

Tadeusz Szymczak

tadeusz.szczak@its.waw.pl

Instytut Transportu Samochodowego

Adam Brodecki

abrodec@ippt.pan.pl

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Zbigniew Kowalewski

zbigniew.kowalewski@its.waw.pl

Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Instytut Transportu Samochodowego

Piotr Lasota

piotr.lasota@its.waw.pl

Instytut Transportu Samochodowego

OCENA TRWAŁOŚCI ZMĘCZENIOWEJ KOŃCÓWKI DRAŻKA KIEROWNICZEGO

W pracy zaprezentowano wyniki badań trwałościowych końcówki drążka kierowniczego pojazdu o dmc powyżej 3.5 tony. W badaniach wykorzystywano wielkogabarytową platformę wibroizolowaną, serwohydrauliczny siłownik mobilny oraz cyfrowy kontroler sygnałów IST Instron. Próby prowadzono w warunkach działania obciążenia zmiennego cyklicznie do uzyskania 2×10^6 cykli. Ze względu na kompleksową ocenę zachowania końcówki drążka kierowniczego testy przerywano, by wykonywać oględziny obiektu badań. Wyznaczono zmiany kąta wychylenia oraz momentu siły w funkcji liczby cykli oraz przedstawiono ich prognozę. Omówiono procedurę badawczą służącą ocenie trwałości przegubu kulistego.

Słowa kluczowe: przegub, zmęczenie, obciążenie zmienne cyklicznie, liczba cykli, trwałość, pęknięcie

EXPERIMENTAL ASSESSMENT OF FATIGUE DURABILITY OF STEERING ROD TIP

The paper reports results from test of steering rod tip used in car having permissible total mass above 3.5 t. Anti-vibration platform, servo-hydraulic actuator and digital controller IST Instron were used to execute the tests. The experiments were carried out under cyclic loading up to 2×10^6 cycles. The tests were interrupted for inspecting the examined object. Variations of angle and force moment and prediction of their values versus number of cycles are presented. Details of experimental procedure for evaluation of steering rod tip are provided.

Keywords: rod tip, fatigue, cyclic loading, number of cycles, durability, crack.

1. Wprowadzenie

Końcówki przegubowe umożliwiają połączenie drążka kierowniczego z kołem samochodu. Zbudowane są z przegubu kulistego oraz dwóch trzpieni [1]. Jeden z nich połączony jest z drążkiem kierowniczym, drugi natomiast z kołem pojazdu. Przegub kulisty otoczony jest gumową osłoną. Jej rolą jest ochrona przegubu przed wyciekaniem smaru, oddziaływaniem piachu, wody oraz różnych pyłów.

W trakcie eksploatacji pojazdu przeguby kuliste poddawane są obciążeniu cyklicznie zmiennemu, wynikającemu z występowania nierówności drogi oraz zmian położenia koła kierownicy przy wykonywaniu manewrów na drodze. W efekcie, następuje wielokrotne przemieszczanie się kuli przegubu względem jego miseczki, co przy długotrwałej eksploatacji prowadzi do zużywania się powierzchni współpracujących elementów. Jednocześnie osłona gumowa poddawana jest zginaniu oraz rozciąganiu, które mogą prowadzić do wystąpienia uszkodzenia w postaci deformacji trwałych lub pęknięć. Powoduje to wnikanie piasku, pyłu oraz wody do strefy współpracujących elementów, zmieniając nominalne warunki ich pracy. W rezultacie ma miejsce degradacja stanu powierzchni kuli i miseczki, przejawiająca się zmniejszeniem nominalnej powierzchni współpracy oraz występowaniem luzów. W pewnym etapie eksploatacyjnym para trąca nie jest już w stanie przenosić obciążeń nominalnych i ulega rozłączeniu. Brak trwałego połączenia drążka kierowniczego i koła prowadzi do utraty możliwości kierowania pojazdem. W takiej sytuacji może dojść do wypadnięcia pojazdu z drogi lub zjechania na przeciwległy pas jezdni, narażając tym samym innych uczestników ruchu drogowego na możliwość zaistnienia poważnej kolizji.

