

PRZYDATNOŚĆ PARAMETRÓW STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI W DIAGNOZOWANIU STANU PAR KINEMATYCZNYCH

Maciej MATUSZEWSKI

Zakład Obrabiarek i Robotów, Wydział Mechaniczny
Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy
al. Prof. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, e-mail: matus@atr.bydgoszcz.pl

Streszczenie

W pracy przeanalizowano przydatność oceny stanu warstwy wierzchniej elementów maszyn w procesie diagnozowania stanu obiektu technicznego. Omówiono parametry warstwy wierzchniej, które wyznaczają jej własności i właściwości. Przedstawiono również wyniki badań wstępnych przeprowadzonych na zaprojektowanym i wykonanym stanowisku badawczym. Dotyczą one wpływu parametrów kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni (a więc jednego z czynników wyznaczających stan warstwy wierzchniej) na przebieg transformacji eksploatacyjnej warstwy wierzchniej elementów par kinematycznych ze stykiem konforemnym. Wyniki badań potwierdziły istotność badanych czynników na intensywność procesu zużywania.

Słowa kluczowe: warstwa wierzchnia, kierunkowość struktury, proces zużywania, diagnozowania

USABILITY OF PARAMETERS OF SURFACE GEOMETRIC STRUCTURE IN DIAGNOSTIC PROCESS OF KINEMATIC PAIR STATE

Summary

In this paper usability of state estimation of machine elements surface layer in diagnostic process of technical object state was analyzed. The parameters of surface layer which determine its characteristics and properties also were discussed. The results of initial investigations realized on test stand, designed and made for this aim, were presented too. These experiments concern influence of texture direction parameters of surface geometric structure on the run of service generated layer transformation of kinematical pair elements with conform contact. These parameters are important factors which determined surface layer state. Obtained results confirm significance of tested factors on intensity of wear.

Key words: surface layer, texture direction, wear, diagnostics

1. WPROWADZENIE

Powierzchnia rzeczywista elementów maszyn, która charakteryzuje się bardzo złożoną budową stereometryczną, stanowi zewnętrzną część warstwy materiału zwaną warstwą wierzchnią (WW). W dostępnej literaturze znaleźć można wiele jej definicji. Zgodnie z [1], jako warstwę wierzchnią rozumie się zbiór punktów materialnych zawartych między powierzchnią zewnętrzną a powierzchnią umowną będącą granicą zmian wartości cech strefy podpowierzchniowej, powstałych w wyniku wymuszeń zewnętrznych: nacisku, temperatury, czynników chemicznych, elektrycznych, bombardowania cząstkami naładowanymi i elektrycznie obojętnymi i innymi.

Pozostała część materiału przedmiotu poza warstwą wierzchnią – to rdzeń. W polskiej normie [6] warstwę wierzchnią zdefiniowano jako „warstwę materiału ograniczoną rzeczywistą powierzchnią przedmiotu, obejmującą tę powierzchnię oraz część materiału w głąb od powierzchni rzeczywistej, która

wykazuje zmienione cechy fizyczne i niekiedy chemiczne w stosunku do cech tego materiału w głębi przedmiotu”.

Warstwa wierzchnia elementów maszyn konstituowana podczas procesu wytwarzania jest nazywana technologiczną warstwą wierzchnią (TWW). Jej cechy, tzn. struktura, własności i właściwości w największym stopniu zależą od rodzaju i parametrów stosowanej obróbki wykańczającej oraz od rodzaju tworzywa konstrukcyjnego, z którego wykonano współpracujące elementy.

