

Stanisław PYTKO^{*}, Paweł PYTKO^{*}

TRIBOLOGIA DLA PRZEMYSŁU I CZŁOWIEKA

TRIBOLOGY FOR INDUSTRY AND MAN

Słowa kluczowe:

współczynnik tarcia, zacieranie, zużycie, pitting, tarcie kół lokomotyw o szyny, łożyska toczne, nowe ciecze chłodząco-smarujące, tribologia dla człowieka

Key words:

coefficient of friction, scuffing, wear, pitting, friction of the locomotive wheels against a rail, rolling bearings, new cooling lubricant fluids, tribology for the man

Streszczenie

W publikacji omówiono zagadnienie od czego zależy współczynnik tarcia w ogólnym przypadku przed wystąpieniem zatarcia elementów maszyn, następnie jak w przypadku sportowych urządzeń, np. sanek, można poprawić parametry tarcia pomiędzy płozami sanek a lodem. Omówiono też współpracę koła lokomotywy z szyną do zwiększenia siły czepności i nowe substancje chłodząco-smarujące stosowane do skrawania metali, w czasie której powstaje też

^{*} AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, ul. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków.

powłoka wytworzona na powierzchni toczzonego elementu. Na zakończenie publikacji omówiono nowe projekty i stanowisko badawcze dla badań stawów człowieka.

WPROWADZENIE

W drugiej połowie XX wieku nauka o tarcii, zużyciu i smarowaniu nazwana *tribologią* (od greckiego słowa *tribos* = tarcie) wdarła się do nauki i techniki w związku z intensywnym rozpoczęciem podbijania kosmosu oraz rozwojem różnych maszyn technologicznych i dla transportu. W pracy przedstawione będą tylko przykłady na ten temat (ze względu na ograniczoną objętość tekstu), gdzie badania tribologiczne przyczyniły się do postępu w rozwoju nie tylko maszyn i urządzeń, ale sportu oraz rozwiązań endoprotez w miejscach uszkodzonych, np. stawów człowieka.

Dla zrozumienia dalszych rozważań podane będą podstawowe wzory dla określenia parametrów tarcia. Jeżeli przemieszczają się dwa ciała względem siebie, to zazwyczaj chcemy poznać współczynnik tarcia oraz ich zużycie po określonym czasie.

W przypadku elementów smarowanych, jak też niesmarowanych, przyjęć można, że najgroźniejsza forma zużycia w czasie tarcia zachodzi wtedy, kiedy po przerwaniu filmu smarnego rozpoczyna się proces zacierania **Rys. 1**.



Rys. 1. Rysa powstała w wyniku zatarcia

Fig. 1. A scratch formed during scuffing

Podstawowy wzór na współczynnik tarcia można zapisać jako:

$$\mu = \frac{T}{N} \quad (1), \text{ jeżeli wartości nacisku } N \text{ oraz siłę tarcia } T \text{ zapiszemy:}$$

$$\begin{aligned} N &= F_r \cdot p_q \\ T &= F_r \cdot \sigma_t \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie: F_r – pole rzeczywistej powierzchni styku, p_q – naciski jednostkowe w styku, σ_t – naprężenie jednostkowe konieczne dla ścięcia zgrzewanych obszarów.

Podstawiając wzory (2) do zależności (1), otrzymamy następujący wzór na współczynnik tarcia:

$$\mu = \frac{\sigma_t}{p_q} \quad (3)$$

Przypominamy te podstawowe wzory z fizyki i tribologii, ażeby zrozumieć, że dla obniżenia wartości współczynnika tarcia należy albo zmniejszyć wartość licznika – to jest σ_t , albo zwiększyć wartość p_q . Wiadomym jest, że w wielu przypadkach chcemy mieć niską wartość współczynnika tarcia ze względu na:

- opory ruchu i związane z tym straty energetyczne,
- zużycie elementów maszyn.

Jak zatem praktycznie można zmniejszyć wartość σ_t ? Można to osiągnąć między innymi:

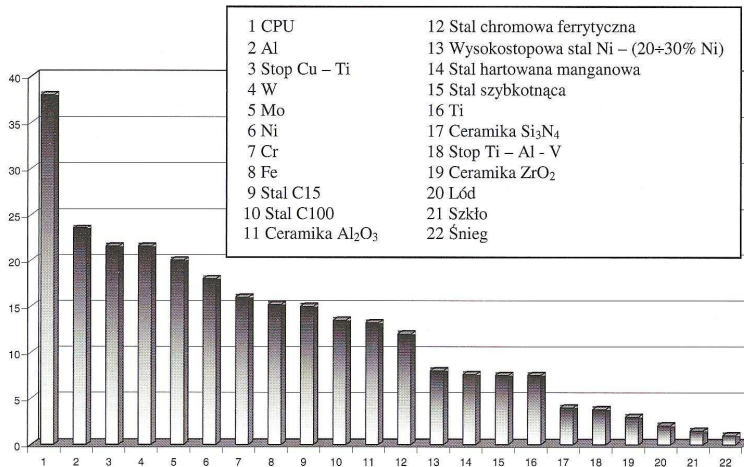
- przez wytworzenie na powierzchniach elementów maszyn warstw (powłok) o małej wartości σ_t , metodami chemicznymi czy też fizycznymi; obecnie możemy to zrobić metodą np. PVD (*Physical Vapour Deposition*),
- albo wprowadzić pomiędzy elementy trące trzecie ciało o małym współczynnikiem tarcia pomiędzy swoimi warstwami, jakimi są na przykład warstwy smarowe.

TRIBOLOGIA DLA SPORTU

Dla rozwiązania niektórych problemów związanych z tarciem w sporcie, np. podczas ślizgania się na sankach, łyżwach, wykorzystali tribolodzy zjawisko wydzielania się ciepła. Zjawisko to znane jest od prawników i wiemy, że pierwsi ludzie rozniecali ogniska trąc o siebie dwa drewniane elementy.

Podobnie jak w technice, w sporcie są przypadki, kiedy chcemy, aby współczynnik tarcia był bardzo mały, np. pomiędzy płozami sanek, łyżew itp. Tym problemem zajął się między innymi F. Fleischer z Magdeburga [L. 2]. Dzięki wynikom badań tribologów sportowcy z NRD w zimowych sportach na Olimpiadach osiągnęli wysokie wyniki w zawodach.

Jeżeli przyjmiemy, że na współczynnik tarcia, czyli na opory, będzie wpływać wartość naprężeń stycznych zgodnie z wzorem (3), to byłoby dobrze, gdyby pod łyżwą lub pod płozą sanek stopił się lód, dzięki wydzielonemu ciepłu od tarcia, gdyż wtedy σ_t będzie bardzo małe.



Rys. 2. Współczynniki przenikania ciepła przez różne materiały bx1000 [L. 2]

Fig. 2. Heat transfer coefficients for different materials bx1000 [L. 2]

Na stopień wzajemnego oddziaływania cieplnego pomiędzy płozami i lodem można wpływać poprzez dobór odpowiednich parametrów cieplnych materiałów płóz. Na **Rys. 2** zestawiono wybrane materiały w zależności od wartości przenikania ciepła „b”. Dla wymienionych stali liczba ta waha się w zależności od składu chemicznego w granicach: od 7 000 [$W \cdot s^{1/2}/K \cdot m^2$] dla stali wysokostopowych, np. austenitycznych, do 14000 dla stali niskostopowych. W stalach stopowych tytanowych istnieje możliwość obniżenia „b” nawet do wartości: 3 500 [$W \cdot s^{1/2}/K \cdot m^2$], która jest zbliżona do wartości „b” lodu; dla której podaje się 2 050 [$W \cdot s^{1/2}/K \cdot m^2$].

