BADANIA WPŁYWU OBECNOŚCI AZOTKU BORU W SMARZE NA OPORY RUCHU SWORZNIA DRĄŻKA KIEROWNICZEGO

KRZYSZTOF SICZEK[1], PIOTR JÓŹWIAK[2]

Politechnika Łódzka

Streszczenie

W artykule przestawiono budowę sworznia drążka kierowniczego badanego pojazdu. Celem badań omówionych w artykule było określenie wartości współczynnika tarcia między kulistymi powierzchniami sworznia i jego gniazda dla dwóch rodzajów smarów. Wykonano badania drogowe, mające na celu oszacowanie liczby względnych ruchów powierzchni sworznia i gniazda, na długości odcinka pomiarowego. Opracowano, przy użyciu metody elementów skończonych, model sworznia i jego gniazda. W modelu tym obliczono naciski oddziałujące na powierzchnie sworznia. Ponadto w artykule zamieszczono schemat stanowiska badawczego do pomiaru momentu tarcia, między współpracującymi powierzchniami kulistymi, w warunkach ruchu rewersyjnego. Na tym stanowisku wykonano badania momentu tarcia między powierzchniami sworznia drążka kierowniczego i jego gniazda, w obecności smaru litowego oraz w obecności smaru litowego z dodatkiem azotku boru. Na podstawie obliczonych nacisków oddziałujących na kulistą powierzchnie sworznia oraz na podstawie zmierzonych wartości momentu tarcia oszacowano wartości współczynnika tarcia między sworzniem i jego gniazdem. Odnotowano nieliniową zależność współczynnika tarcia od prędkości poślizgu, w tym zjawiska histerezowe.

Słowa kluczowe: sworzeń drążka kierowniczego, moment tarcia, smar litowy, azotek boru

Spis oznaczeń

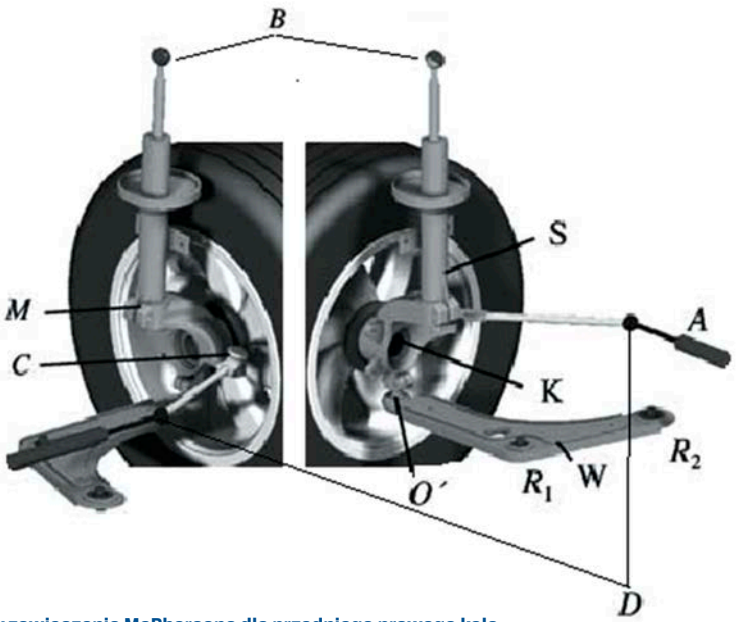
A – połączenie przesuwne zębatka kierownicza – nadwozie, *B* – kuliste połączenie amortyzatora z nadwoziem, *C* – połączenie kuliste poprzeczny drążek kierowniczy – amortyzator - przegub, *D* – połączenie kuliste drążek kierowniczy – zębatka kierownicza, *K* – przegub, *M* – tuleja amortyzująca, *O'* – kuliste połączenie wahacz–amortyzator–przegub, R_1 – tuleja, R_2 – tuleja, *S* – amortyzator, *W* – wahacz

[1] Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, e-mail: ks670907@p.lodz.pl, tel. 42 631 22 50

[2] Politechnika Łódzka, Katedra Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, e-mail: piotr.jozwiak@p.lodz.pl, tel. 42 631 22 53

1. Wprowadzenie

Kolumna McPhersona jest systemem wykorzystywanym obecnie w wielu małych i średnich samochodach. Jej powszechna konfiguracja (rys. 1), obejmuje amortyzator (S) sztywno połączony ze wspornikiem koła lub przegubem (K). Górna część amortyzatora jest dołączona do nadwozia (B) za pomocą elastycznego zespołu utworzonego przez elastyczny element i oporowe łożysko kulkowe, co pozwala na obracanie się amortyzatora [1].

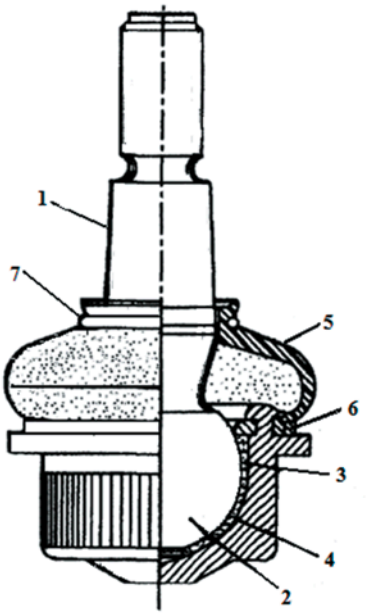


Rys. 1. Elementy zawieszenia McPhersona dla przedniego prawego koła.
***A* – połączenie przesuwne zębatka kierownicza – nadwozie, *B* – połączenie kuliste tłoczysko amortyzatora – nadwozie, *C* – połączenie kuliste poprzeczny drążek kierowniczy – siłownik – przegub, *D* – połączenie kuliste drążek kierowniczy – zębatka kierownicza, *K* – przegub, *M* – tuleja amortyzująca, *O'* – połączenie kuliste wahacz – siłownik – przegub, R_1 – tuleja R_2 – tuleja, *S* – amortyzator, *W* – wahacz**

W dolnej części zawieszenia znajduje się wahacz (W), który dołącza przegub do podwozia. Połączenie pomiędzy przegubem i trójkątnym wahaczem jest ustanowione za pośrednictwem kulistego przegubu (0'), a trójkątny wahacz jest przyłączony do podwozia za pomocą dwóch tulei (R1 i R2), które umożliwiają względny obrót pomiędzy tymi dwoma elementami.