Znaczenie badań mechanicznych [9], [10], [12], [16], w tym stanowiskowych ujmowane jest w katalogach producentów podzespołów motoryzacyjnych, gdzie podkreśla się ich ważność w odniesieniu do wymagań normowych dla różnych podzespołów, [10]. Spośród testów mechanicznych wymieniane są próby twardości, próba rozciągania, badania zmęczeniowe, badania trwałościowe (w tym z wykorzystaniem samochodu po przebiegu 40 000 km) [10], [12]. Badania stanowiskowe, [1], [9], [10], [11], [13], [14], [15], [16], wykonywane są na gotowym wyrobie. Realizowane są one z użyciem stanowisk badawczych o różnym stopniu zaawansowania. Wśród nich można wyróżnić zestawy stołowe, które umożliwiają mocowanie podzespołu i poddanie go konkretnemu rodzajowi obciążenia cyklicznie zmiennego, [10] oraz bardziej skomplikowane urządzenia, dające możliwość prowadzenie testów w warunkach skręcania dynamicznego, przy obciążeniu siłą osiową oraz działaniu temperatury, [9]. Wykorzystywane są również zestawy stołowe wielkogabarytowe [11], które mają dużą przestrzeń badawczą i dają możliwość testowania obiektów badań o różnych wymiarach. Ich podstawową zaletą, wynikającą z konstrukcji, jest możliwość odwzorowania rzeczywistych warunków zamocowania. Z kolei, stanowiska określane jako „systemy badawcze” wykorzystują płyty z rowkami typu „T”. Mocuje się do nich stojany, kolumny oraz inne elementy, służące wprowadzeniu obiektu badań, [1]. Ich uniwersalność wyraża się swobodą konfiguracji podzespołów stanowiska badawczego, stwarzając szerokie możliwości do badań różnych podzespołów. Systemy badawcze gwarantują rejestrowanie zmian siły, momentu skręcającego, kąta skręcenia, przemieszczenia oraz przyspieszenia. W wielu laboratoriach stosowane są stanowiska koncepcyjne. W takich konstrukcjach wykorzystuje się płyty z rowkami rozmieszczonymi w określonych konfiguracjach oraz kontrolery do zadawania obciążenia, [5]. Zasadniczymi wynikami badań, które są uzyskiwane przy użyciu wymienionych stanowisk, są zmiany momentu skręcającego. Z kolei układy modułowe ([6], [15]) są rozwiązaniami

technicznymi przeznaczonymi do określonego typoszeregu podzespołu. Mają one podporowy układ do mocowania obiektu badań oraz głowicę do zadawania momentu skręcającego. Układy te pozwalają również odwzorowywać warunki środowiskowe, które istotnie wpływają na rozwój korozji badanych elementów (olej, temperatura, błoto). Najbardziej zaawansowanymi układami badawczymi do prowadzenia prób stanowiskowych są wielosiłownikowe, serwohydrauliczne zestawy badawcze (z j. angielskiego Axle Test System), pracujące w pętli sprzężenia zwrotnego i sterowane przy pomocy komputera, [13]. Mają one przestrzeń badawczą, która umożliwia wprowadzenie pojazdu lub wieloelementowego podzespołu i poddanie go testom zmęczeniowym. Próby zmęczeniowe mogą być realizowane przy wykorzystaniu kilku siłowników, powodując przemieszczanie każdego z kół badanego pojazdu.

W warunkach krajowych dotychczasowe badania mechaniczne przegubów kulistych polegają przede wszystkim na pomiarach momentu siły, wyznaczanego podczas ruchu obrotowego kuli względem miseczki, oraz określaniu wartości kąta wychylenia trzpienia [7]. Niestety brak jest testów stanowiskowych prowadzonych pod obciążeniem zmiennym cyklicznie. Dysponując wynikami takich badań lepiej można prognozować zachowanie komponentu w warunkach eksploatacyjnych. Ponadto, można opracowywać wytyczne testów stanowiskowych. Dlatego też, celem pracy było określenie trwałości końcówki drążka kierowniczego w warunkach cykli zmęczeniowych w kontekście jej eksploatacji.