Jak wykazały obserwacje, dotyczy to szczególnie płóz sań wyścigowych ze względu na ich dużą masę (max ciężar dwójek 390 kg i czwórek 630 kg), co powoduje wzrost deformacji lodu oraz jego kruszenie w strefie przypowierzchniowej, a w efekcie duże straty na tarcie. Przy niskich temperaturach otoczenia płozy wykonane z materiałów o niskim „b” zachowują się korzystnie w czasie jazdy, ponieważ współczynnik tarcia jest o wiele mniejszy niż dla materiałów o wysokim „b”. Materiały o wysokim współczynniku przewodzenia ciepła cechują się niskim współczynnikiem tarcia tylko podczas poślizgu w temperaturach niewiele niższych od temperatury topnienia lodu.

TRIBOLOGIA DLA KOLEJNICTWA

W ostatnich latach koleje rozwijają coraz większe prędkości, co można stwierdzić, analizując dane w **Tabeli 1**. To wymaga nie tylko dokładnego ustawienia

szyn, ze względu na anizotropię tarcia pomiędzy kołami a szynami, ale też odpowiednich materiałów na szyny i koła.

Tabela 1. Rozwijane prędkości lokomotyw w latach [L. 5]

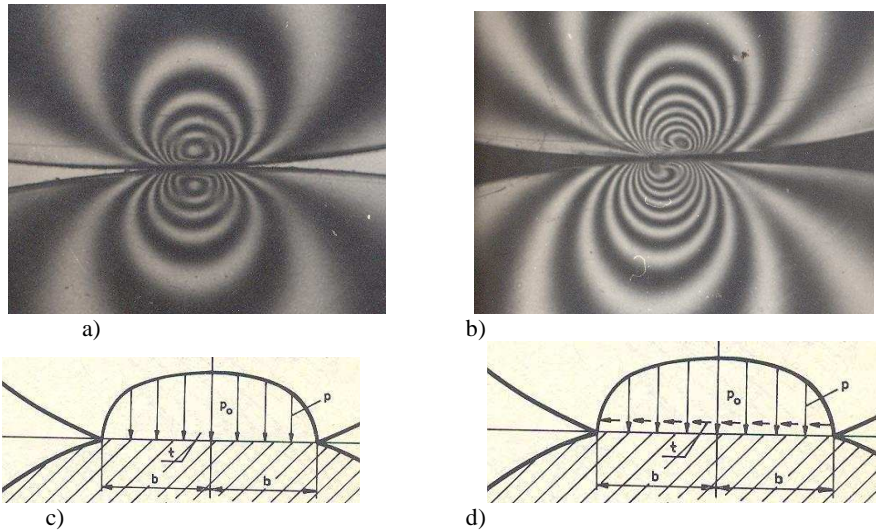
Table 1. Maximum locomotive speeds achieved in the years [L. 5]

Rok	Prędkość	substancja energetyczna	Kraj i typ lokomotywy
1804	8 km/h	para wodna	Wielka Brytania (WB) Lok. Richarda Trevithicka
1830	48 km/h	para wodna	WB Rakieta Stephensona
1850	125 km/h	para wodna	WB
1903	203 km/h	elektryczna	Niemcy Lok. Siemens Halsie
1931	230 km/h	benzyna	Niemcy Lok. Schienenzeppelin
1953	239 km/h	elektryczna	Francja Lok. sześciosiowa
1955	331 km/h	elektryczna	Francja dwie lok. 6 i 4-osiowa
1981	380 km/h	elektryczna	Francja- TGVPS
1988	406 km/h	elektryczna	Niemcy- Interc-experimental
2007	575 km/h	elektryczna	Francja – TVGV150

Jak wiemy z pracy [L. 4], stan naprężeń w obszarze styku koła i szyny jest zależny od obciążenia i w przypadku tylko obciążenia normalnego izochromy przedstawiające jego stan zaprezentowano na **Rys. 3a** i **3c**, a przy obciążeniu normalnym i stycznym wynikającym z sił szczytności na **Rys. 3b** i **3d**.

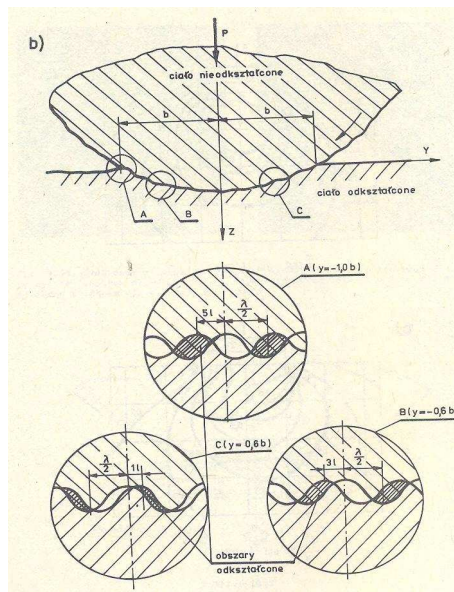
Równocześnie z powstaniem naprężeń w styku koła z szyną występują mikropoślizgi, które są wynikiem odkształceń elementów dociskanych do siebie. Dla zrozumienia tych odkształceń przyjęto odpowiednią obrazową chropowatość koła i szyny (**Rys. 4**) i pokazano, jak w przypadku, obciążenia normalnego i stycznego powstałego przy toczeniu ze szczytnością koła do szyny, czyli w warunkach ciągnięcia warstwa przypowierzchniowa przemieszcza się w trzech miejscach. Z obrazowego przemieszczenia widać, że w styku w wyniku odkształcenia wzajemne przemieszczenie elementów względem siebie jest największe w punkcie styku oznaczonym „A”.

Dowodem na przemieszczenie się warstw przypowierzchniowych w czasie toczenia elementów walcowych po sobie z poślizgiem jest obraz struktury warstwy wierzchniej rolki wykonanej na tribotesterze rolka-rolka z dociskiem i małym poślizgiem (aparatus typu Amslera). Na fotografii (**Rys. 5**) pokazano przemieszczenia warstwy powierzchniowej zachodzącej w rolce ze stali węglowej i różnych poślizgach [L. 10]. Oprócz tego w warstwach wierzchnich powstają pęknięcia zmęczeniowe powodujące wykruszanie zmęczeniowe zwane „pittingiem” (**Rys. 6**).