Uzyskane cechy eksploatacyjne nie są stałe i pod wpływem wymuszeń zewnętrznych, tj. obciążenia, tarcia, oddziaływania środowiska itp., ulegają zmianom, a warstwa wierzchnia w tej fazie istnienia maszyny nazywa się eksploatacyjną warstwą wierzchnią (EWW). W literaturze brak jest jednoznacznych informacji jak należy zakwalifikować WW elementów w fazie magazynowania i transportu do EWW czy TWW. Z jednej strony nie oddziałują na nią jeszcze zewnętrzne wymuszenia eksploatacyjne nie ma więc podstaw do zaliczenia

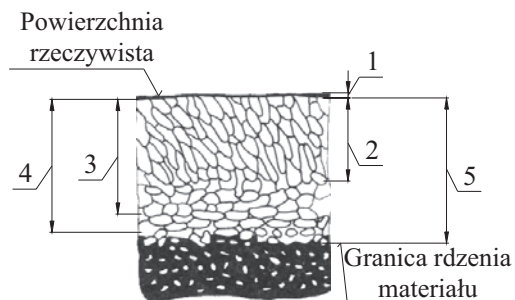
jej do EWW, z drugiej zaś - proces wytwórczy został już zakończony a więc nie jest to już TWW.

2. WARSTWA WIERZCHNIA

2.1. Budowa warstwy wierzchniej

Teoretyczne modele warstwy wierzchniej zakładają jej budowę strefową. Każda strefa jest częścią warstwy, a jej głębokość jest wyznaczana przez istnienie określonej cechy. Ze względu na trudność w opracowaniu ogólnego modelu budowy strukturalnej warstwy wierzchniej, w literaturze spotyka się wiele propozycji modeli warstwy wierzchniej składających się z różnej liczby stref.

Najprostszym modelem jest model 3-strefowy [4], a najbardziej rozwiniętym model 9-strefowy [2]. W modelach o większej liczbie stref, nowe powstały poprzez podzielenie stref istniejących lub wprowadzenie dodatkowych. Model ujęty w obowiązującej normie [6] jest modelem 5-strefowym. Jego postać graficzną przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1 Schemat 5-strefowego modelu warstwy wierzchniej (opis w tekście)

W modelu tym wyróżnia się następujące strefy:

- przypowierzchniową (1) - stanowi ona część warstwy wierzchniej przylegającą bezpośrednio do powierzchni rzeczywistej, nie ma charakterystycznej własnej struktury, zbudowana jest z zaadsorbowanych lub związanych chemicznie z podłożem jonów pochodzących z otaczającego ośrodka lub z elementów współpracujących z przedmiotem,
- ukierunkowaną (2) - leżącą pod strefą przypowierzchniową, występuje w niej ukierunkowanie ziarn materiału, np. na skutek odkształceń plastycznych,
- efektów cieplnych (3) - jest to strefa, w której na skutek procesów cieplnych nastąpiły zmiany wielkości ziarn, przemiany fazowe, przemiany fizyczne, reakcje chemiczne itp.,
- steksturowania (4) - strefa, w której występuje tekstura krystaliczna,
- zgniotu (5) - strefa, w której nastąpiło odkształcenie plastyczne.

W większości przypadków granice poszczególnych stref nie są wyraźne, obserwuje się łagodne

zanikanie cech jednej strefy przy jednoczesnym pojawianiu się cech drugiej.

2.2. Własności i właściwości warstwy wierzchniej

Stan warstwy wierzchniej, a więc jej własności i właściwości, wyznaczany jest przez zbiór cech, które można opisać parametrami: stereometrycznymi, fizykochemicznymi i stereometryczno-fizykochemicznymi [1,3].

O własnościach i właściwościach warstwy wierzchniej w największym stopniu decydują parametry opisujące strukturę stereometryczną powierzchni, nazywaną częściej strukturą geometryczną powierzchni (SGP). Strukturę tę tworzą nierówności powierzchni, czyli wzniesienia i wgłębienia będące śladami realizowanej obróbki lub skutkami procesu zużywania. W zależności od rozmieszczenia charakterystycznych elementów SGP powierzchnia może mieć charakter anizotropowy lub izotropowy. Jako podstawowe parametry opisujące strukturę geometryczną powierzchni przyjmuje się:

- chropowatość powierzchni
- falistość,
- kierunkowość śladów obróbki,
- defekty struktury geometrycznej powierzchni.

Do parametrów fizyko-chemicznych określających stan warstwy wierzchniej zalicza się wielkości opisujące następujące cechy:

- strukturalne materiału (budowa),
- mechaniczne (twardość, kruchość, naprężenia własne),
- chemiczne (skład chemiczny, adsorpcja chemiczna, absorpcja),
- fizyczne (adhezja, adsorpcja fizyczna),
- elektryczne (rezystancja, konduktywność),
- magnetyczne (korekcja, przenikalność).