2. Szczegóły techniki badawczej

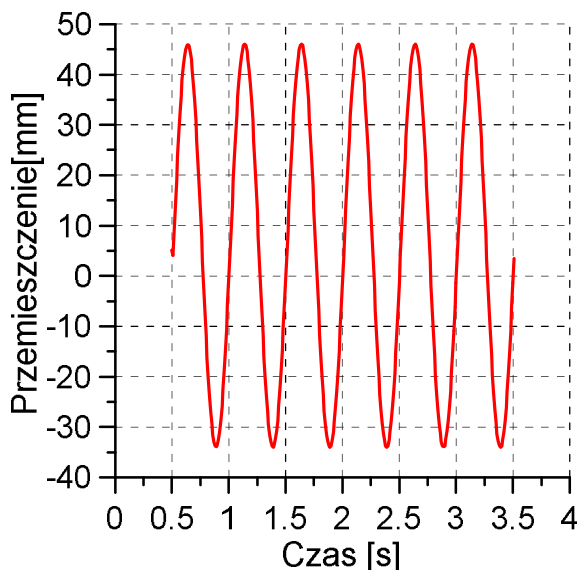
Badaniom poddano końcówkę drążka kierowniczego stosowanego w pojazdach dostawczych oraz rolniczych, rys. 1. W elemencie tym można wyróżnić trzpień gwintowany, który jest wprowadzany do drążka kierowniczego, oraz gwintowany sworzeń z nakrętką koronkową, stanowiących łącznik z kołem pojazdu.



Rys. 1. Końcówka drążka kierowniczego: (a) widok ogólny (b) gwintowany sworzeń; (c) drążek na stanowisku badawczym: (1) przegub kulisty, (2) ramię wychylne, (3) tuleja-trzpień, (4) tłoczyko siłownika
Fig. 1. Steering rod tip: (a) in general view, (b) mandrel with thread on section; (c) in testing stand: (1) ball joint, (2) angle arm, (3) sleeve-mandrel, (4) piston of actuator

Testy prowadzono w temperaturze pokojowej stosując siłownik serwohydrauliczny, wibroizolowaną platformę badawczą, zestaw montażowy oraz wielokanałowy kontroler cyfrowy IST (Instron Structural Testing). Płyta wibroizolowana posiadała rowki typu T,

które wykorzystano do zamocowania stojana oraz elementów zastosowanych do połączenia obiektu badań z siłownikiem (rys. 1c). Trzpień gwintowany końcówki drążka kierowniczego (1) był połączony z ramieniem wychylnym (2), natomiast drugi jego koniec z tłoczyskiem siłownika (4) przy pomocy zespołu tuleja-pręt (3).



Rys. 2. Przebieg sygnału przeszczenia

Fig. 2. Cyclic displacement course

Do sterowania siłownikiem wykorzystano sygnał zmiennego cyklicznie przeszczenia, rys. 2. Parametry sygnału dobierano w zależności od wychylenia trzpienia końcówki drążka kierowniczego. Przy ich ustalaniu stosowano założenie o 60% wykorzystaniu maksymalnej wartości kąta wychylenia trzpienia, co dało amplitudę o wartości ± 40 mm. Dobór wartości częstotliwości, ze względu na minimalizowanie wpływu temperatury na wyniki badań, prowadzono metodą stopniowego obniżania jej wartości od 5Hz. Przy częstotliwości 5Hz temperatura w strefie przegubu kulistego po uzyskaniu 1×10^3 wynosiła ok. 60°C . W przypadku częstotliwości 2Hz temperatura ulegała stopniowemu obniżaniu do 40°C po uzyskaniu ok. 3×10^3 cykli, oraz do 28°C przy 4×10^3 cykli. Ostatecznie, częstotliwość sygnału zmiennego cyklicznie przeszczenia przyjęto na poziomie 2Hz. Jego amplituda była równa 40 mm. Stosowanie sygnału przeszczenia o wymienionych parametrach powodowało wychylenie sworznia w przedziale wartości kąta $\pm 20^\circ$. Uzyskiwane wartości siły cyklicznie zmiennej zawierały się w zakresie ± 30 kN.