W celu przekazania obrotu koła kierownicy do koła, drążek kierowniczy jest podłączony do zwrotnicy lub tłumika również za pomocą kulistego przegubu (rys. 1).

Jak pokazano na rysunku 2, zespół przegubu kulowego zawiera sworzeń 1 z kulą 2 na jego dalszym końcu. Kula jest osadzona w smarze 3, w gnieździe 4, które może jest zintegrowane z łącznikiem drążka stabilizatora. Elastomerowa osłona 5 jest zabezpieczona dolnym i górnym pierścieniem mocującym 6, 7 dla zapewnienia uszczelniania gniazda 4.



Rys. 2 Zespół przegubu kulowego. 1 – sworzeń, 2 – kula, 3 – smar, 4 – gniazdo, 5 – osłona elastomerowa, 6, 7 – dolny i górny pierścienie mocujące

2. Warunki pracy analizowanego sworznia drążka kierowniczego

Sworzeń drążka kierowniczego może być wykonany, na przykład, ze stali AISI-SAE 5140. Jak stwierdzono w pracy [2] mikrostruktura kuli sworznia była utworzona głównie przez odpuszczony martenzyt z iglastymi wtrąceniami ferrytu na granicach ziaren. Taka obecność odpuszczonego martenzytu oznacza, że materiał poddano ulepszaniu cieplnemu. Występował korzystny efekt w postaci wzrostu ciągliwości iglastego ferrytu w stalach niskowęglowych [3–5]. Dodatkowo iglasty ferryt może zmniejszać odporność na kruche pękanie i wytrzymałość na rozciąganie hartowanych stali, gdy występuje na granicach ziaren odpuszczonego martenzytu [6, 7].

Obecność iglastego ferrytu na granicach ziaren może oznaczać lokalne zmniejszenie twardości materiału, co powoduje zmniejszenie trwałości zmęczeniowej. To, wraz ze zmniejszeniem ciągliwości może gwałtownie obniżyć trwałość składnika.

Według Murakami [8], jednoosiowa wytrzymałość na zmęczenie σ_f może być uzależniana od twardości Vickersa H_v za pomocą wzoru (1):

$$\sigma_f = 1.6H_v \pm 0.1H_v \quad (1)$$

Mierzona twardość objętościowa Vickersa wynosiła 353 Hv. Dlatego, korzystając ze wzoru (1), jednoosiowa wytrzymałość na zmęczenie materiału mogło wynosić w przybliżeniu 565 MPa ± 35.3 MPa. W pracach [9, 10] studiowano eksperymentalnie wpływ obróbki cieplnej na własności stali AISI-SAE 5140, używanej w produkcji sworzni kulistych elementów zawieszenia, ustalając wytrzymałość zmęczeniową na 416 MPa. Ponieważ wytrzymałość określona przez Alsarana jest niższa niż obliczona ze wzoru (1), ją użyto jako objętościową wytrzymałość na zmęczenie badanych sworzni kulistych.

Mikrotwardość Vickersa iglastego ferrytu na granicach ziaren odpuszczonego martenzytu wynosiła średnio 204 Hv. Używając wzoru (1), wytrzymałość na zmęczenie dla iglastego ferrytu wynosi około 326 MPa ± 20.4 MPa. Mimo różnic w wytrzymałości zmęczeniowej określonych z zależności Murakami i Alsarans, wyraźnie iglasty ferryt zmniejsza wytrzymałość zmęczeniową materiału o około 40%. To zmniejszenie wytrzymałości zmęczeniowej może być przyczyną inicjowania pęknięć zmęczeniowych elementu, które są następnie wzmagane poprzez naciski stykowe, co jest podkreślone przez obecność oznak zapadnięć na powierzchni przełomu.

Obciążenie sworznia drążka kierowniczego może wynosić nawet 500 N [2, 11].

Kątowe przemieszczenia powierzchni kuli względem jej gniazda nie przekraczają 15°. Prędkości tych przemieszczeń nie są duże i silnie zależą od reakcji kierowcy.

W celu wyznaczenia orientacyjnych wartości przemieszczeń powierzchni kulistych sworzni drążków kierowniczych względem ich gniazd wykonano obserwację ruchów kierownicy podczas jazdy pojazdem Opel Vectra B rok produkcji 1999.

Podczas jazdy na odcinku pomiarowym 1300 m, ze średnią prędkością 40 km/h, wykonane zostało 67 ruchów kierownicą, co odpowiada 67 przemieszczeniom w kulistych łącznikach drążków kierowniczych. Ruchy te były spowodowane omijaniem nierówności nawierzchni. Obserwowane kątowe przemieszczenia kierownicy wahały się od 30° - 100°, wykonywanych poniżej 1 s. Przy uwzględnieniu maksymalnego przełożenia zębatkowej przekładni kierowniczej 16.5:1 [12], odpowiada to kątowym przemieszczeniom powierzchni kulistych sworzni rzędu 1.8° - 6°. Oczywiście, przy większych kątach skrętu kierownicy, przełożenie przekładni jest nieco mniejsze, co zwiększa kątowe przemieszczenia wspomnianych powierzchni kulistych.

Średnia prędkość względnego ruchu współpracujących powierzchni kulistych sworznia i jego gniazda może być oszacowana ze wzoru (2):

$$v_a = \frac{\sqrt{2}}{2}\omega_{\max} \cdot \frac{2R}{\pi} \tag{2}$$

gdzie: R – promień części kulistej sworznia, $\omega_{\max}$ – maksymalna względna prędkość kątowa sworznia względem jego gniazda.

