystkim z możliwości stanowiska badawczego. Są one jednak zbliżone do prędkości ślizgania końcówek piór resoru przy typowych warunkach eksploatacji pojazdów. Dla rozpatrywanego resoru, przy maksymalnym ugięciu (tj. o 150 mm) przemieszczenie względne najdłuższych piór wynosi $3,49$ mm, natomiast najkrótszych $0,866$ mm. Przy uginaniu z częstotliwością 1 Hz maksymalne wartości prędkości wynoszą odpowiednio $10,9$ i $2,72$ mm/s. W rzeczywistych warunkach eksploatacji nie dochodzi (poza skrajnymi sytuacjami) do tak dużych ugięć. Jeżeli

przyjmijemy średnią wartość amplitudy ugięcia resoru na poziomie 20 mm, to przy częstotliwości 1 Hz maksymalna prędkość względnych przemieszczeń piór resoru wyniesie około 0,7 do 2,9 mm/s odpowiednio dla najkrótszych i najdłuższych piór.

W pierwszym etapie badania przeprowadzono dla powierzchni suchych. Następnie powierzchnie cierne próbek skorodowanych zwilżono wodą, a próbki oczyszczone pokryto warstwą smaru grafitowego. Przyjęte do badań stany powierzchni wynikają z tych, jakie spotykamy w rzeczywistych warunkach eksploatacji resorów wielopiórowych.

3.2. Wyniki badań

W trakcie badań eksperymentalnych, dla każdego wariantu rejestrowano wartość siły tarcia pomiędzy próbką i przeciwpróbką. Okres próbkowania wynosił $\Delta t=0,02$ s, a liczba próbek n zmieniała się w zależności od prędkości poślizgu. Dla każdego wariantu prowadzono od 3 do 5 powtórzeń. Na rys. 5. przedstawiono przykładowe przebiegi sił tarcia (trzy powtórzenia) otrzymane dla próbki pokrytej rdzą dla suchego stanu powierzchni przy ustalonej prędkości poślizgu. W trakcie prowadzonych prób, dla większości skojarzeń, zaobserwowano dużą powtarzalność rejestrowanych wyników.



Rys. 5. Zmiany siły tarcia w funkcji czasu (trzy powtórzenia) przy ustalonej prędkości poślizgu otrzymane dla próbki skorodowanej o powierzchni suchej

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów, po odniesieniu siły tarcia do działającego obciążenia normalnego, określano dla każdej próby wartość statycznego i kinetycznego współczynnika tarcia. Na wykresach (rys. 6) można zaobserwować trzy charakterystyczne obszary. W pierwszym siła tarcia stopniowo narasta, osiągając swoją wartość maksymalną. W drugim obszarze następuje przejście do stanu tarcia ślizgowego, a wartość siły tarcia stopniowo zmniejsza się. W obszarze trzecim obserwuje się ustabilizowanie wartości siły.

Istotnym zagadnieniem było wyznaczenie granic poszczególnych obszarów. Granica pomiędzy obszarem I i II odpowiada chwili, w której zaobserwowano największą wartość współczynnika. Jako współczynnik statyczny przyjęto maksymalną wartość zaobserwowaną przed rozpoczęciem ruchu względnego pomiędzy badanymi elementami (tj. na granicy obszaru I i II). Bardziej złożonym zagadnieniem było wyznaczenie granic pomiędzy obszarem II i III (tj. czasu $t_{III} = k \cdot \Delta t$, gdzie k - krotność okresu próbkowania (rys. 6)). Zaczyna się on w chwili, od której współczynnik zmienności przebiegu był mniejszy od 10%. Współczynnik zmienności V obliczono na podstawie zależności (1).

$$V = \frac{\sigma}{\bar{\mu}} * 100\% \quad (1)$$

gdzie: $\bar{\mu}$ – wartość średnia w przedziale od k do n opisana wzorem (2)