W zakresie czynności inspekcyjnych wykorzystanych do określenia stanu technicznego przegubu wykonywano:

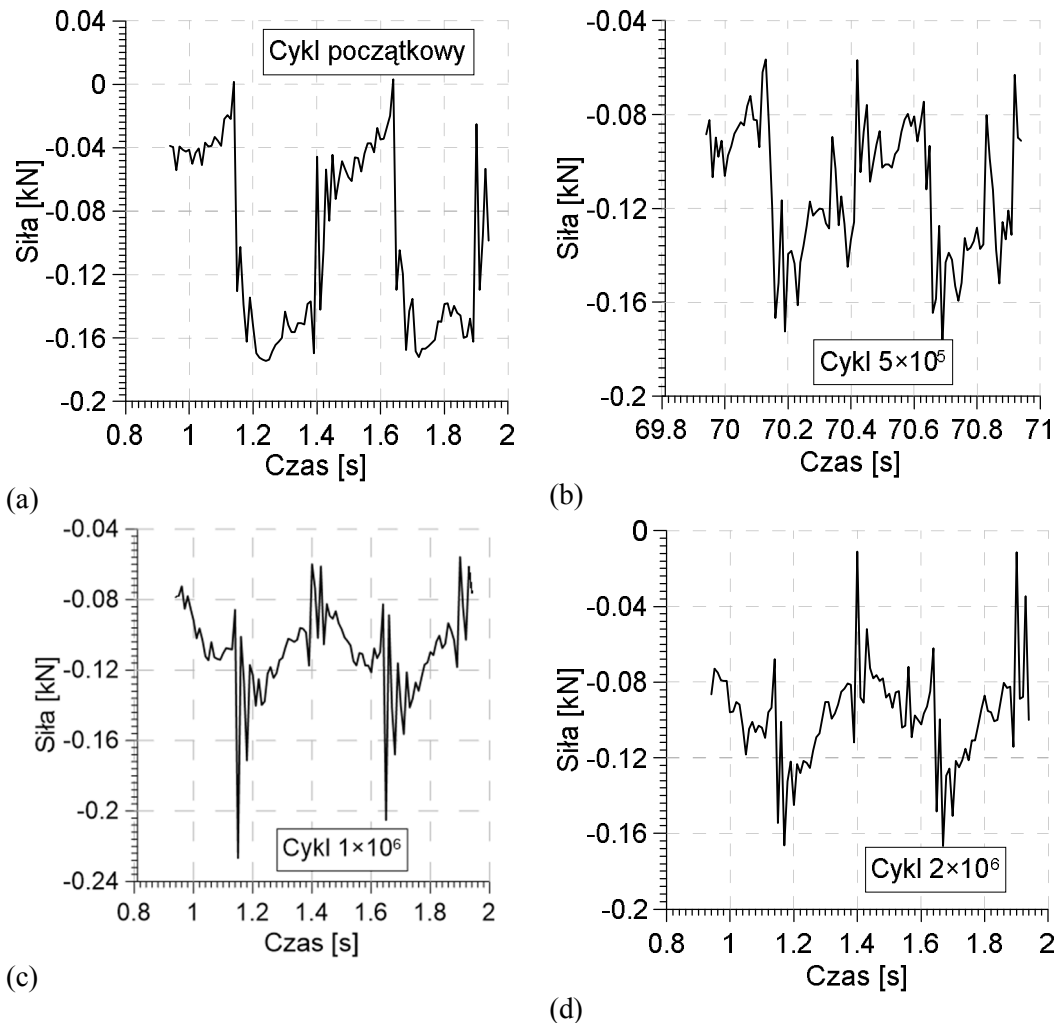
- ocenę wizualną osłony gumowej;
- pomiary momentu od siły oraz kąta wychylenia (w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach);
- analizy przebiegów siły na różnych etapach zaawansowania próby zmęczeniowej.

W ocenie wizualnej zwracano szczególną uwagę na występowanie otarć, deformacji trwałych lub pęknięć. Pomiary kontrolne momentu siły tarcia w ruchu obrotowym kuli względem miseczki, oraz kątów wychylenia trzpienia przegubu wykonywano po uzyskaniu określonych wartości cykli przeszczenia, a mianowicie: 3.1×10^4 , 5×10^5 ,

7×10^5 ; 1×10^6 ; 1.5×10^6 ; 2×10^6 . Graniczną liczbę cykli określono na podstawie wymagań prób zmęczeniowych dla próbek [3], [4] oraz gotowych wyrobów, wykonanych ze stali [8]. Wartości kąta wychylenia określano w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach („A-B” – w kierunku wzdłużnym do osi zamocowania względem obudowy przegubu oraz „C-D” – prostopadłym do osi zamocowania względem obudowy przegubu). Analizę przebiegów siły prowadzono po czterech etapach cykli zmęczeniowych, tj.: na początku testu, po wykonaniu 0.5×10^6 ; 1×10^6 oraz 2×10^6 cykli.