Wyznaczona maksymalna prędkość kątowa $\omega_{\max}$ waha się od 0.032 – 0.105 rd/s. Odpowiada to średniej prędkości względnej v_a równej 0.00019 - 0.00063 m/s.

3. Cel pracy i środki stosowane do zmniejszenia oporów ruchu w styku sworznia z jego gniazdem

Celem badań omówionych w artykule było określenie wartości współczynnika tarcia między kulistymi powierzchniami sworznia i jego gniazda dla dwóch rodzajów smarów.

W przypadku smarów plastycznych, w tym litowych, stosowane są w pewnych specjalnych przypadkach jako środki przeciwzatarciowe i uszczelniające: grafit [13], dwusiarczek molibdenu [14], azotek boru [15-17], proszki metali i inne. Smar utrzymuje cząstki stałe w zawiesinie. Drobno zmielone, smary stałe, takie jak dwusiarczek molibdenu i grafit są mieszane ze smarem w wysokiej temperaturze lub w przy bardzo wysokim ciśnieniu [18].

Przykładem smaru plastycznego z dodatkiem dwusiarczku molibdenu jest Vecolit MOS, przeznaczony do smarowania mechanizmów podwozi pojazdów i urządzeń przemysłowych, pracujących w warunkach obciążeń uderzeniowych, wibracji i zapylenia. Przeznaczony on jest do pracy w zakresie temperatur od -50 do 140 °C. Jest zalecany do smarowania samochodowych przegubów homokinetycznych [19].

Przykładem smaru plastycznego z dodatkiem grafitu jest Vecocal grafitowany, przeznaczony do smarowania mechanizmów podwozi pojazdów i mechanizmów o niewielkiej dokładności wykonania (przekładni betoniarek, przekładni śrubowych, prowadnic), pracujących w typowych warunkach eksploatacji. Może być stosowany jako smar montażowy, ułatwiający montaż i ponowny demontaż połączeń gwintowych i sworzni. Przeznaczony jest on do pracy w zakresie temperatur od –30 do 60 °C [19].

Do smarów plastycznych stosuje się stabilną termodynamicznie odmianę azotku boru, którą w warunkach normalnych jest faza heksagonalna (α-BN), o wytrzymałości zbliżonej do grafitu. Można ją otrzymać z wykorzystaniem syntezy spaleniowej w wyniku rozkładu tetrahydroboranu hydrazyniowego (N2H5BH4) [20].

Azotek boru jest nazywany "białym grafitem", gdyż jest stałym materiałem smarnym o płatkowej heksagonalnej strukturze, podobnie jak grafit. W odróżnieniu od grafitu jest dobrym izolatorem. Ma bardzo wysoka przewodność cieplną i dobrą odporność na udar cieplny. Jest on stabilny w obojętnej i redukującej atmosferze, aż do 2800°C, a w atmosferze utleniającej 850°C [21].

Według opisu patentowego [22], w bazie plastycznej o wysokiej czystości i niskiej temperaturze mięknienia i kroplenia jest zalecane wprowadzanie w procesie mieszania drobno zmielonego azotku boru (α-BN) w ilości do 10% wagowo. W smarze plastycznym do nasycania porowatych łożysk, spiekanych z proszków żelaza lub brązu, o porowatości 20 - 30%, najkorzystniej jest stosować azotek boru w ilości 5% wagowo [22].

Azotek boru zasadniczo nie wpływa na własności reologiczne smaru litowego.

Podczas badań stożkowych łożysk tocznych łożysk nr 30209, o wymiarach 45x85x19 mm przy obciążeniu P =1820 N oraz n =1700 obr/min uzyskano dwukrotnie mniejsze opory ruchu smarowanych smarem ŁH43 z dodatkiem 2% wagowych azotku boru w porównaniu z czystym smarem [22].

Z kolei podczas badań porowatych łożysk rozrusznika, wykonanych ze spiekanych proszków brązu i napełnionych litowym smarem plastycznym z dodatkiem azotku boru w ilości 1 – 10 % wagowo stwierdzono, że zmniejszenie wartości momentu tarcia w stosunku do czystego smaru, występowało dla zawartości azotku 2-4% wagowo [23].

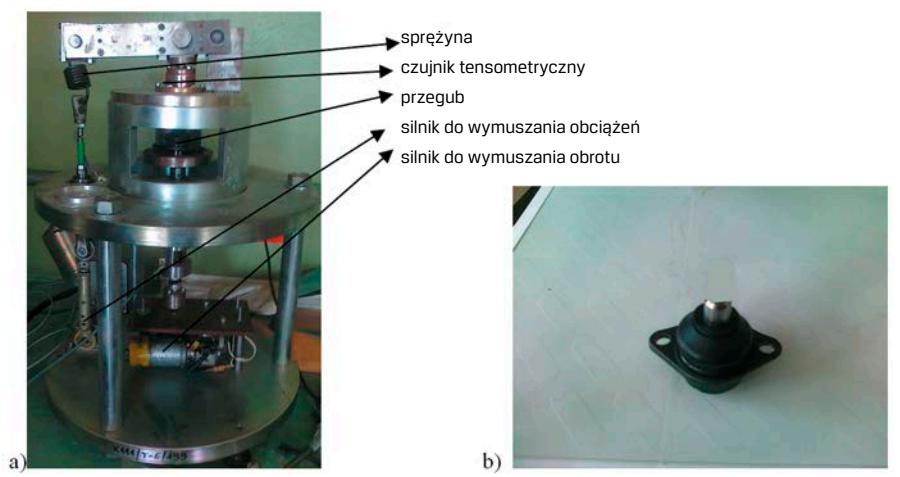
W [24] przedstawiono wyniki badań odpornych na działanie niskich temperatur smarów, opracowanych na bazie mieszaniny syntetycznych polialfaolefin i sebacynianu dioktylu i zagęszczonych modyfikowaną krzemionką – czystego i z dodatkiem azotku boru. Stwierdzono, że azotek boru zastosowany w stężeniu 2%, 4%, 8% pogorszył właściwości przeciwzużyciowe opracowanego smaru i nie wpłynął na poprawę właściwości przeciwzatarciowych smaru.