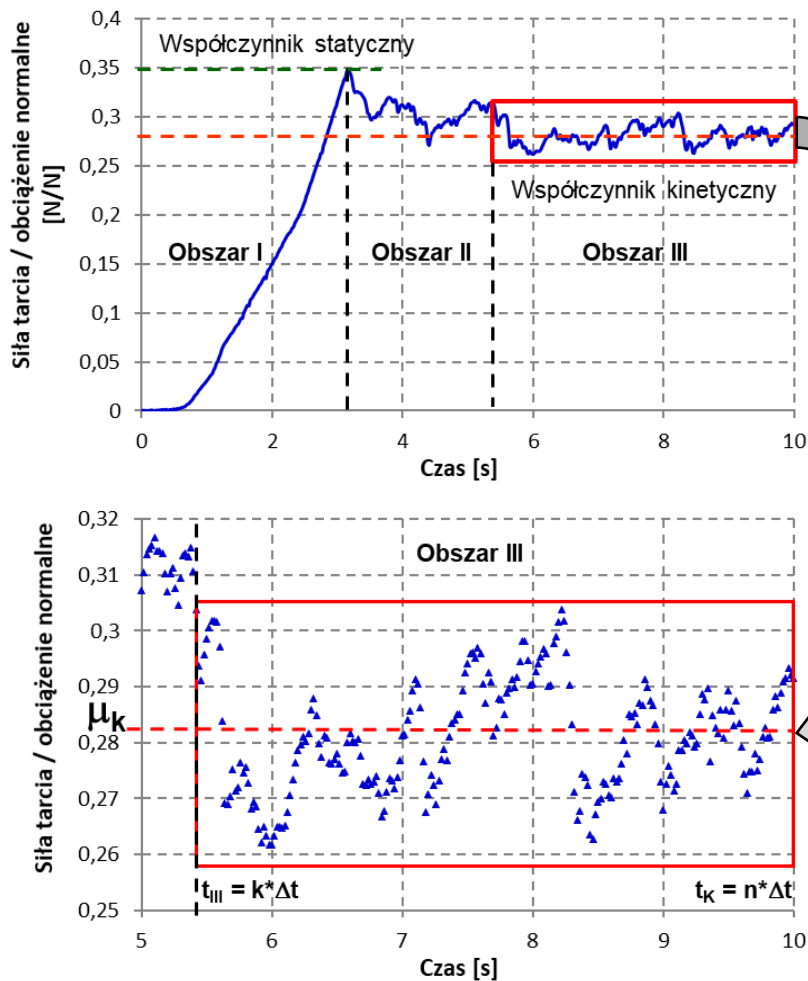
$$\bar{\mu} = \frac{1}{(n-k)} \sum_{i=k}^n \mu_i \quad (2)$$

σ – odchylenie standardowe w przedziale od k do n, opisane zależnością (3)

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=k}^n (\mu_i - \bar{\mu})^2}{(n-k)}} \quad (3)$$

μ_i – kolejna wartość współczynnika w obszarze III.