Jako parametry stereometryczno-fizykochemiczne przyjmuje się: energię powierzchniową i napięcie powierzchniowe.

W każdej z wymienionych grup parametrów są wielkości w większym lub mniejszym stopniu istotne dla przebiegu i opisu procesu eksploatacji, a tym samym procesu zużywania. Poza tym ich znaczenie nie jest takie same w każdych warunkach pracy pary kinematycznej.

3. STAN WARSTWY WIERZCHNIEJ A PROCES DIAGNOZOWANIA

Znajomość podstaw fizycznych zjawisk starzeniowych i zużyciowych ułatwia poznanie i opis generowanych sygnałów diagnostycznych, umożliwiających śledzenie zmian stanu obiektu i przewidywanie uszkodzeń, co warunkuje skuteczność diagnostyki technicznej [11,12].

Wytrzymałość eksploatacyjna elementów maszyn, która jest uwarunkowana odpornością na zużywanie jest ściśle związana z właściwościami warstwy wierzchniej. Ponieważ procesy tarcia

i zużywania elementów zachodzą w warstwie wierzchniej, warstwie tej nadaje się właściwości zwiększające odporność na niszczące działanie wymuszeń podczas pracy maszyn i urządzeń.

Właściwości warstwy wierzchniej są kształtowane na etapie wytwarzania elementów maszyn. Zmieniając się w procesie eksploatacji obiektów technicznych są przyczyną zmiany stanu, prowadząc do ich uszkodzeń i niezdatności. Określenie aktualnego stanu maszyny jest jednym z zadań diagnostyki technicznej.

Znając mechanizmy i prawidłowości zużywania się pary trącej można tak pokierować procesami: technologicznym i eksploatacyjnym, aby zmiany w warstwie wierzchniej były minimalne i zapewniały jak najdłuższy okres pracy z niezmiennymi, założonymi konstrukcyjnie cechami pary kinematycznej.

Prawidłowo ukonstytuowana, w rezultacie zrealizowanych procesów technologicznych, warstwa wierzchnia elementów maszyn zapewnia maksymalną odporność na skutki procesu zużywania, a tym samym dużą trwałość współpracujących elementów maszyn i urządzeń.

W literaturze dotyczącej relacji między stanem warstwy wierzchniej a przebiegiem procesu zużywania jako parametry opisujące stan warstwy wierzchniej przyjmuje się w większości przypadków różne parametry chropowatości, np. [3, 10]. Są one bez wątpienia istotne zarówno dla konforemnego jak i niekonforemnego styku współpracujących powierzchni. Dla procesu zużywania istotnym elementem struktury geometrycznej powierzchni jest także jej kierunkowość, szczególnie dla styku konforemnego powierzchni współpracujących elementów par kinematycznych [5]. W tym przypadku uporządkowane rozmieszczenie śladów obróbki może być czynnikiem determinującym opory względnego ruchu współpracujących elementów oraz intensywność zachodzących procesów zużywania. Szczególnie istotne jest wzajemne usytuowanie śladów obróbki na obu powierzchniach.

W literaturze nie ma zbyt wielu publikacji dotyczących tego problemu, a więc nie jest jednoznacznie określony wpływ kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni na proces zużywania, i związaną z nim zmianę stanu warstw wierzchnich skojarzonych elementów par kinematycznych.

Kierunkowość struktury geometrycznej powierzchni jest uwzględniana niekiedy w rozważaniach dotyczących zupełnie innych zagadnień, np. przy rozpatrywaniu wytrzymałości zmęczeniowej łożysk ślizgowych [7], procesu docierania par trących [8], czy też pracy siłowników hydraulicznych [9]. Wpływ kierunkowości struktury analizowany jest wówczas w ściśle określonych warunkach współpracy, a sformułowane wnioski odnoszą się do tych właśnie warunków.