4. Stanowisko badawcze do pomiaru momentu tarcia miedzy kulistymi powierzchniami sworznia i jego gniazda

Jeden ze wspomnianych oryginalnych sworzni drążka kierowniczego został zbadany na stanowisku umożliwiającym wyznaczenie momentu tarcia między kulą sworznia i jej gniazdem. Zdjęcie stanowiska badawczego, posiadanego przez Katedrę Pojazdów i Podstaw Budowy Maszyn Politechniki Łódzkiej zamieszczono na rysunku 3.

Badaniom poddano sworzeń drążka kierowniczego wraz z jego gniazdem. Średnica kulistej części sworznia wynosiła 27 mm. Nieruchomy sworzeń był obciążany stałą siłą równą 7 N. Gniazdo wykonywało ruchy rewersyjne ze stałą częstotliwością równą 0.12 Hz. Wykonano dwie serie pomiarowe:

- dla współpracy kuli sworznia z jej gniazdem smarowanych oryginalnym smarem litowym,



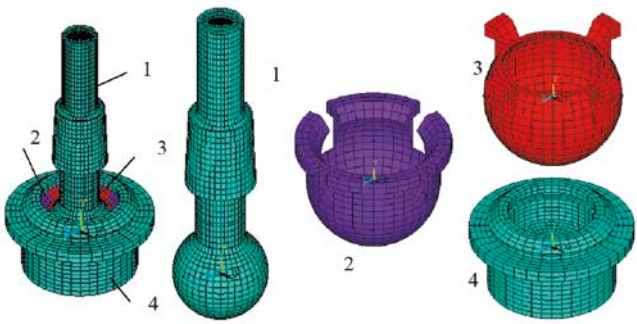
Rys. 3. a) Stanowisko badawcze do pomiaru momentu tarcia między kulistymi powierzchniami sworznia drążka kierowniczego i jego gniazda, b) badany sworzeń (po obcięciu)

- dla współpracy kuli sworznia z jej gniazdem smarowanych smarem litowym z zawartością 4% BN

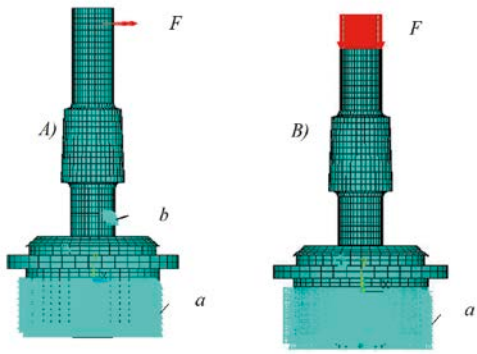
5. Model sworznia drążka kierowniczego

Model sworznia drążka kierowniczego został wykonany przy użyciu MES i przedstawiony na rysunku 4. Model składał się ze sworznia 1, gniazda 2, smaru3 i oprawy 4. Siatka elementów skończonych została wygenerowana automatycznie przez komercyjny program ANSYS [25]. Warunki brzegowe, przedstawione na rysunku 5, były następujące. Oprawa gniazda została zamocowana na swej zewnętrznej powierzchni cylindrycznej. W przypadku, odpowiadającym rzeczywistemu obciążeniu (rys. 5A), sworzeń został w miejscu a podparty na wycinku powierzchni walcowej o długości 3 mm i wysokości 1 mm. Sworzeń został obciążony promieniową siłą 500 N. Wartość tej siły przyjęto na podstawie danych literaturowych [2, 11].

W przypadku odpowiadającym badaniom eksperymentalnym (rys. 5B) sworzeń został obciążony siłą osiową równą 7 N, równej rzeczywistemu obciążeniu na stanowisku badawczym.



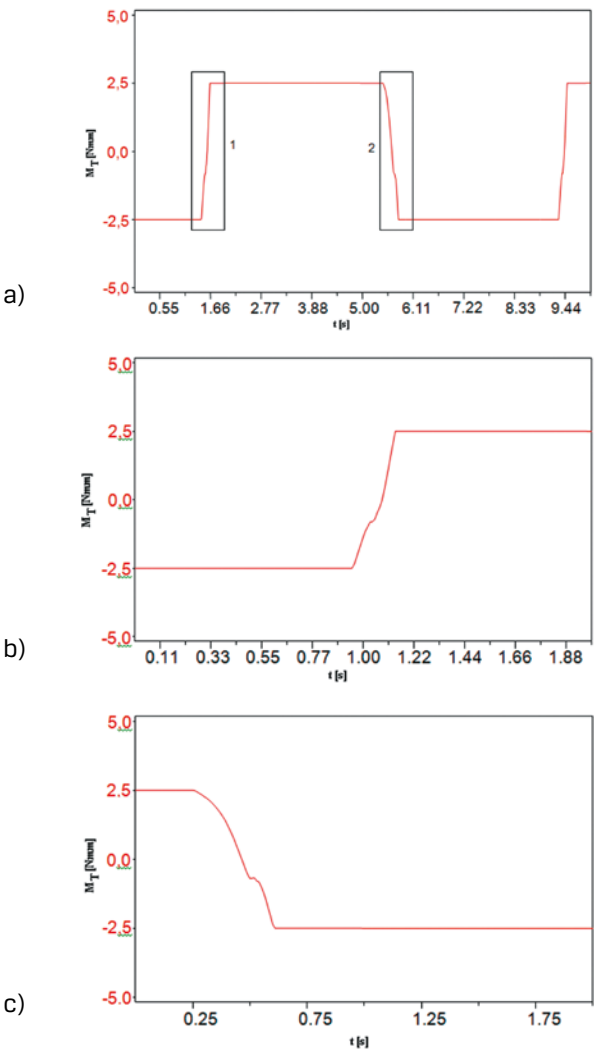
Rys. 4. Siatka elementów skończonych w modelu sworznia drążka kierowniczego 1 – sworzeń, 2 – gniazdo, 3 – smar, 4 – oprawa