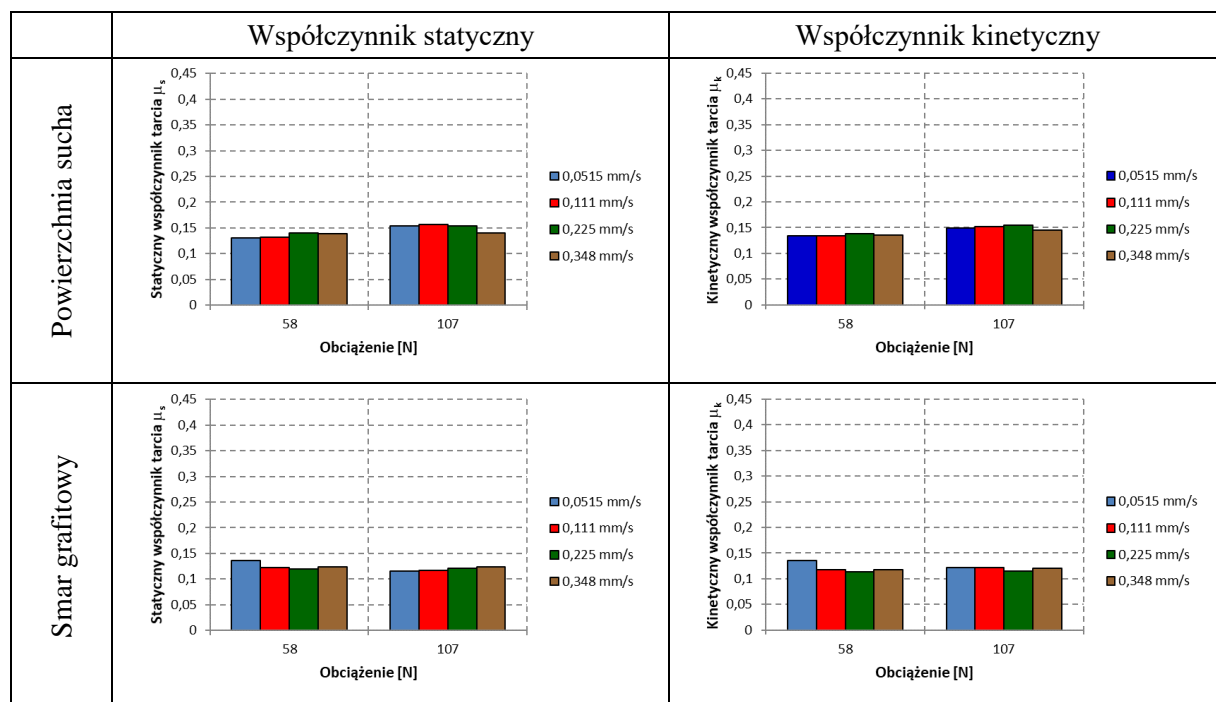
Współczynnik kinetyczny określono jako wartość średnią z fragmentu, dla którego zaobserwowano stabilizację wartości siły tarcia (obszar III) ($\mu_k = \bar{\mu}$).



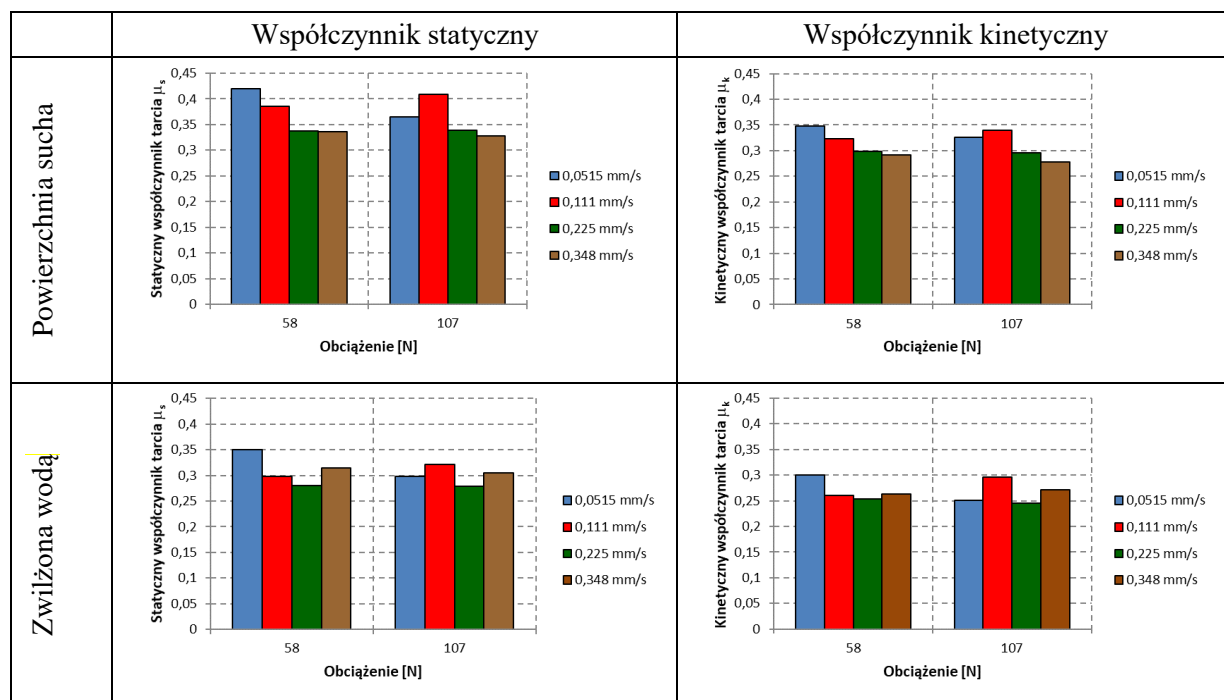
Rys. 6. Zasada wyznaczania współczynników tarcia statycznego i kinetycznego