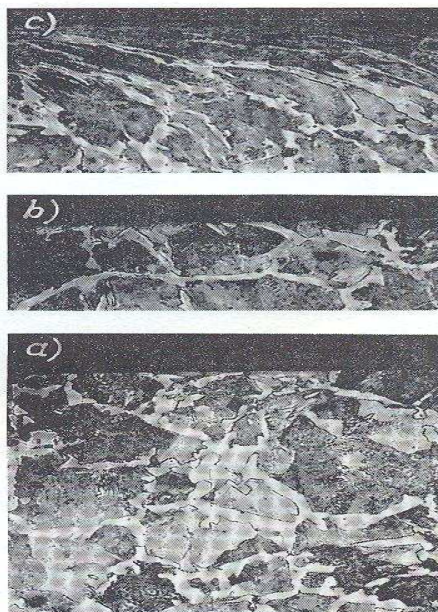
Rys. 3. Przebieg izochrom; a) w styku walca z półprzestrzenią przy obciążeniu jak na Rys. 3c, b) przy obciążeniu normalnym i stycznym, jak na Rys. 3d

Fig. 3. Isochromatic lines: a) in contact with cylinder and half-space under load as in Fig. 3c, b) under the normal and tangential load as in Fig. 3d

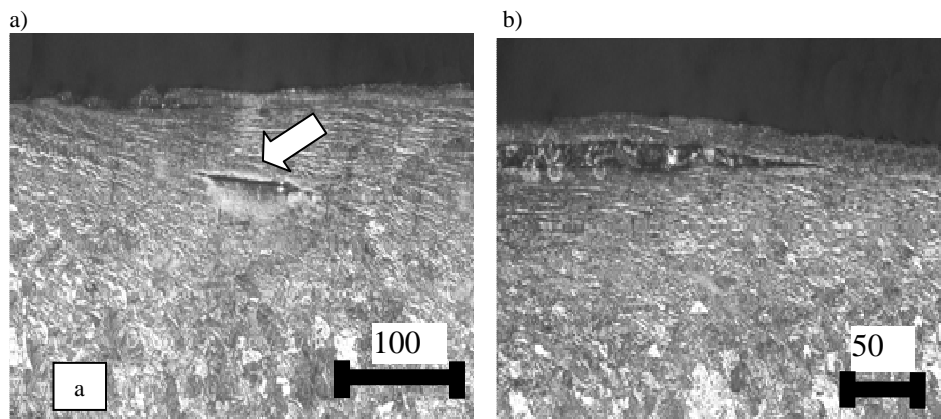


Rys. 4. Modelowane mikroprzemieszczenia w styku walca z półpłaszczyzną

Fig. 4. Modeling of a micro-displacement in the cylinder and half-plane contact



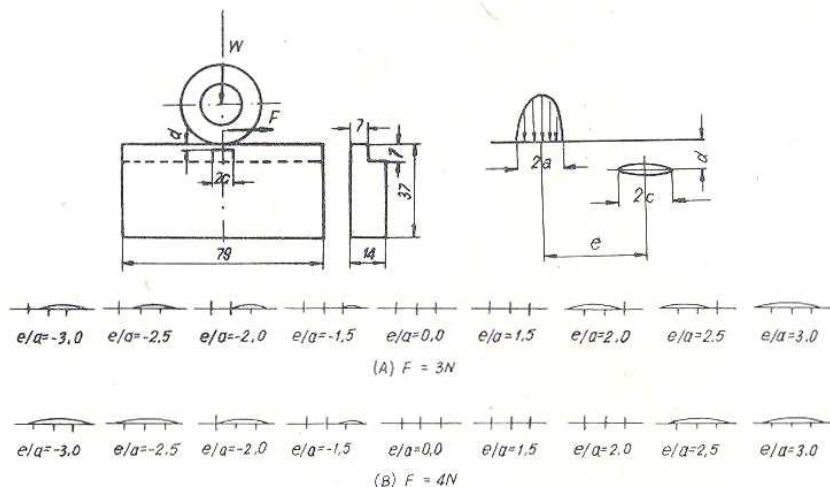
Rys. 5 Odształcenia warstw przypowierzchniowych: a) poślizg 0,0; b) 0,2; c) 0,5%
 Fig. 5. Deformation of subsurface layers for slip: a) 0.0; b) 0.2; c) 0.5%



Rys. 6. Powstałe pęknięcia (powiększenie w mikrometrach) pod powierzchnią styku w materiale szyny wynikające z odkształceń i zmęczenia materiału otrzymane po badaniach na aparacie Amslera [L. 3, 4]

Fig. 6. The cracks (magnification in micrometers), under the contact surface in the rail material resulting from deformation and fatigue of the material after tests made in the Amsler testing rig [L. 3, 4]

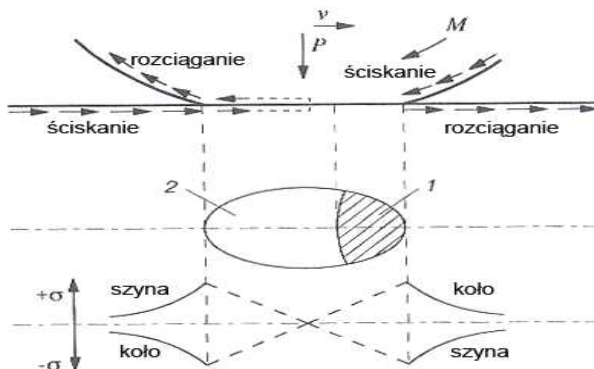
Interesujące jest to, że takie podpowierzchniowe pęknięcia w warstwie wierzchniej szyny, jak przedstawiono na **Rys. 6a i b**, w trakcie przetaczania koła zmienia swój kształt, jak pokazano na **Rys. 7** po badaniach w laboratorium japońskim, co doprowadza do pittingu [L. 7]. Z rysunku wynika, że powstałe pęknięcie w szynie w trakcie przetaczania koła rozszerza się, a potem zamyka w zależności od położenia względem osi toczącego się koła i wartości obciążenia koła.



Rys. 7. Modelowe zachowanie się pęknięcia podpowierzchniowego w szynie przy przetaczaniu po niej koła [L. 7]

Fig. 7. The model behavior of a subsurface crack in the rail during rolling of the wheel [L. 7]

A zatem oprócz przedstawionych odkształceń opisanych powyżej (**Rys. 4, 5 i 6**) w czasie toczenia koła po szynie zachodzi ścisnienie i rozciąganie warstw wierzchnich tak w szynie, jak i w kole, jak to przedstawiono na **Rys. 8**.



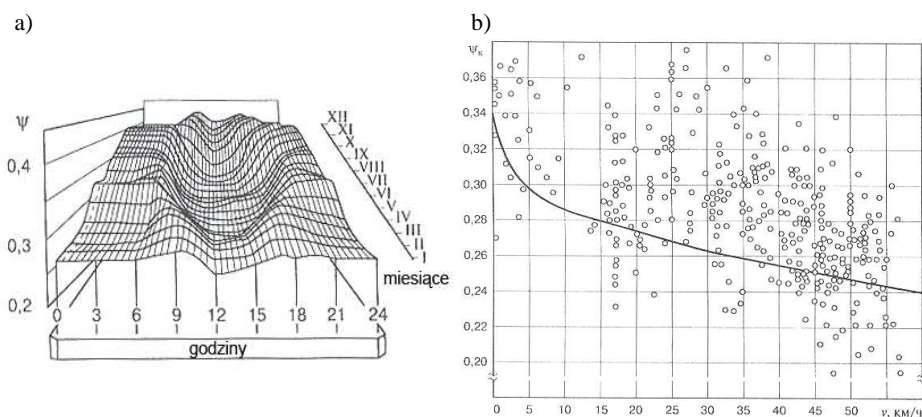
Rys. 8. Odkształcenia warstw wierzchnich przed toczącym się kołem i za nim [L. 9]

Fig. 8. Deformation of surface layers in the front and behind the rolling wheel [L. 9]

Musimy zdawać sobie też sprawę z tego, że ustawienie koła do szyny nie jest często w warunkach rzeczywistych w osi szyny i dlatego mamy ruch anizotropowy powodujący powstanie sił poosiowych i poślizgów, które powodują zużycie ściernie współpracujących elementów. Proces anizotropii tarcia tocznego opisany został w pracach [L. 11]. Istotnym dla tarcia anizotropowego przy tarcu tocznym jest to, że jak wynika ze wzorów siła poosiowa maleje z prędkością toczenia. Innymi słowy im większa prędkość jazdy pociągu V , tym mniejsza się siła poosiowa, a z tym maleje zużycie szyny i koła, co wykazać można wzorem (4):

$$T_z = f(\mu_z, V_z/V) \quad (4)$$

gdzie: T_z – siła poosiowa, μ_z – współczynnik tarcia na kierunku poosiowym, V_z – prędkość na kierunku poosiowym, V – prędkość toczenia koła.