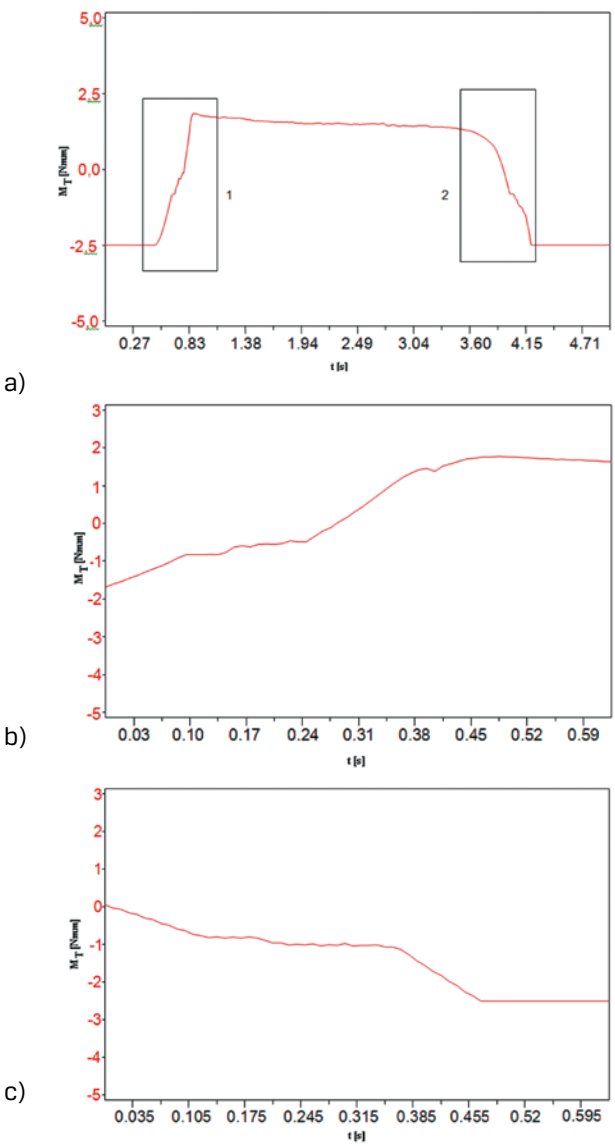
Rys. 5. Warunki brzegowe w modelu sworznia drążka kierowniczego; A) obciążenie promieniową siłą *F*, B) obciążenie osiową siłą *F*; a – zamocowanie zewnętrznej powierzchni cylindrycznej gniazda, b – podparcie sworznia na wycinku powierzchni cylindrycznej, *F* – siła obciążająca sworzeń

6. Wyniki pomiarów

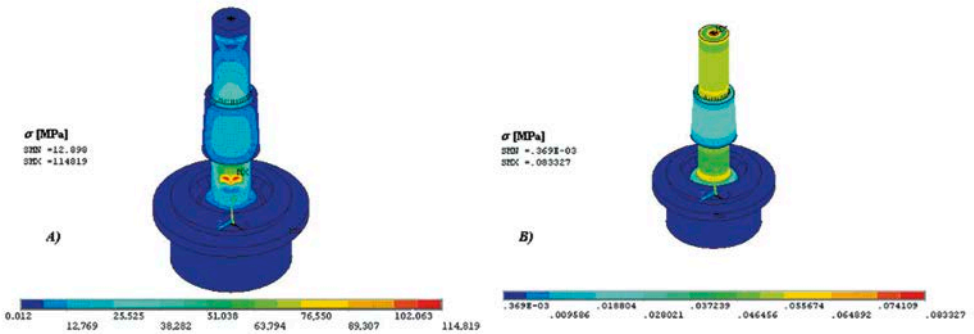
W wyniku przeprowadzonych pomiarów na stanowisku badawczym uzyskano wykresy momentu tarcia w funkcji czasu dla przegubów smarowanych smarem oryginalnym i smarem z dodatkiem azotku boru. Uzyskane wartości mierzonego momentu tarcia w funkcji czasu przedstawiono na rysunku 6a. Powiększenia częściowych widoków 1 i 2 pokazano na rysunkach odpowiednio na rysunku 6b i 6c. Wartości bezwzględne momentu tarcia nie przekraczały 2.5 Nmm.



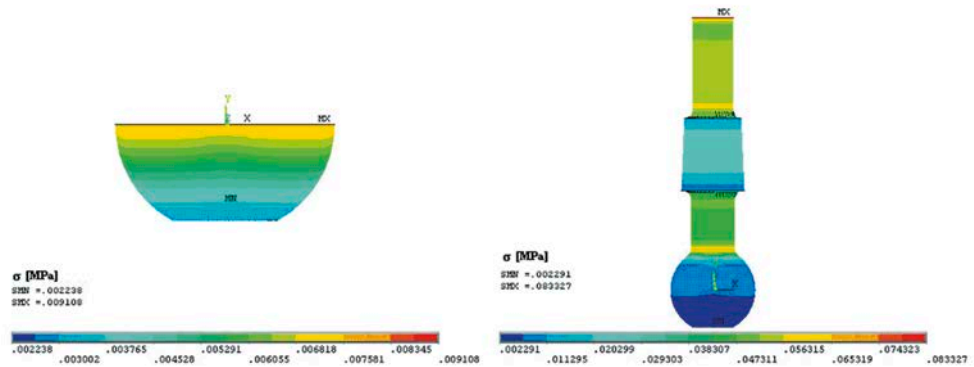
Rys. 6. a) Moment tarcia w funkcji czasu, częstotliwość ruchu rewersyjnego 36 Hz, b) powiększenie fragmentu 1), c) powiększenie fragmentu 2; przypadek styku stal - stal