Następnie, dla kilku powtórzeń (od 3 do 5), dla każdego wariantu badań obliczono średnią arytmetyczną z uzyskanych wyników. Otrzymane rezultaty badań zestawiono w postaci wykresów współczynnika statycznego i kinetycznego w funkcji obciążenia normalnego dla różnych prędkości poślizgu (rys. 7 i 8). W celu ułatwienia porównania wyników na wszystkich wykresach zastosowano jednakową skalę. Dodatkowo, w tabeli 4 i 5, zestawiono wyniki wartości współczynników tarcia (μ_s i μ_k), wartości średnie współczynników (μ_{s-sr} i μ_{k-sr}), określone dla serii pomiarowej oraz odpowiadające im wartości odchyłeń standardowych (σ_{μ_s} i σ_{μ_k}). Analizując wyniki dla powierzchni oczyszczonych należy stwierdzić, że nie zauważa się istotnego wpływu prędkości poślizgu na otrzymane wartości statycznego

i kinetycznego współczynnika tarcia. Różnice nie przekraczają kilku procent. Dla powierzchni suchych obserwuje się nieznaczny (około 8%) wzrost wartości statycznego współczynnika tarcia. Pokrycie powierzchni smarem grafitowym zmniejsza wartość statycznego i kinetycznego współczynnika tarcia o około 7% dla obciążenia 58 N i aż 20% dla obciążenia 107 N. Dodatkowo, powoduje to zmniejszenie wpływu obciążenia normalnego na wartość współczynników tarcia.



Rys. 7. Zestawienie współczynników tarcia statycznego i kinetycznego dla powierzchni oczyszczonych (Tab. 4 i 5)



Rys. 8. Zestawienie współczynników tarcia statycznego i kinetycznego dla powierzchni zardzewiałych (Tab. 4 i 5)

Wartości statycznego i kinetycznego współczynnika tarcia dla suchych powierzchni pokrytych rdzą są o około 230-270% większe niż dla powierzchni czystych, pozbawionych rdzy.

Tabela. 4. Wartości współczynników tarcia dla obciążenia pionowego $F = 58 \text{ N}$

Stan powierzchni	Prędkość [mm/s]	Statyczny współczynnik tarcia			Kinetyczny współczynnik tarcia		
		μ_s	μ_{s-sr}	$\sigma_{\mu s}$	μ_k	μ_{k-sr}	$\sigma_{\mu k}$
Czysta, sucha	0,0515	0,130	0,135	0,0073	0,134	0,135	0,0051
	0,111	0,131			0,134		
	0,225	0,141			0,138		
	0,348	0,139			0,135		
Czysta pokryta smarem grafitowym	0,0515	0,135	0,125	0,0114	0,136	0,121	0,0127
	0,111	0,123			0,118		
	0,225	0,120			0,113		
	0,348	0,123			0,117		
Pokryta rdzą, sucha	0,0515	0,419	0,369	0,0486	0,348	0,315	0,0300
	0,111	0,385			0,323		
	0,225	0,338			0,298		
	0,348	0,335			0,291		
Pokryta rdzą i zwilżona wodą	0,0515	0,350	0,311	0,0343	0,301	0,270	0,0232
	0,111	0,297			0,261		
	0,225	0,280			0,254		
	0,348	0,315			0,263		