Aby tę hipotezę zweryfikować podjęto dalsze badania, które pozwolą rozszerzyć wiedzę z tego

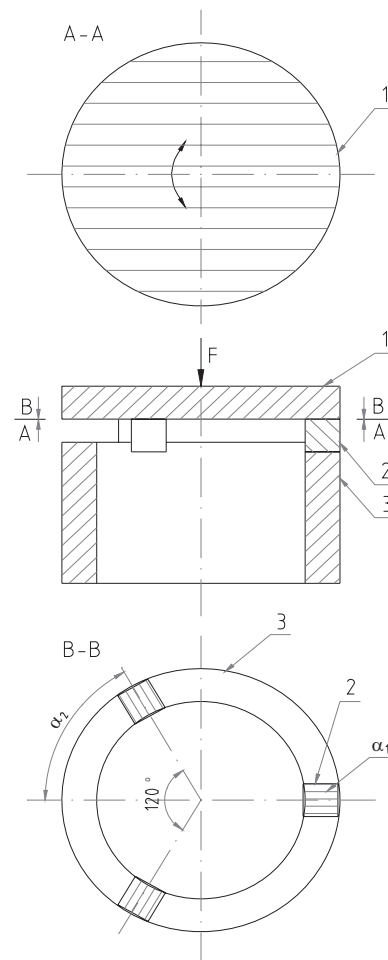
zakresu oraz potwierdzić i uogólnić rezultaty dokonanych już obserwacji.

Zaobserwowane zmiany w zakresie kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni jako jednego z parametrów opisujących stan warstwy wierzchniej mogą być przydatne w procesie diagnozowania stanu obiektu technicznego.

4. BADANIA WŁASNE

4.1. Stanowisko badawcze

W celu określenia wpływu parametrów opisujących kierunkowość struktury geometrycznej współpracujących powierzchni na intensywność procesu zużywania, zaprojektowano i wykonano stanowisko badawcze. Zasada współpracy próbki i przeciwpróbki w trakcie badań przedstawiona jest na rys. 2.



Rys. 2. Schemat współpracy próbki – przeciwpróbki (na próbkach i przeciwpróbkach zaznaczono kierunkowość powierzchni)

Badane próbki (2) mocuje się w trzech rowkach wykonanych na czole tuleji (3) ustalającej próbki.

Na powierzchni czołowej tulei są wykonane różne kombinacje rowków, przez co uzyskuje się różne skojarzenia kątowe śladów obróbki na próbce i przeciwpróbce (1). Każda kombinacja zawiera trzy rowki rozmieszczone co 120° . Uzyskuje się w ten sposób pewny i równomierny, trój-powierzchniowy docisk współpracujących elementów realizowany za pomocą sprężyny.

Ponieważ na czole tulei ustalającej próbki można wykonać skończoną ilość rowków, ten element jest wymienny co umożliwia uzyskanie nieskończenie wielu wariantów skojarzenia próbki z przeciwpróbką. Wymiennym elementem jest ponadto przeciwpróbka, na której są ściśle określone ślady obróbki. Wymienność tego elementu umożliwia również zmianę skojarzenia kąтового śladów po obróbce próbki z przeciwpróbką.

Próbki umieszczone są w tulei nieruchomo a ruch względny, oscylacyjny wykonuje przeciwpróbka.

4.2. Metodyka badań

Założeniem pracy jest określenie wpływu kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni na intensywność procesu zużywania. Istotnym elementem badań jest także wyznaczenie relacji między wybranymi parametrami kierunkowości SGP a wielkościami określającymi zużycie. Z tego powodu istotne jest aby przyjąć takie zbiory czynników badanych (wejściowych) i wynikowych (wyjściowych), które pozwolą osiągnąć założone cele.

Postać konstrukcyjna stanowiska umożliwia obserwację tego procesu przy następujących wielkościach tworzących zbiór zmiennych czynników wejściowych:

- kąt między śladami obróbki dla skojarzenia próbka – przeciwpróbka
- prędkość ruchu względnego,
- obciążenie,
- rodzaj tworzywa konstrukcyjnego skojarzenia próbka – przeciwpróbka,
- rodzaj środka smarującego.