Rys. 9. Wartości współczynnika ψ : a) w różnych porach roku i dnia, b) dla różnych prędkości jazdy elektrycznych pociągów na godzinę [L. 9]

Fig. 9. The values of ψ coefficient: a) at different seasons of a year and a day, b) for different velocities of electric locomotives [L. 9]

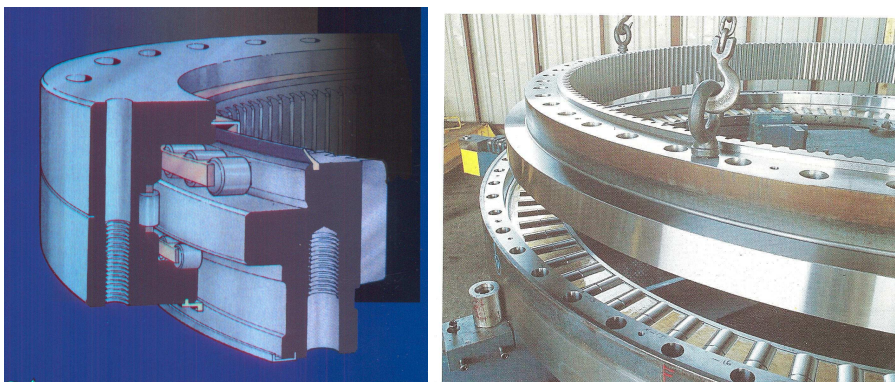
Jak wiemy z praktyki, w czasie eksploatacji pojazdów szynowych istotnym problemem jest sprzężenie (szczepność) kół lokomotywy z szynami. W badaniach przedstawionych w pracy [L. 12] próbowano ustalić, jakie warunki wpływają na współczynnik sprzężenia (szczepności). Okazało się, że w zależności od zawilgocenia szyny i innych warunków autorom pracy [L. 12] nie udało się otrzymać w czasie eksperymentu tych wartości, jakie podawane są w literaturze. Interesujące też są informacje osób pracujących na „kolejowych górkach rozrządu” (górkach rozprowadzania wagonów), że w czasie bardzo niskich temperatur w zimie wyhamowania wagonów płozami nie były racjonalne i często następowały wykojenia wagonów.

W Instytucie Kolejnictwa w Rosji [L. 9] wykonano badania, które pozwoliły określić współczynniki szepności ψ dla kolei w różnych porach dnia, jak też w różnych miesiącach roku. Na **Rys. 9a** przedstawiono wykresy zmiany wartości ψ dla pór dnia i roku, a na **Rys. 9b** podano, według różnych autorów, jak zmieniał się ten współczynnik w zależności od prędkości jazdy elektrowozu [L. 9].

Okazuje się, że najmniejsze wartości współczynnika sprzężenia były w południe, kiedy (należy sądzić) temperatury szyny były najwyższe w ciągu doby. Natomiast z **Rys. 9b** wynika, że w czasie pomiarów uzyskiwano bardzo duże rozrzuty wyników wartości ψ .

TRIBOLOGIA DLA NOWYCH ROZWIĄZAŃ ŁOŻYSK TOCZNYCH

Problemy tarcia tocznego występują też w łożyskach tocznych. W konstrukcjach np. maszyn ziemnych i dźwigach stosuje się łożyska wieńcowe wielkogabarytowe o średnicach nawet powyżej 10 m **Rys. 10**.

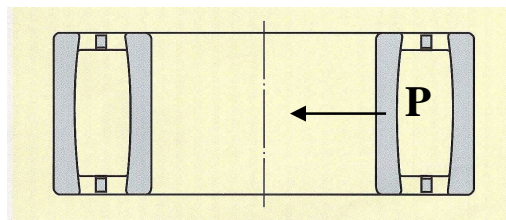


Rys. 10. Fotografie wycinków łożysk wieńcowych wielkogabarytowych [L. 6]

Fig. 10. Photographs of sections of large-size slewing rings [L. 6]

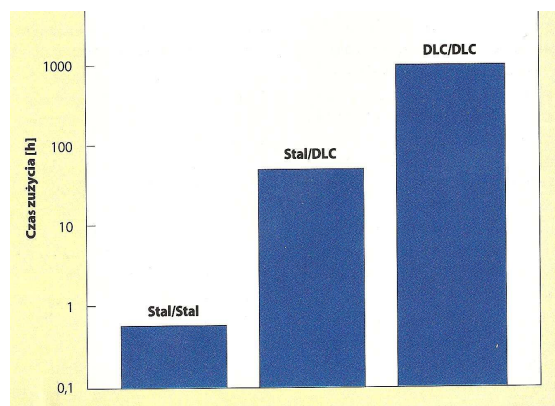
Na **Rys. 11** przedstawiono konstrukcję łożyska nowego typu CARB firmy SKF. Jest to łożysko, które z powodzeniem może zastąpić łożysko rolkowe-walcowe, w tych miejscach, gdzie możemy się spodziewać ugięcia czopa lub wału. Łożysko to może przenosić duże obciążenia i zastąpić także łożyska igiełkowe.

Dla zwiększenia trwałości łożysk tocznych dla niektórych specjalnych maszyn powierzchnie bieżni pokrywa się nanodiamentami z wtrąceniami kryształów grafitu [L. 6]. Na **Rys. 12** podano czas do zużycia tych łożysk w zależności od pokrycia. Warstwę diamentową z grafitem oznaczono DLC.



Rys. 11. Rysunek Łożyska CARB-SKF [L. 8, 6]

Fig. 11. Figure of CARB-SKF bearings [L. 8, 6]

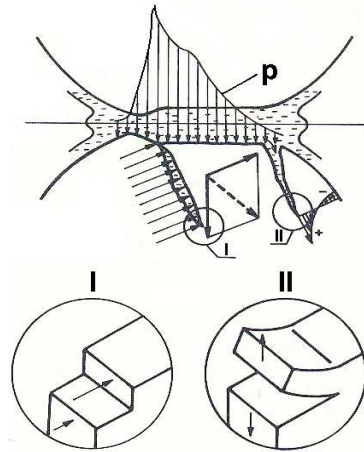


Rys. 12. Czas zużycia elementów ze stali lub stali pokrytej powłoką DLC [L. 6]

Fig. 12. The durability of elements made of steel or DLC coated steel [L. 6]

Jak wynika z **Rys. 12**, jeżeli stal elementu tocznego i bieżni jest pokryta powłoką z DLC, wówczas czas do zużycia zwiększa się wielokrotnie w stosunku do współpracy elementów z tej stali.