Obserwuje się dla nich ponadto większy wpływ prędkości poślizgu na wartości współczynników tarcia. Różnice pomiędzy maksymalnymi a minimalnymi wartościami współczynników wynoszą około 20%. Dla większego obciążenia zaobserwowano zmniejszenie wartości współczynników tarcia. Jest to głównie spowodowane wygładzaniem powierzchni i usuwaniem skorodowanej warstwy podczas kolejnych serii pomiarowych. Zauważono, że większe obciążenie sprzyja rozdrabnianiu cząstek rdzy. Gromadziła się ona w zagłębieniach tworząc swoistą warstwę pośrednią.

Tabela. 5. Wartości współczynników tarcia dla obciążenia pionowego $F = 107 \text{ N}$

Stan powierzchni	Prędkość [mm/s]	Statyczny współczynnik tarcia			Kinetyczny współczynnik tarcia		
		μ_s	μ_{s-sr}	$\sigma_{\mu s}$	μ_k	μ_{k-sr}	$\sigma_{\mu k}$
Czysta, sucha	0,0515	0,154	0,151	0,0104	0,149	0,150	0,0080
	0,111	0,157			0,153		
	0,225	0,154			0,154		
	0,348	0,141			0,145		
Czysta pokryta smarem grafitowym	0,0515	0,116	0,119	0,0092	0,122	0,120	0,0092
	0,111	0,117			0,121		
	0,225	0,120			0,116		
	0,348	0,123			0,120		
Pokryta rdzą, sucha	0,0515	0,364	0,360	0,0438	0,326	0,310	0,0300
	0,111	0,409			0,339		
	0,225	0,339			0,296		
	0,348	0,328			0,278		
Pokryta rdzą i zwilżona wodą	0,0515	0,297	0,301	0,0315	0,251	0,266	0,0246
	0,111	0,321			0,296		
	0,225	0,279			0,246		
	0,348	0,305			0,271		

Zwilżenie powierzchni próbek wodą spowodowało zmniejszenie wartości współczynników tarcia od 17 do 20%. Dodatkowo zauważono, że spowodowało to nieznaczne zmniejszenie wartości stosunku odchylenia standardowego do wartości średniej (dla powierzchni suchych pokrytych rdzą wynosi około 12-13%, natomiast powierzchni zwilżonej około 10-11%).

4. Wnioski

W pracy przedstawiono wybrane wyniki badań laboratoryjnych wartości współczynnika tarcia dla różnego stanu powierzchni piór resoru wielopiórowego. Ze względu na charakter jego pracy w zawieszeniu pojazdu istniejące tarcie w znaczący sposób wpływa na charakterystyki statyczne i dynamiczne resoru (zawieszenia). W trakcie eksploatacji pojazdu następuje usuwanie warstwy smaru z powierzchni współpracujących piór. Zaniechanie prawidłowej obsługi sprzyja powstawaniu korozji, która zmieniając warunki tarcia powoduje zmianę charakterystyki sprężystości resoru i zwiększenie wartości rozpraszanej energii. W skrajnych przypadkach prowadzi do blokowania piór przy małych amplitudach ugięć zawieszenia.

Natomiast pokryte rdzą powierzchnie piór resoru w znaczący sposób zmieniają jego warunki pracy. W oczywisty sposób wpływa to na pogorszenie komfortu jazdy, zmianę obciążeń dynamicznych oraz struktury częstotliwościowej drgań pojazdu.

W pracy rozważono cztery stany powierzchni: czystą suchą, pokrytą smarem grafitowym (stanowi ona pożądaną stan), a także pokrytą warstwą rdzy i wżerów, którą w kolejnym etapie pracy zwilżono wodą. Przeprowadzone badania chropowatości powierzchni uwidoczniły znaczne różnice we wszystkich parametrach chropowatości dla próbek oczyszczonych i skorodowanych. Wpłynęło to na wyniki badań współczynników tarcia.