Czynnikami wyjściowymi są następujące wielkości:

- parametry opisujące SGP,
- masa próbek (zmienna w czasie badań),
- wymiary (wysokość) próbek.

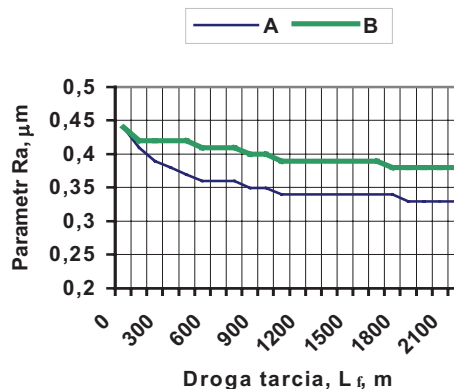
4.3. Wyniki badań wstępnych

Badania przeprowadzono dla ulepszonej stali 45 o twardości 40 HRC, przeciwpróbka wykonana była ze stali NC 6 zahartowanej do twardości 60 HRC. Twardość przeciwpróbki zdecydowanie przewyższa (o 50 %) twardość próbek, aby zmiany stanu struktury geometrycznej powierzchni występowały przede wszystkim w warstwie wierzchniej próbek. Prędkość ruchu względnego podczas badań wyniosła

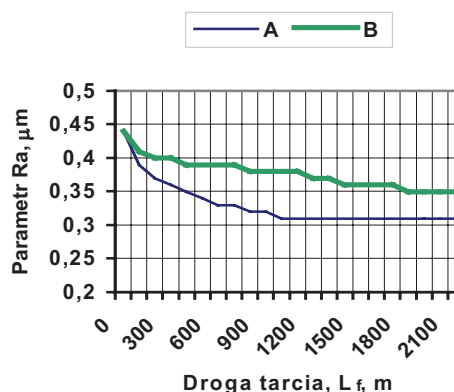
2,9 m/min (0,05 m/s), a próbki pracowały w ośrodku smarującym jakim był olej maszynowy.

Na rys. 3 w postaci wykresów przedstawiono wyniki badań wstępnych dla skojarzeń kątowych między charakterystycznymi śladami po obróbce wynoszącymi 0° i 60° .

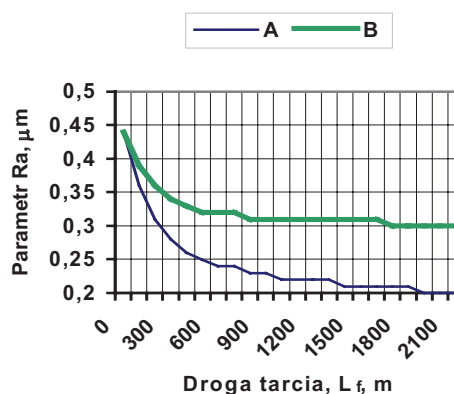
a)



b)



c)



Rys. 3. Wartości parametru chropowatości Ra w funkcji drogi tarcia dla kąta przecięcia charakterystycznych śladów po obróbce $\alpha_1 = 0^\circ$ (A), $\alpha_2 = 60^\circ$ (B) i dla następujących wartości sił nacisku: a) 300 N, b) 450 N, c) 600 N

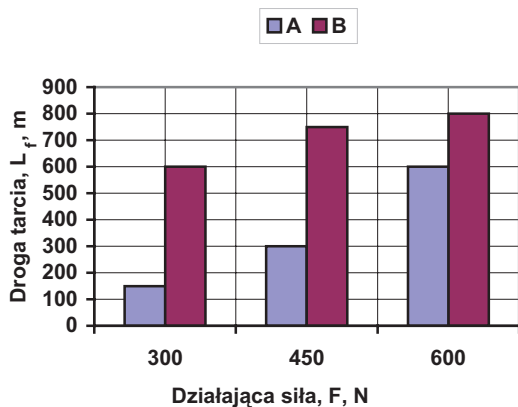
Zmianę stanu warstwy wierzchniej obserwowano dla trzech różnych obciążeń i dwóch skojarzeń kątowych między charakterystycznymi kierunkowościami struktury.