Właściwe dobranie łożyska tocznego do danego węzła w maszynie jest bardzo ważne i decyduje o trwałości łożyska w eksploatacji. W praktyce inżynierskiej spotkaliśmy się z przypadkami, kiedy niewłaściwe dobranie typu łożyska było przyczyną wielu poważnych awarii, z czego nie zdawali sobie sprawy pracownicy obsługi maszyny oraz personel inżynierijno-techniczny. Ważną sprawą trwałości łożysk tocznych jest zabezpieczenie łożyska, aby nie wystąpiło zużycie typu pitting, którego mechanizm powstawania przedstawiono na **Rys. 13**.

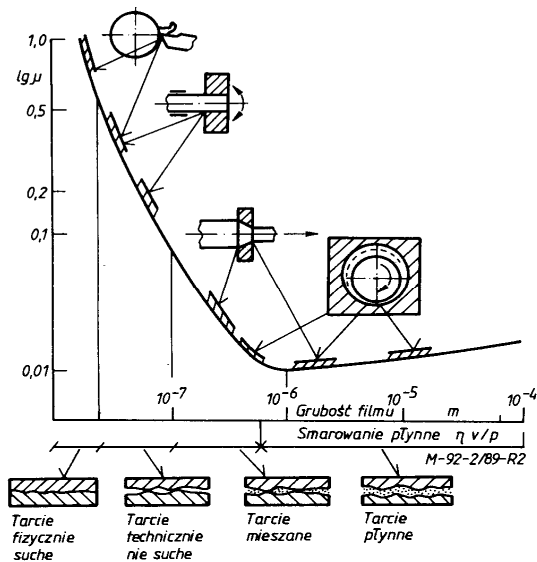


Rys. 13. Mechanizm powstawiania pittingu na elementach toczych [L. 1]

Fig. 13. The mechanism of pitting creation on the rolling elements [L. 1]

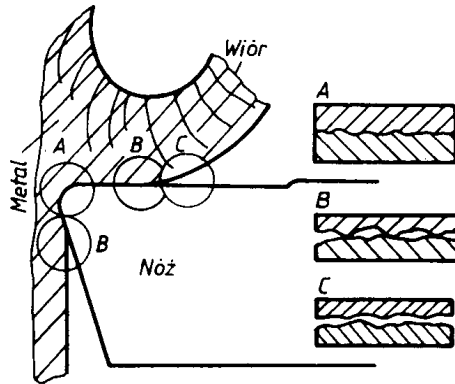
TRIBOLOGIA DLA TECHNOLOGII

Rozpatrując systemy tribologiczne, jak na **Rys. 14**, proces skrawania metali znajduje się w obszarze, w którym występuje największy współczynnik tarcia.



Rys. 14. Systemy tribologiczne [L. 14]

Fig. 14. Tribological systems [L. 14]



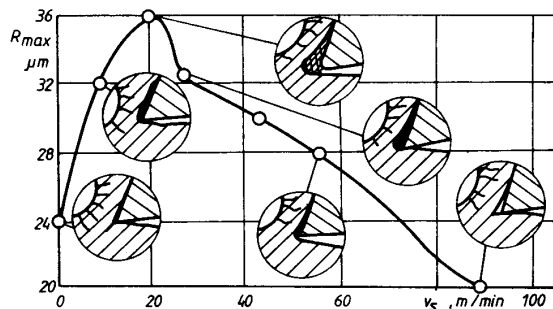
Rys. 15. Strefy tarcia na powierzchni noża

Fig. 15. Friction zones on cutting tool surface

Natomiast, jak przedstawiono na **Rys. 15**, najtrudniejsze warunki tribologiczne są w miejscach w strefie A. Powstaje zatem pytanie, co należy zrobić, aby te warunki poprawić? Można je zmieniać, zwiększając np. prędkość skrawania, która przy skrawaniu niektórych metali może powodować wcześniejsze pęknięcie materiału przed nadejściem ostrza noża tokarskiego, a wtedy do powstałej szczeliny (próżni) może łatwo dostawać się ciecz chłodząco-smarująca podawana z zewnątrz.

Na **Rys. 16** przedstawiono zależność wysokości R_{max} nierówności powierzchni obrabianej stali 45 od prędkości skrawania v_s oraz prędkości skrawania, przy których powstają narosty na ostrzu lub wcześniejsze pęknięcia przed ostrzem [L. 13].

Innym ważnym procesem wpływającym na powstawanie powłok z metali znajdujących się w cieczach chłodząco-smarujących jest gradient temperatury wióra i metalu skrawanego stykających się bezpośrednio z powierzchniami noża. Z dotychczasowych badań wynika, że w obszarze skrawania gradient



Rys. 16. Wysokości nierówności zależne od v_s przy skrawaniu stali 45 [L. 13]

Fig. 16. Roughness depend on v_s during cutting of 45 steel [L. 13]

temperatury w okolicy ostrza noża skrawającego może mieć wartość przy skrawaniu stali od 500 do 1100 K, a często i większą [L. 14].

W celu zmniejszenia zużycia narzędzi skrawających, oprócz dobierania parametrów skrawania, należy zmniejszać współczynnik tarcia na powierzchni styku narzędzia i wióra oraz narzędzia i materiału skrawającego. Można to zrobić różnymi metodami, między innymi przez nakładanie powłok specjalnych metodą PCV, np. z Tin, lub stosować odpowiednie ciecze chłodzące, chłodząco-smarujące lub smarujące oparte na kompleksach metali zastosowane przy toczeniu stali dla tworzenia powłok [L. 14].

Większość metali, a szczególnie takie jak Cu, Zn, Cr wykazują zdolność do tworzenia kompleksów z wieloma substancjami organicznymi i nieorganicznymi. Jako substancje kompleksotwórcze mogą być:

- 1) sól dwusodowa kwasu etylenodiaminotetraoctowego zwanego kwasem wersenowym – EDTA,
- 2) sól Seignetta, czyli winian sodowo-potasowy.

Dotychczasowe badania i uzyskiwane wyniki [L. 14] w zakresie tworzenia powłok z roztworów soli prostych, np. CuSO_4 i innych, wykazują, że powłoki te są mało trwałe, słabo przylegają do podłoża a roztwory, z których się je wytwarza, są mało stabilne. Stabilność tych roztworów np. jonów miedzi (II) można zwiększyć przez wytwarzanie kompleksów metali z ogólnie znanymi substancjami kompleksotwórczymi. Kompleksy powinny charakteryzować się taką trwałością, która zabezpiecza przed samorzutnym konstytuowaniem powłoki metalu z kompleksu np. miedzi (II), a jednocześnie ułatwia konstytuowanie drobnokrystalicznych powłok w trakcie obróbki skrawaniem.

Wersenianowe kompleksy oparte na różnych solach miedzi bez modyfikatorów charakteryzują się zmiennymi wartościami obciążenia zatarcia na aparacie czterokulowym, co podano w **Tabeli 2**. Siłę zgrzewania badano dla różnych wartości procentowych wersanianowych kompleksów miedzi, to jest 1, 2 i 3%.