Otrzymane wartości statycznych i kinetycznych współczynników tarcia dla próbek oczyszczonych są zbliżone do prezentowanych w literaturze [1].

Analizując wyniki dla powierzchni oczyszczonych należy stwierdzić, że nie zauważa się istotnego wpływu prędkości poślizgu na otrzymane wartości statycznego i kinetycznego współczynnika tarcia. Różnice nie przekraczają kilku procent. Wprowadzenie smaru grafitowego spowodowało zmniejszenie wartości współczynników tarcia. Szczególnie widoczne jest to w przypadku większego obciążenia, dla którego stwierdzono zmiany o około 20%.

Pomiar statycznych i kinetycznych współczynników wykazał 230-270% wzrost ich wartości w porównaniu do powierzchni czystych. W trakcie prób zaobserwowano wygładzanie powierzchni – szczególnie dla większego obciążenia. Zwilżenie wodą powierzchni ciernych spowodowało utworzenie swoistej warstwy smarnej zmniejszającej o około 15% współczynniki tarcia.

Literatura

1. Avallone E A, Baumeister T, Sadegh A. Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers. Eleventh Edition. New York: McGraw-Hill Education, 2007.
2. Clavel A., Sorine M., Zhang Q. Modeling and Identification of a Leaf Spring System. IFAC Advances in Automotive Control 2001; 34 (1): 307-312.
3. Drozd K. Causes of Leaf Springs damages verifiable analysis. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2003; 2(18): 24-27.

4. Krason W, Wysocki J. Experimental verification of numerical test results for a double multi-leaf spring. *Journal of Kones* 2009; 16 (3):185–193.
5. Krason W, Wysocki J. Investigation of friction in dual leaf spring. *Friction and Wear* 2017; 38 (3): 214–220.
6. Mitutoyo. Surface roughness measurement. Practical tips for laboratory and workshop. Bulletin No. 1984. https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2015/04/Surface_Roughness_Measurement.pdf, 26.05.2018.
7. Napadłek W, Burakowski T, Woźniak A, Chrzanowski W. Mikrostruktury napoiny typu Stellit Co-6 wytworzonej techniką laserową na stali X22CrNoV12-1. *Wybrane Problemy w Mechatronice i Inżynierii Materiałowej* 2016: 258-267.
8. Oh S D, Jung W W, Bae D H, Lee Y Z. Friction and Wear Characteristics for Automotive Leaf Spring Material due to the Influence of the Residual Stress, *Key Engineering Materials* 2005; 297-300: 1388-1394.
9. Patil P P, Patil A V. Critical Review of Research Paper for Analysis of Multi Leaf Spring, *International Journal of Latest in Engineering and Technology* 2014; 3 (3): 171-174.
10. Qing L, Wei L. A contact finite element algorithm for the multileaf spring of vehicle suspension systems. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 2004; 218 (3): 305-314.
11. Toso A, Facchin U, Melzi S. Multibody and Finite Element models of a leaf-spring suspension for vehicle dynamics applications: numerical model, tests and correlation. *ECCOMAS Thematic Conference on Multibody Dynamics* 2015.
12. Wieczorek J, Sleziona J, Myalski J, Dolata-Grosz A, Dyzia M, Sluzalek G. Surface wear and structure after collaboration in dry sliding conditions in MMCS AK12 and ceramic particles AL2O3. *Kompozyty (Composites)* 2002; 2 (4): 212-216.
13. Wiśniewska M. Surface roughness measurements: emerging importance of the uncertainty evaluation, *PhD Interdisciplinary Journal* 2014; 1: 243-250.
14. Zhou Z, Guo W, Shen T, Wang F, Ju J, Wang H, Song E. Research and Application on Dynamic Stiffness of Leaf Spring. *SAE-China, FISITA Proceedings of the FISITA 2012 World Automotive Congress. Lecture Notes in Electrical Engineering* 2012; 198: 105-119.
15. Żurowski W. Structural factors contributing to increased wear resistance of steel friction couples. *Eksplatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2012; 14 (1): 19-23.