3. Wyniki badań

Rezultatami istotnymi z punktu widzenia oceny cech eksploatacyjnych drążka kierowniczego były: trwałość osłony przegubu kulistego (rys. 4, 5), zmiany kąta wychylenia trzpienia końcówki drążka kierowniczego (rys. 6) oraz momentu siły (rys. 7).

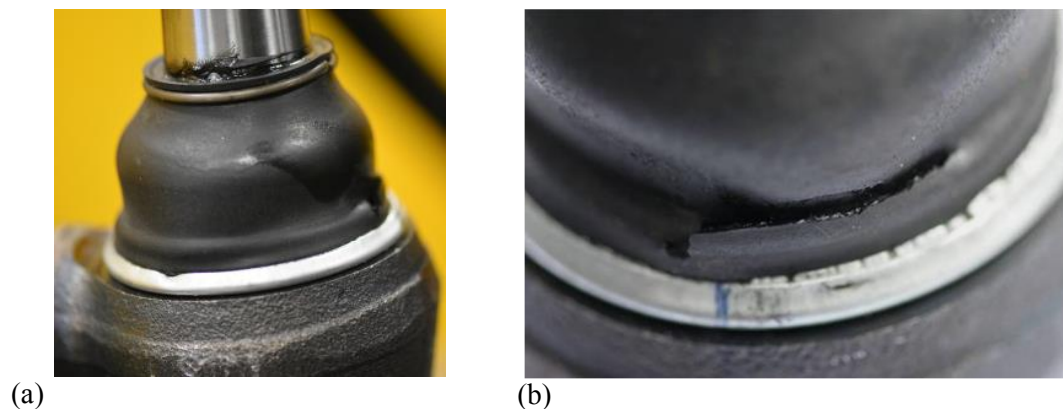


Rys. 3. Przebiegi siły po różnych etapach próby zmęczeniowej:

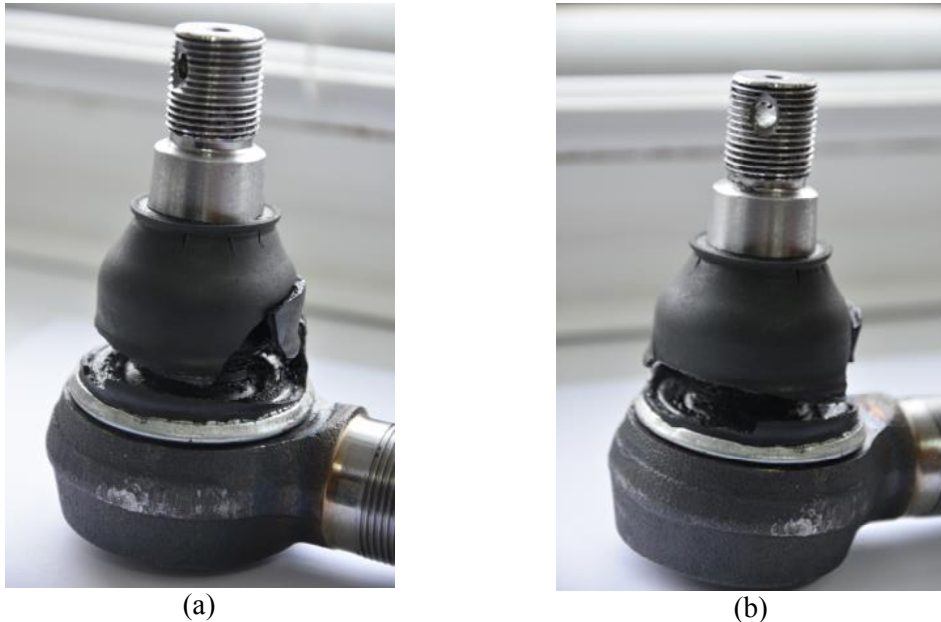
(a) cykle początkowe; (b) 0.5×10^6 , (c) 1×10^6 , (d) 2×10^6
 Fig. 3. Force courses at various stages of the fatigue test:
 (a) initial cycles; (b) 0.5×10^6 , (c) 1×10^6 , (d) 2×10^6