Modyfikacja roztworów etylenodiaminą w ilości dającej wartość pH około 9,0 nie powoduje zmiany wartości siły zgrzewania. Wyniki są takie same, jak dla czystych kompleksów. Szkło wodne oprócz poprawy wartości pH zmienia siłę zgrzewania. Dodatek do 1-procentowych roztworów miedzi szkła wodnego w ilości 2,5% objętościowych podnosi wartość siły zespawania dla kompleksów opartych na:

- CuSO_4 – z 200 do 250 [dN], natomiast CuCl_2 – z 400 do 500 [dN]. Wartość siły na tym poziomie utrzymuje się do zawartości 3% szkła. Po przekroczeniu 3% szkła spada siła zespawania do 315 [dN] oraz następuje galarecenie roztworu. Mechanizm konstytuowania powłok z Cu w trakcie toczenia stali metodą bezprądowego metalizowania stanowi często jedyny sposób naniesienia warstwy metalu na podłoże. W bezprądowej, chemicznej metodzie metalizowania można wyróżnić trzy, zupełnie odmienne, sposoby osadzania warstw metalowych:

- 1) osadzanie powłoki przez redukcję,
- 2) osadzanie powłoki przez wymianę jonową,
- 3) osadzanie powłoki metodą kontaktową.

Tabela 2. Siła zgrzewania [Pz] dla cieczy chłodząco-smarujących opartych na kompleksach miedzi bez modyfikatorów i z modyfikatorami. Wartości otrzymane w czasie testu na aparacie 4-kulowym

Table 2. Weld point [Pz] for cooling lubricant fluid based on copper complexes without modifiers and with modifiers. The values are obtained during the test on four-ball apparatus

Siła zgrzewania	Kompleks wersenianowy miedzi (II) oparty na:			
	Cu(CH ₃ COO) ₂	CuSO ₄	Cu(NO ₃) ₂	CuCl ₂
P _Z [dN] dla cieczy bez modyfikacji	200	200	250	400
P _Z [dN] z modyfikatorem Na ₂ HPO ₄	315	315	315	620

Osadzanie metodą redukcji pozwala również uzyskiwać warstwę bimetaliczną, np. z roztworów kompleksów miedzi i cynku można uzyskać warstwę mosiądzu. Metoda redukcji znalazła najszersze zastosowanie wśród bezprądowych metod osadzania warstwy wierzchniej.

Osadzanie warstwy wierzchniej metodą wymiany jonowej polega na reakcji redukcji jonów metalu o wyższym normalnym potencjale przez atomy metalu o niższym normalnym potencjale, np.: $\text{Fe}^0 + \text{Cu}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + \text{Cu}^0$.

Konstituowane warstwy powinny być zwarte, gładkie i drobnokrystaliczne, gdyż tylko takie warstwy spełniają stawiane cele. W procesie tworzenia warstw należy rozróżnić dwa przebiegające równoległe zjawiska: powstawanie zarodków, a następnie wzrost kryształów [L. 14].

Na strukturę warstwy wierzchniej wpływ mają następujące czynniki:

- 1) temperatura (wzrost temperatury sprzyja tworzeniu warstw grubokrystalicznych);
- 2) stężenie kationu osadzanego metalu (zmniejszenie stężenia roztworu sprzyja tworzeniu się drobnokrystalicznych warstw);
- 3) pH roztworu (przy niskich wartościach pH może nastąpić wydzielanie się wodoru cząsteczkowego, który częściowo ulatnia się do atmosfery, a częściowo dyfunduje do metalu podłoża lub w postaci pęcherzyków osadza się na powierzchni podłoża).

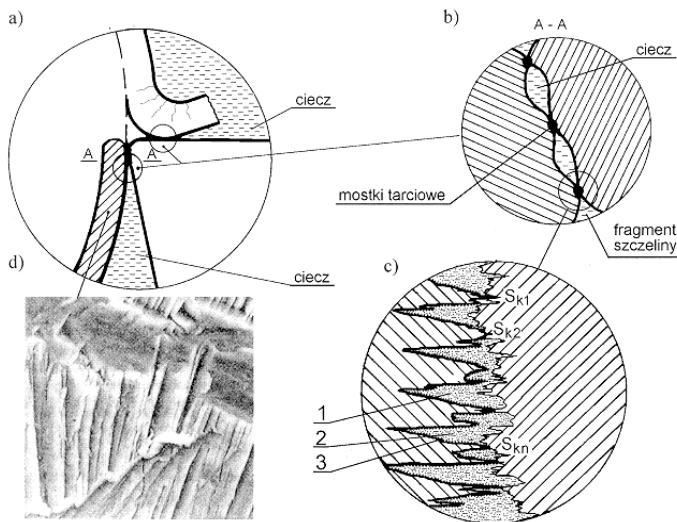
Skuteczność działania cieczy opartych na wersenianowych i winianowych kompleksach miedzi sprawdzono podczas toczenia stali węglowych, tj. stali 04J, 10 i 55 na tokarce typu TUG-40 z zastosowaniem noża tokarskiego oprawkowego z płytą z węglików spiekanych grupy S10S. Wstępne badania prowa-

dzono również podczas toczenia z jednoczesnym nagniataniem, uzyskując pozytywne wyniki.

Stale te toczono przy następujących parametrach skrawania:

- prędkość skrawania $v_s = 90 - 120$ [m/min];
- posuw $p = 0,05$ [mm/obr.],
- głębokość skrawania $g = 0,5$ [mm].

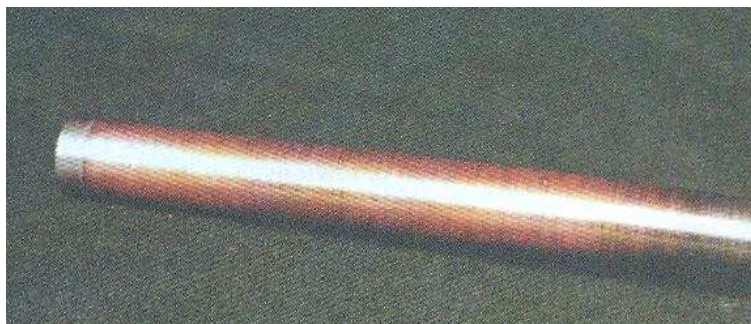
Wybór tych parametrów podyktowany został warunkami procesu technologicznego, tj. obróbką wykańczającą stosowaną w praktyce i wybranymi warunkami, aby wcześniejsze pęknięcie materiału było przed ostrzem. Konieczne jest wcześniejsze dobranie prędkości skrawania dla danego materiału. W odpowiednich zatem warunkach, powstałymi kapilarami dzięki chropowatości materiału w miejsce powstałej próżni do wierzchołka noża dostaje się ciecz z metalami i osadza się bardzo szybko na super czystej powierzchni, czemu sprzyja też temperatura (**Rys. 17**).