Rys. 7. a) Moment tarcia w funkcji czasu, częstotliwość ruchu rewersyjnego 36 Hz, b) powiększenie fragmentu 1), c) powiększenie fragmentu 2; przypadek styku stal – stal ze smarem z dodatkiem azotku boru



Rys. 8. Naprężenia zredukowane w modelu sworznia drążka kierowniczego; A – obciążenie siłą promieniową *F* = 500 N, B – obciążenie siłą osiową *F* = 7 N



Rys. 9. Naprężenia zredukowane w modelu sworznia drążka kierowniczego obciążonego siła osiową F = 7 N

Przy obciążeniu sworznia siłą promieniową 500 N średnie obciążenia powierzchni kulistej sworznia wynosiły 0.87 MPa.

Przy obciążeniu sworznia siła osiowa 7 N, średnie zredukowane naprężenie w styku wynosiło 0.00393 MPa, a maksymalne zredukowane naprężenie w styku wynosiło 0.008 MPa.

Współczynnik tarcia może być wyznaczony z zależności (3):

$$\mu = \frac{M_T}{2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot \frac{2}{3} \cdot R^3} \tag{3}$$

gdzie: M_T – moment tarcia, σ – średnie naprężenie zredukowane w styku

Obliczona wartość współczynnika tarcia, dla smaru litowego wynosiła 0.062. Dla smaru litowego z dodatkiem 4% azotku boru wynosiła od 0.031 do 0.045. Dodatek 4% azotku boru do smaru litowego spowodował zmniejszenie oporów tarcia od 27 – 50%.

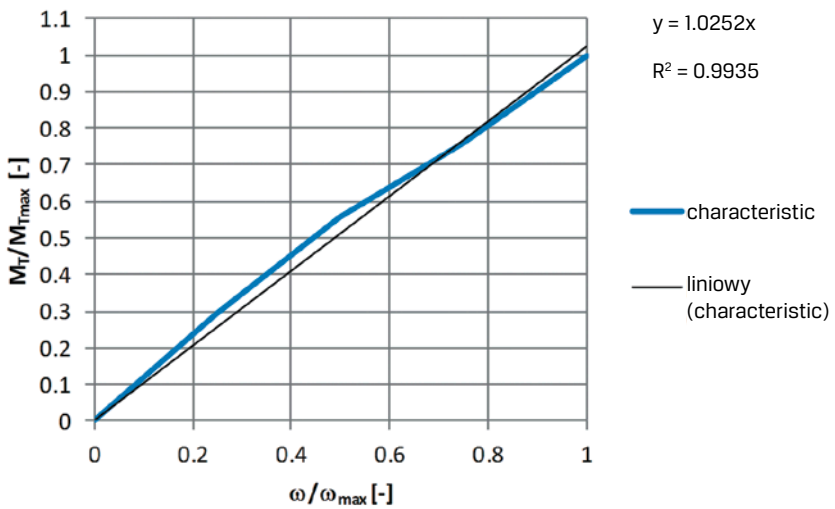
Moc P_T, potrzebna na pokonanie oporów tarcia w sworzniu drążka kierowniczego może być wyznaczona ze wzoru (4):

$$P_T = M_T \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \omega_{\max} \tag{4}$$

Przy obciążeniu sworznia siłą promieniową F = 500 N w styku powierzchni kulistej sworznia i gniazda, smarowanego smarem litowym występuje moment tarcia M_T wynoszący 553 Nmm.

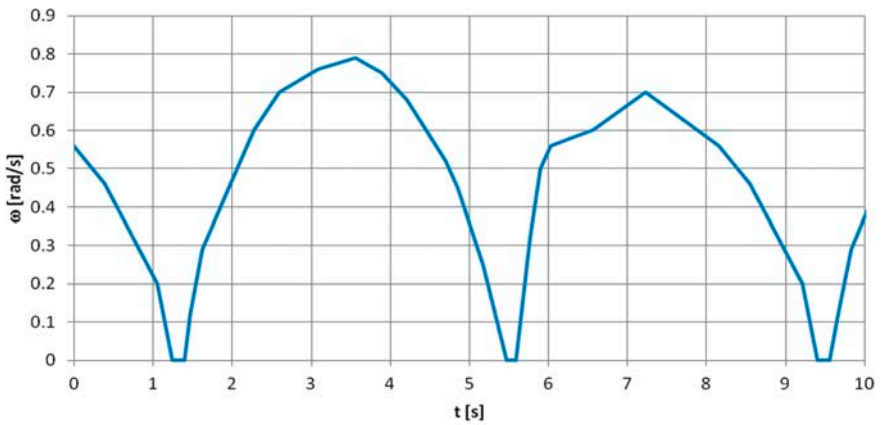
Na jego pokonanie potrzebna jest moc tarcia P_T, obliczana ze wzoru (4) i wynosząca 0.012 – 0.041 W.

Interesująca jest zmiana współczynnika tarcia w funkcji średniej prędkości obwodowej. Do przybliżonej analizy założono, że przebieg zmian względnego momentu tarcia w styku w funkcji względnej prędkości kątowej jest analogiczny do przebiegu zmian względnego momentu tarcia w funkcji względnej prędkości kątowej poślizgu w sprzęgle ciernym, uzyskanej z rotacyjnego modelu LuGre (rys. 10) [26]. Zależność ta jest niemal liniowa. Dla uproszczenia analizy pominięto zjawiska stick-slip, choć z uwagi na stosunkowo małą częstotliwość wymuszeń (0.12 Hz) mogą one generować cykliczne zmiany wartości siły/momentu tarcia nawet o 10%, z częstotliwością co najmniej o rząd większą od częstotliwości wymuszenia, zgodnie ze wskazaniami w [26, 27].