W początkowym etapie cykli zmęczeniowych przebieg siły charakteryzował się regularnym występowaniem odcinków w kształcie trapezu, rys. 3a. Były one wynikiem działania siły tarcia podczas obrotu kuli sworznia. Po uzyskaniu 0.5×10^6 cykli przemieszczenia zmiany wartości siły w punktach zwrotnych miały charakter bardziej gwałtowny i stochastyczny, rys. 3b. Wskazywały na zmniejszenie siły tarcia w ruchu kuli sworznia względem miseczki. Dodatkowo, we fragmentach przebiegu siły - znajdujących się między jej ekstremami - obserwowano lokalne wzrosty lub obniżenia wartości. Świadczyły one o zmianie warunków tarcia wskutek zużycia współpracujących elementów badanej końcówki drążka kierowniczego. Ze wzrostem liczby cykli (rys. 3c) przebieg siły ponownie stawał się regularny, przy czym można w nim było wyróżnić zmienność występowania ekstremów. Ponadto, między punktami zwrotnymi wychylenia sworznia przegubu kulistego, obniżenia lub wzrosty wartości siły miały charakter stosunkowo regularny, wskazując na niezmiennosć wytworzonych, wskutek działania obciążenia, warunków tarcia. Ten rodzaj zmian siły utrzymywał się do chwili zakończenia próby, tj. uzyskania 2×10^6 cykli, rys. 3c, d.

W badanym przegubie, po uzyskaniu ok. 2.8×10^5 cykli wystąpiło pęknięcie osłony gumowej, natomiast przy ok. 3.1×10^5 cykli pojawiła się wypływka smaru, rys. 4a. W kolejnych cyklach pęknięcie propagowało w kierunku obwodowym, rys. 4b, powodując występowanie strefy podatnej na działanie cykli zmęczeniowych. Rozwijano się ono wraz ze wzrostem liczby cykli, uzyskując w końcowym etapie testu, tj. przy 2×10^6 cyklach, położenie obwodowe przy kołnierzu korpusu przegubu kulistego, rys. 5. Strefa występowania pęknięcia charakteryzowała się również ubytkami materiału w osłonie przegubu.



Rys. 4. Osłona przegubu kulistego po liczbie cykli: (a) 3.1×10^5 ; (b) 3.15×10^5
Fig. 4. Ball joint shield after the following number of cycles: (a) 3.1×10^5 ; (b) 3.15×10^5

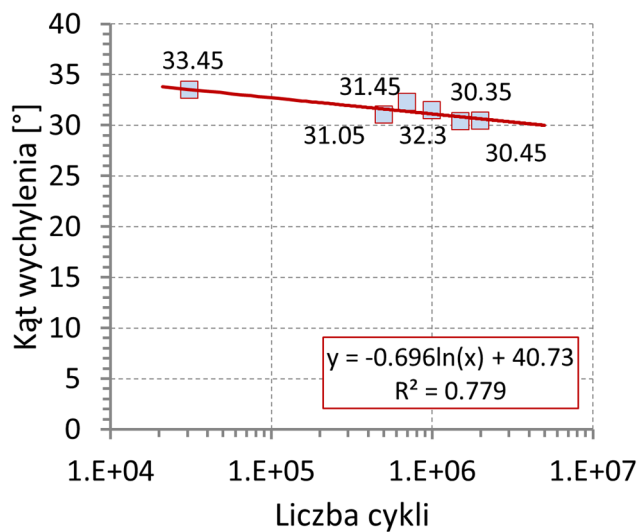


Rys. 5. Pęknięcie w gumowej osłonie przegubu po uzyskaniu 2×10^6 cykli: (a) widok „1”; (b) widok „2”