Rys. 17. Charakterystyczny styk ostrza noża z materiałem skrawanym: a) styk ostrza z wiórem i metalem, b) miejsca z cieczą w styku ostrza z wiórem i metalem, c) stan w powiększeniu, d) fotografia metalu obrabianego $\times 5000$

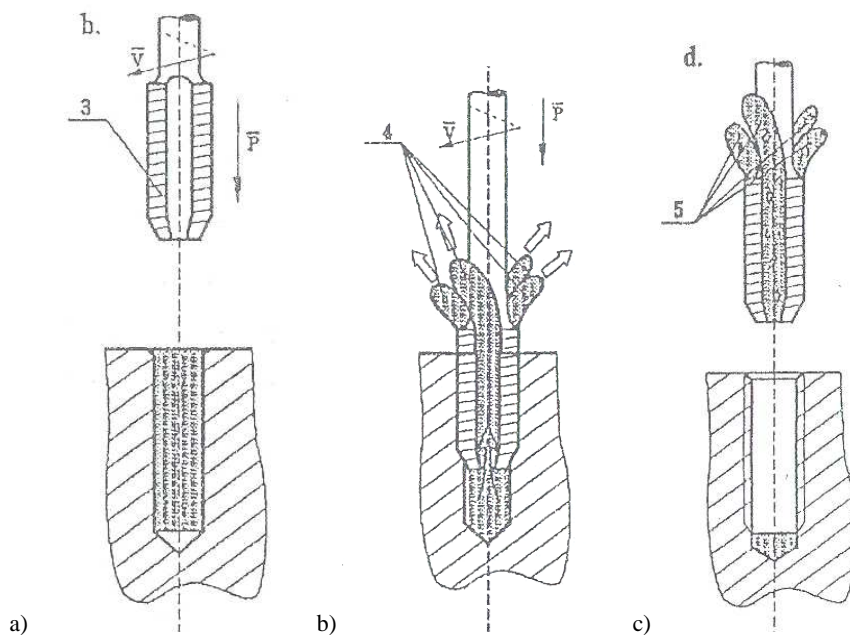
Fig. 17. The typical contact of cutting tool blade with the cutting material: a) the blade contact with chip and the metal, b) zones of the liquid in contact with the blade and the metal chip, c) enlarged view, d) photograph of the cut metal $\times 5000$

Na **Rys. 18** przedstawiono fot. pręta toczzonego cieczą chłodząco-smarującą z kompozytami miedzi, o których mowa powyżej.



Rys. 18. Fotografia pręta po obróbce z udziałem cieczy chłodząco-smarującej z kompleksami Cu

Fig. 18. The photo of the bar after cutting with cooling lubricant fluid containing the complexes of Cu



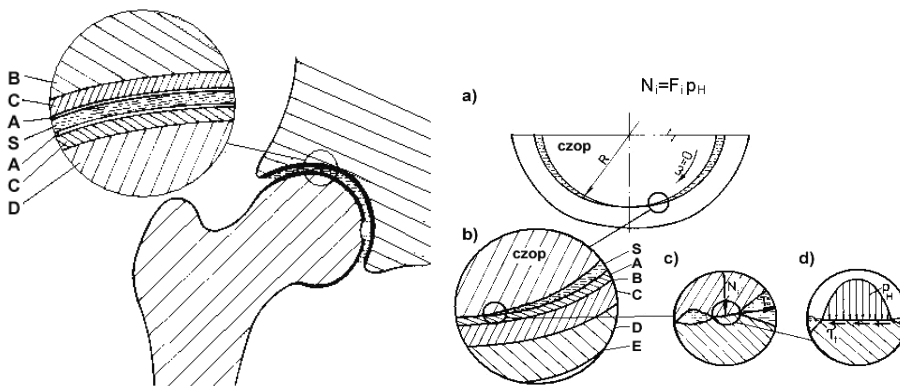
Rys. 19. Fazy wykonania gwintowanego otworu ślepego. Gwintownik 3 i otwór wypełniony stearyną z grafitem (lub MoS_2) a), wypychane wióra z otworu gwintowanego z wypełniaczem 4 b), gwintownik wykręcony razem z wypełniaczem 5 c)

Fig. 19. Phases of the manufacturing of the threaded blind hole. Tap 3 and the hole filled with stearin and graphite (or MoS_2) a), chips pushed from the threaded hole using filler 4 b), tap twisted together with a filler 5 c)

Drugi przykład tribologii dla technologii. Przedstawiony będzie też przykład smarowania z równoczesnym transportem wiórów przy gwintowaniu otworów ślepych w materiałach trudnoobrabialnych. Aby zabezpieczyć się przed ukreśnieniem gwintownika i trudnym lub niemożliwym jego usunięciem pracownicy naukowcy z Akademii Górniczo-Hutniczej opracowali specjalny sposób tego gwintowania, którego zasadę wyjaśnia **Rys. 19** [L. 15].

TRIBOLOGIA DLA CZŁOWIEKA

Człowiek jest tak zbudowany, że nie ma w technice lepiej rozwiązanych elementów, jak w budowie człowieka. W technice podpatrzono niektóre rozwiązania w budowie człowieka i wykorzystano je np. w budowie panewek samochodowych, co przedstawiono między innymi na **Rys. 20**.

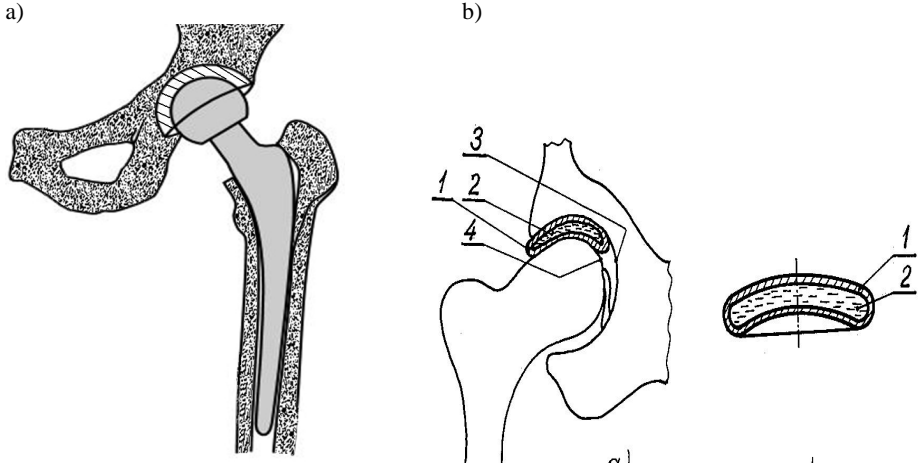


Rys. 20. Rysunek stawu biodrowego człowieka z zaznaczeniem warstw w stawie; B, D, kości, S – ciecz synowialna, C – chrząstki, A – ochrzęstna, (a–d) rozwiązanie panewki wału samochodowego wzorowane na budowie stawu człowieka, S – olej, A – cienka powłoka, C – materiał panewki, D – metalowa obejma panewki

Fig. 20. Figure of human hip joint with an indication of the layers in the joint; B, D, bone, S – synovial fluid, C – cartilage, A – perichondrium, (a–d) motor car shaft bushings solution modeled on the structure of human joint, S – oil, A – thin coating, C – cup material, D – metal cup clamp

Pomimo że każdego roku na świecie wszczepia się ponad milion protez stawu biodrowego człowieka, to dalej trwają prace badawcze tribologów nad dobraniem materiałów na czopy, panewki, jak też inne rozwiązania konstrukcji. Na **Rys. 21a** przedstawiono rozwiązania handlowe endoprotezy stawu biodrowego. Ostatnio trwają badania zastąpienia metalowej główki sztucznym

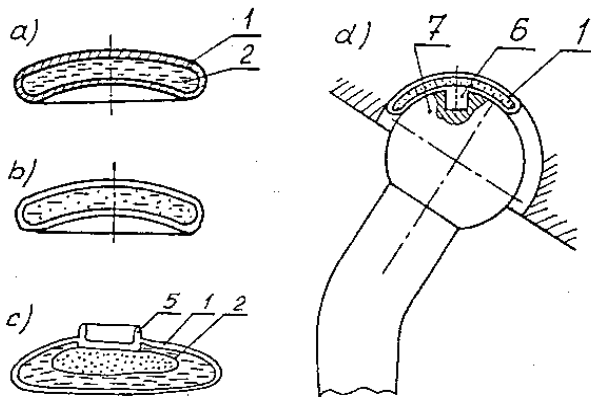
szafirem, zaś zamiast ucinania głowy kości proponuje się wprowadzanie specjalnej wkładki z ciecżą lub żelem, jak to przedstawiono na **Rys. 21b** [L. 16].