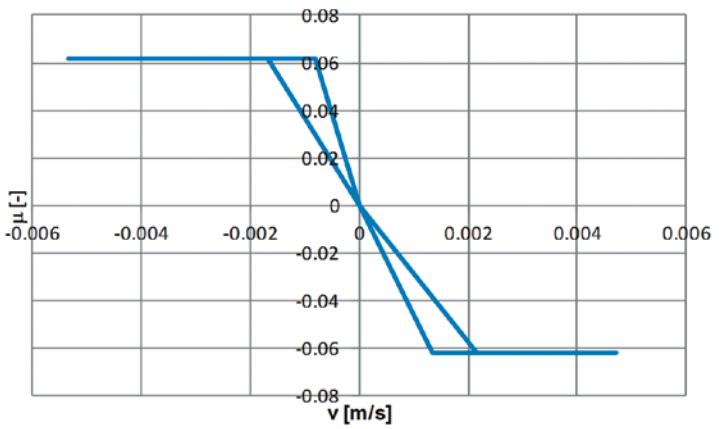


Rys. 10. Stosunek momentu tarcia M_T do momentu maksymalnego M_{Tmax} = 4.86 Nm Nm w funkcji stosunku prędkości kątowej poślizgu ω_{max} = 0.16 rad/s

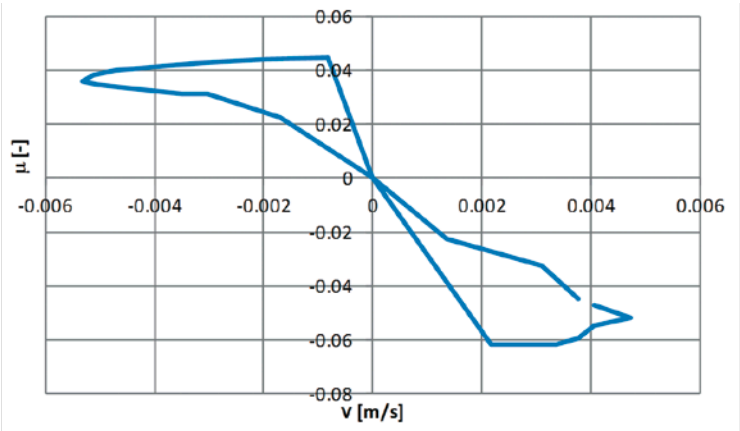
Dodatkowo opracowano wykres prędkości obrotowej poślizgu badanego sworznia względem jego gniazda w funkcji czasu (rys. 11), na bazie danych z [28]. Na podstawie tego wykresu i wzoru (2) obliczono przebieg zmian średniej prędkości poślizgu w badanym sworzniu w funkcji czasu. 12). Na podstawie przebiegu prędkości, przebiegu momentu tarcia oraz wzoru (3) wyznaczono wykresy współczynnika tarcia w funkcji prędkości poślizgu dla trzech przypadków: czystego smaru litowego (rys. 13), smaru litowego z dodatkiem 4% azotku boru (rys. 14) i z momentu tarcia uzyskanego z rotacyjnego modelu LuGre (rys. 15) [26].



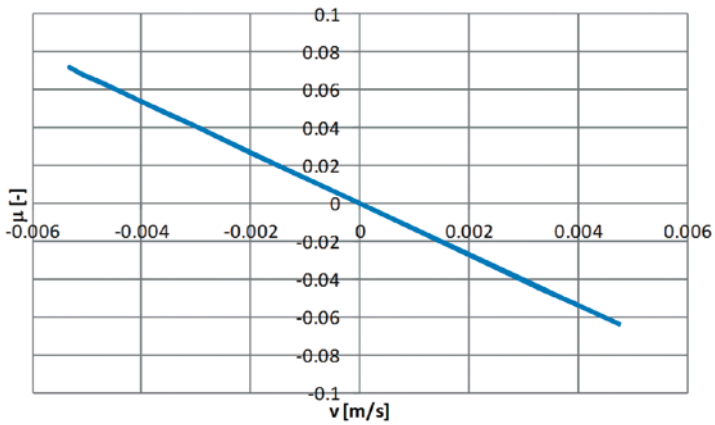
Rys. 11. Bezwzględna wartość prędkości kątowej poślizgu ω w funkcji czasu *t*



Rys. 12. Współczynnik tarcia *μ* w styku badanego sworznia z jego gniazdem w funkcji prędkości kątowej poślizgu ω, dla przypadku czystego smaru litowego



Rys. 13. Współczynnik tarcia μ w styku badanego sworznia z jego gniazdem w funkcji prędkości kątowej poślizgu ω, dla przypadku smaru litowego z dodatkiem 4% azotku boru



Rys. 14. Współczynnik tarcia μ w styku badanego sworznia z jego gniazdem w funkcji prędkości kątowej poślizgu ω, dla momentu tarcia obliczanego z rotacyjnego modelu LuGre

Różnice w przebiegach prędkości kątowej ω w funkcji czasu t wynikają z różnic sztywności stanowiska badawczego podczas różnych kierunków obracania gniazda względem sworznia.

Zależność współczynnika tarcia od prędkości kątowej poślizgu wykazuje nieliniowość (rys. 10, 12-13), w tym obecność zjawisk histerezowych (rys. 13 i 14). Charakter histerezy dla przypadku czystego smaru litowego zdecydowanie się różni od smaru litowego z dodatkiem 4% azotku boru. Ujemne wartości współczynnika tarcia i prędkości obrotowej

wynikają z kierunku obrotów. Niemal liniowa zależność współczynnika tarcia w funkcji prędkości poślizgu, uzyskana z modelu LuGre tylko zgrubnie oddaje zmiany współczynnika tarcia w funkcji prędkości poślizgu.