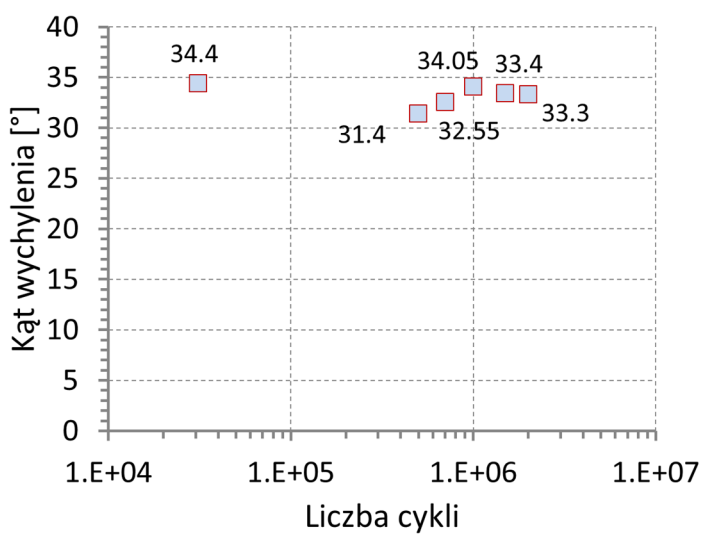
Fig. 5. Crack in rubber shield after 2×10^6 cycles: (a) view No 1; (b) view No 2

Kąt wychylenia kuli przegubu był reprezentowany wynikami z dwóch kierunków wzajemnie prostopadłych, rys. 6. Niezależnie od kierunku, w którym prowadzono pomiary, obserwowano obniżanie wartości kąta wychylenia ze wzrostem liczby cykli. Warto podkreślić, że w przypadku wyników z kierunku „A-B” zmiana wartości badanej wielkości fizycznej miała przebieg, który w skali pół-logarytmicznej dobrze opisuje funkcja liniowa, co łatwo wykorzystać przy prognozowaniu jej wartości dla większej liczby cykli zmęczeniowych, rys. 6a. W przypadku rezultatów pochodzących z kierunku „C-D” obserwowano mniejszą redukcję kąta wychylenia, bez możliwości szacowania jej wartości dla liczby cykli zmęczeniowych przekraczających 2×10^6 , rys. 6b.

Pomiary momentu siły uzyskane po różnych etapach badania zmęczeniowego wykazały obniżanie jego wartości wraz ze wzrostem liczby cykli, rys. 7. Na diagramie prezentującym zmiany momentu siły w funkcji liczby cykli, wykreślonym w skali półlogarytmicznej przebieg ten można wyrazić linią prostą, dając możliwość szybkiego określania wartości momentu siły dla liczby cykli powyżej 2×10^6 . Na tej podstawie poszukiwano liczby cykli, przy której wystąpi graniczna wartość momentu siły, tj. 1.0 Nm [7], osiągnięcie której wyklucza przegub kulisty z użytkowania, [7]. W badanym przypadku liczba ta wyniosła 1×10^7 cykli.



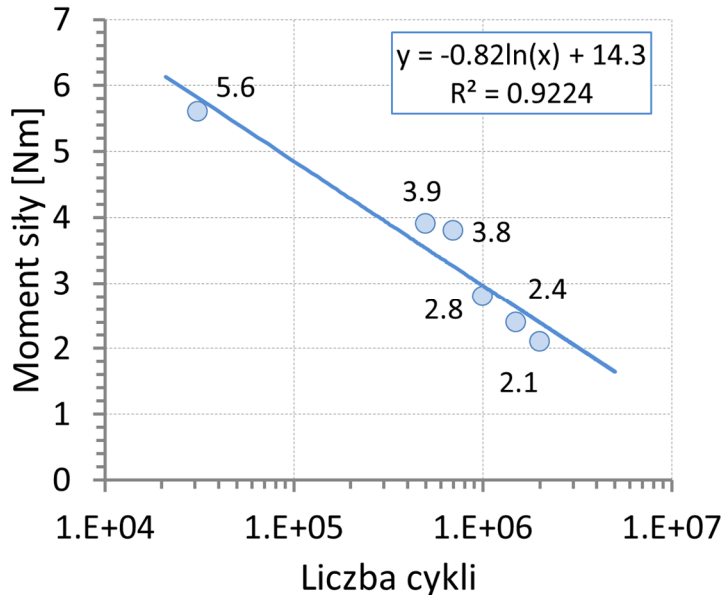
(a)



(b)