Rys. 21. Typowe rozwiązanie endoprotezy stawu biodrowego człowieka: a) rozwiązanie uszkodzonego stawu z wkładką 1 (ciecz lub żel (2) w osłonie z tworzywa, 3 i 4 kość pokryta chrząstką (b)

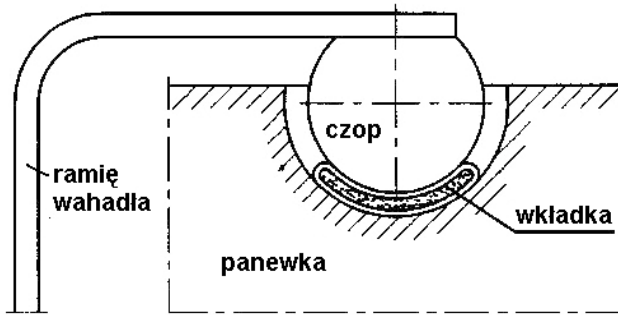
Fig. 21. A typical solution of human hip joint replacement (a), the solution of the damaged joint with insert 1 (liquid or gel 2) in the plastic cover, 3 and 4 bone covered with cartilage (b)

Rozwiązania wstawki mogą być różne, jak to przedstawiono na **Rys. 22** [L. 16], a wyniki badań wykonane i opisane w pracy [L. 17] dają bardzo dobre rezultaty. Badania wykonano na stanowisku schematycznie przedstawionym na **Rys. 23**.



Rys. 22. Różne rozwiązania wkładki stawowej 1 a, b, c, d [L. 16]

Fig. 22. Different solutions joint insert 1 a, b, c, d [L. 16]

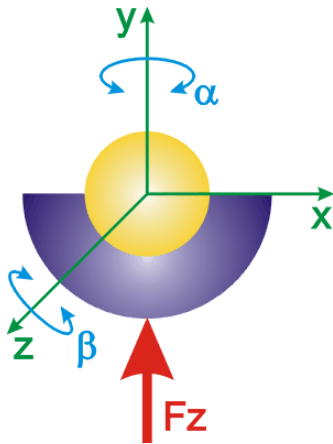


Rys. 23. Stanowisko dla wyznaczenia wkładek stawowych [L. 17]

Fig. 23. The station for determination of joint inserts [L. 17]

Obecnie w Instytucie Technologii Eksploatacji – Państwowym Instytucie Badawczym wykonano specjalne stanowisko badawcze dla przegubów i endoprotez stawów biodrowych człowieka (**Rys. 24**).

a)



b)



Rys. 24. Układ sił i kierunki obrotów w symulatorze do badania materiałów na endoprotezy (a), tribotester produkcji Instytutu Technologii Eksploatacji – PIB T-24 (b)

Fig. 24. The forces and direction of rotation in the simulator for testing of the materials used in the hip joint prosthesis, a) T-24 tribotester developed by Institute for Sustainable technologies – National Research Institute

LITERATURA

1. Pytko S.: Podstawy tribologii i techniki smarowania. Wyd. AGH, Kraków 1989.
2. Rebsch H., Jost M., Debus K., Bosse H., Fleischer G.: Optimierung des Gleitverhaltens zwischen metallischen Kufenwerkstoffen und Eis. Tribologie + Schmierungstechnik No. 38-6/1991.
3. Bąkowski H.: Ocena właściwości tribologicznych skojarzenia koło–szyna w określonych warunkach eksploatacyjnych. Praca Doktorska. Pol. Śląska 2006.
4. Pytko S.: Wpływ sił stycznych na zmęczeniowe wykruszenie (pitting) walcowych powierzchni elementów tocznych. Maszynopis. Biblioteka AGH 1964.
5. Pytko S., Pytko P.: Analiza zjawisk związana ze sprzężeniem kół lokomotyw z szynami oraz łożyskowaniem osi wagonów w aspekcie zwiększenia ich trwałości. Wyd. Pol. Krakowskiej. Mat. Konferencji QSEV 2009.
6. Artykuły, Czasopismo „Evolution”. Wyd. polskie SKF. Duże prędkości na kolejach 3/2008 r. Smarowanie łożysk w niskich temperaturach 4/200 r. Nowa koncepcja łożyskowania zestawu kołowego, 1/2002.
7. Artykuł Keneta M., Murakami Y., Okazaki T.: Proc. of the Leeds-Lyon Symposium 1985.
8. Testy łożyska metodą dyfrakcji promieniowania Rentgenowskiego. Evolution Wyd. SKF 4/1997.
9. Łuźhnov Yu.M.: Scepleniye Koles s Relsami. Moskwa 2003.
10. Krause H., Pytko S.: Mechanizm odkształcenia warstw wierzchnich rolek toczących się po sobie z poślizgiem. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn Z. 1/1975.
11. Pytko S., Furmanik K.: Vaprosy anizotropii trenija pri vzaimodeistvii koleśa z relsom. Trenije i Smaska Wyd. Akademii Nauk, Moskwa 1985.
12. Furmanik K.: Praca doktorska. Manuskrypt. Biblioteka AGH, Kraków 1998.
13. Pytko S.: Problemy smarowania w procesach obróbki skrawaniem. Mechanik nr 9/ 1989.
14. Marzec S., Pytko S.: Tribologia procesów skrawania metali. Wyd. ITeE, 1999.
15. Pytko S., Krawczyk S.: A New metod of lubrication in blind holes threading in hardly machinable materials. Proc. of the 7 Intern. DAAAM Symposium. Austria, October 1996.
16. Kowal A., Dembska-Chwaja A., Gierzyńska-Dolna M., Pytko S.: Wkładka do stawu biodrowego. Mat. I Symp. „Inżynieria Ortopedyczna i Protetyczna – IOP 97. Białystok.
17. Kowal A.: Opory w ruchu oscylacyjnym mechanizmów maszyn górniczych. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej 2005.

Summary

This paper describes what determines the coefficient of friction in the general case before scuffing of machine components. The authors discussed a method for the improvement friction parameters of sports equipment, for example, friction between sleds runners and ice. It also presents a discussion on the cooperation between locomotive wheels and

rails for increase adhesive forces. The article also presents information on a new cooling lubricant fluids used in metal cutting, during which a coating is produced on the surface of the turned element. Finally, the paper discusses new projects and a research test rig for the study of human joints.