7. Wnioski

1. Średnie wartości naprężeń w styku powierzchni kulistych sworznia i jego gniazda są o 50% mniejsze niż wartości maksymalne.
2. Średnie wartości prędkości względnej w styku powierzchni kulistych sworznia i jego gniazda są o 22 % mniejsze od wartości maksymalnych.
3. Dodatek 4% azotku boru do smaru litowego spowodował zmniejszenie oporów tarcia od 27 – 50% w stosunku do czystego smaru litowego.
4. W styku badanego sworznia i jego gniazda smarowanego smarem litowym występuje nieliniowa zależność współczynnika tarcia od prędkości poślizgu. Obecne są zjawiska histerezowe, których charakter zmienia się po dodaniu azotku boru.

Literatura

[1] REIMPELL J., STOLL H.: *The Automotive Chassis: Engineering Principles,* Ed. Arnold, London, 1998.

[2] OSSA E.A., PALACIO C.C., PANIAGUA M.A.: *Failure analysis of a car suspension system ball joint,* Engineering Failure Analysis 18 (2011), s. 1388–1394

[3] HE K., EDMONDS D.V.: *Formation of acicular ferrite and influence of vanadium alloying.* Mater Sci Technol 2002;18:289–96.

[4] BOL'SHAKOV V.I., LAUKHIN D.V., SUKHOMLIN G.D., KUKSENKO V.I.: *Effect of heat treatment on formation of acicular ferrite and on the properties of low carbon microalloyed steels 10G2FB and 09G2S.* Met Sci Heat Treat 2004;46(11–12):545–50.

[5] MAZANCOVA E., RUCKA Z., MAZANEC K.: *Comparison of microfractographic behaviour of acicular ferrite and bainite and hydrogen cracking resistance.* Arch. Mater Sci 2007;28(1–4):95–9.

[6] HUANG Z., YAO M.: *Effect of arrangement of acicular ferrite in a Widmanstatten microstructure on the fracture of mild steel.* Mater Sci Eng: A 1989;119:211–7.

[7] OSSA E.A., PANIAGUA M.: *Failure analysis of a fastener system and its analytical prediction,* SAMPE conference, Baltimore, MD, USA. 2009.

[8] MURAKAMI Y.: *Metal fatigue: effects of small defects and non-metallic inclusions.* Elsevier; 2002.

[9] ALSARAN A., KARAKAN M., CELIK A.: *The investigation of mechanical properties of ion-nitrided AISI 5140 low-alloy steel Materials Characterization.* Mater Charact 2002;48:323–7.

[10] BAYRAK M., OZTURK F., DEMIREZEN M., EVIS Z.: *Analysis of tempering treatment on material properties of DIN 41Cr4 and DIN 42CrMo4 steels.* J Mater Eng Perform 2007;16(5):597–600.

[11] RYU Y.I., KANG D.O., HEO S.J., YIM H.J., JEON J.I.: *Development of analytical process to reduce side load in strut-type suspension.* J Mech Sci Technol 2010;24:351–6.

[12] http://forum.vectraklub.pl/index.php/topic/38770-x16xel-dane-techniczne-i-parametry/

[13] YOSHII Y., HIRAOKA N., SASAKI A., NODOMI Y., KENMOCHI N., 1997. T*he influence of atmosphere on the life of solid lubricated ball bearings.* Proc. 1 st World Tribology Congress. Mechanical Engineering Publications Ltd. London, 74.

[14] KAKIZAKI T., OKIZAKI Y., NISHIMURA M., 1999. *Improvement of tribological responses of sputtered MoSx films by carbon ion implantation.* Proc. VII th Inter. Symp. INTERTRIBO'99. Stara Lesna (Slovakia). Dom Technika Bratislava. 3-B-348.

[15] MRÓZ W., BUDNER B., CZWARTOS J., GOCMAN K., PROKOPIUK A., KAŁDOŃSKI T.: *Zastosowanie azotku boru jako materiału smarującego w porowatych łożyskach ślizgowych*, Inżynieria Materiałowa, nr 4(182), Warszawa, 2011

[16] KAŁDOŃSKI T., KRZEMIŃSKI K., 1997. *Zastosowanie azotku boru jako dodatku do smaru plastycznego wypełniającego łożysko toczne.* Tribologia 5-6, 658-666. Bratisława, vol. A, 40-48.

[17] KAŁDOŃSKI T.: *Tribologiczne zastosowania azotku boru.* Wojskowa Akademia Techniczna, Warszawa, 2006.

[18] http://www.machinerylubrication.com/Read/1352/grease-basics

[19] http://www.modex.com.pl/

[20] BOROVINSKAYA I.P, BUNIN V. A., MERZHANOV A. G.: *Self-propagating high-temperature synthesis of high-porous boron nitride.* Mendeleev Communications., 1997, Issue 2, pp. 47-48

[21] http://accuratus.com/boron.html

[22] Patent PL 192006 B1

[23] BURCAN J., SICZEK K.: *Badania wpływu warunków eksploatacyjnych na trwałość ponaprawczą łożysk na przykładzie układu łożyskowego rozrusznika*, sprawozdanie z projektu badawczego 7T07B00211, Politechnika Łódzka, 1998

[24] BAJER J.: *Wpływ dodatku smarnego na charakterystyki tribologiczne niskotemperaturowego smaru plastycznego.* Tribologia, Nr 6, 2006, s. 67 -80

[25] ANSYS v.12 help on-line documentation

[26] ANDRZEJWSKI R.: *Dynamika pneumatycznego koła jezdnego.* Wydawnictwo Naukowo techniczne, Warszawa, 2010

[27] GRUDZIŃSKI K., WARDA B.J., ZAPŁATA M.: *Badania pary ślizgowej jako układu o dwóch stopniach swobody.* Tribologia, 1996, t. 27, nr 5, s. 631-651

[28] BURCAN J., WITOSŁAWSKI P.: *Badania oporów tarcia w endoprotezach stawu biodrowego.* materiały seminarium Warsztaty Tribologiczne. Biotribologia. Politechnika Łódzka. Łódź, marzec 2007, dostępne: http://www.kkp.p.lodz.pl/PW.pdf