Rys. 6. Kąt wychylenia trzpienia przegubu w funkcji liczby cykli: (a) w kierunku A-B, (b) w kierunku C-D

Fig. 6. Bar angle of the ball joint versus number of cycles for: (a) A-B direction, (b) C-D direction



(a)

Rys. 7. Zmiany momentu siły w funkcji liczby cykli
 Fig. 7. Variations of force moment versus number of cycles

Na podstawie przeprowadzonych prób można sformułować zalecenia dotyczące oceny trwałościowej końcówek przegubów kulistych drążków kierowniczych:

- a. **Badania zmęczeniowe stanowiskowe z inspekcją stanu osłony przegubu kulistego oraz testy statyczne do określania momentu siły oraz kąta wychylenia trzpienia są wymaganymi rodzajami testów.**
- b. Badania zmęczeniowe należy realizować w ośmiu etapach określanych przyrostem liczby cykli co 2.5×10^5 do uzyskania 2×10^6 cykli;
- c. Na każdym z etapów testu należy prowadzić oględziny osłony przegubu oraz wykonywać pomiary momentu siły. W przypadku wystąpienia pęknięcia osłony należy odnotować liczbę cykli, przy której wystąpiło uszkodzenie. Pomiary wartości kątów wychylenia należy realizować w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach. Jeden z nich powinien pokrywać się z osią główną drążka kierowniczego, drugi natomiast powinien być do niego prostopadły. Pomiary momentu siły należy prowadzić poprzez obrót kuli względem miseczki.
- d. W przypadku wystąpienia pęknięcia osłony, dalsze badania mogą być prowadzone pod warunkiem braku wpływu czynników zewnętrznych na warunki tarcia pary współpracującej kula-miseczka. Wyniki tych prób będą jedynie sprawdzeniem trwałości układu kula-miseczka bez uogólniania na cały obiekt badań.
- e. Rezultaty prób pomiarów kąta wychylenia oraz momentu siły należy zestawić z liczbą cykli, przy której prowadzono pomiary.
- f. Na podstawie zależności momentu siły i liczby cykli należy przeprowadzić prognozę wystąpienia wartości momentu siły wynoszącej w przypadku pojazdów osobowych i dostawczych odpowiednio: 1.0 i 10.0 Nm [7].

4. Podsumowanie

Ocenę trwałości zmęczeniowej końcówki przegubu kulistego drążka kierowniczego należy prowadzić łącząc wyniki badań prób zmęczeniowych, oględzin osłony gumowej oraz prób statycznych. Pozytywne rezultaty wszystkich trzech rodzajów testów dają podstawy do uznania jakości rozpatrywanego obiektu.

LITERATURA:

- [1] Informacje serwisowe XZS143, TRW-Safety, 3 strony.
- [2] EPS Steering Rack Rattle.
- [3] Kocańda S., Zmęczeniowe pękanie metali, WNT, Warszawa, 1985, 492 strony.
- [4] Kocańda S., Podstawy obliczeń zmęczeniowych, PWN, 1985, 276 stron.
- [5] Miao L., A Computer Controlled Test Bench for Automotive Steering System, Proceedings of the 2010 International Conference on Information Technology and Scientific Management, 380-383.
- [6] MTS 337 Power Steering Test System, 2 pages.
- [7] Procedura badawcza WT ITS/63/13-CBM pt.: „Przeguby kuliste układu kierowniczego oraz układu zawieszenia pojazdów samochodowych”, Centrum Badań Materiałowych, Instytut Transportu Samochodowego, 2013.
- [8] Regulamin nr 55 Europejskiej Komisji Gospodarczej Organizacji Narodów Zjednoczonych (EKG ONZ) – Jednolite przepisy dotyczące homologacji mechanicznych elementów sprzęgających zespołów pojazdów [2018/862], 10.02.2018.
- [9] SERVOTEST, Steering Test Rigs, 12 pages.
- [10] Wskazówki warsztatowe: Elementy układu kierowniczego, SPIDAN Original GKN Parts, 16 stron.
- [11] Steering Test Systems Characterization – Fatigue - Dynamic Evaluation, 4 pages.
- [12] www.gknservice.com.
- [13] www.instron.com.
- [14] www.mbdynamics.com.
- [15] www.mts.com.
- [16] www.servotestsystems.com.