Obciążenie było realizowane dla następujących wartości sił docisku przeciwności do próbek: 300 N, 450 N, 600 N, co odpowiada teoretycznym naciskom w strefie styku wynoszącym odpowiednio: 1,0 MPa; 1,5 MPa; 2,0 MPa.

Z przeprowadzonych badań wynika, że zmiany wartości parametru Ra są uzależnione od wartości obciążenia. Im większa siła tym zmiana parametru Ra jest większa.

Na przedstawionych wykresach widać także, że zmiana parametru Ra jest również zależna od wartości kąta między charakterystycznymi śladami obróbki na powierzchniach współpracujących elementów. Zaobserwować można, że dla kąta współpracy 0° następuje większa zmiana wartości parametru Ra niż dla kąta 60° .

Z wykresów wynika również to, że w początkowym okresie współpracy następuje intensywne zmiana wartości parametru Ra, a w późniejszym okresie następuje stabilizacja. Jest to zgodne z założonym mechanizmem procesu zużywania. Na tej podstawie można sporządzić wykres (rys. 4) przedstawiający stabilizację procesu zużywania w funkcji działającego obciążenia, co z kolei może być wykorzystywane w procesie prognozowania stanu warstwy wierzchniej współpracujących elementów maszyn.



Rys. 4 Schemat stabilizacji procesu zużywania (mierzonej zmianą parametru Ra) dla różnych sił: A - dla $\alpha_1 = 0^\circ$, B - dla $\alpha_2 = 60^\circ$

Z wykresów przedstawionych na rys. 3 dla kąta współpracy 0° wynika, że się zanik zmian parametru Ra dla siły 300 N następuje już po drodze tarcia 150 m, a przy sile 600 N - dopiero po wykonaniu drogi tarcia równej 600 m. Dla kąta współpracy 60° droga tarcia wynosi odpowiednio 600 m dla siły 300 N i 800 m dla siły 600 N. Zjawisko to przedstawiono schematycznie na rys. 4. Z tego wykresu wynika również to, że na stabilizację warunków pracy dla kąta współpracy wynoszącego 0° , w większym

stopniu wpływa działająca siła, niż dla kąta wynoszącego 60° .

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania doświadczalne wykazały, że badane czynniki są wzajemnie zależne od siebie. Stwierdzono także, że parametry kierunkowości mają istotny wpływ na intensywność procesu zużywania tribologicznego. Celowe więc będzie zrealizowanie pełnego cyklu badań, aby określić relacje ilościowe między badanymi czynnikami.

Przeprowadzone badania wstępne pozwoliły na zweryfikowanie postaci konstrukcyjnej stanowiska oraz przyjętej metodyki badań. Wykazały one prawidłowość działań w obydwóch fazach przygotowania badań.

Przyjęte czynniki badane pozwalają na obserwację procesu zużywania, w szerokim zakresie zmiennych niezależnych. Umożliwiają ponadto określenie wpływu poszczególnych badanych czynników na intensywność tego procesu. Przyczyni się to tym samym do poszerzenia wiedzy o jego przebiegu i mechanizmach.

Rozwiązanie konstrukcyjne stanowiska i przyjęte zbiory zmiennych niezależnych i zależnych pozwalają na przeprowadzenie badań, w wyniku których można będzie osiągnąć założone cele. Będzie można określić wpływ (lub jego brak) kierunkowości struktury geometrycznej powierzchni na proces zużywania tribologicznego elementów par kinematycznym ze stykiem konforemnym.

Wnioski z badań mogą być przydatne zarówno w fazie projektowania i konstruowania oraz wytwarzania, ale również w czasie eksploatacji maszyn, w których pary kinetyczne o takim charakterze występują. Na każdym z tych etapów istnienia obiektu technicznego, chociaż w różnym zakresie proces diagnozowania występuje, więc wnioski z badań mogą być również wykorzystywane do tych procesów diagnostycznych.

LITERATURA:

- [1] Burakowski T., Wierchoń T.: Inżynieria powierzchni metali. WNT, Warszawa 1995.
- [2] Duś-Sitek M.: Doświadczalne stwierdzenie istnienia strefy nadpowierzchniowej warstwy wierzchniej – modyfikacja modelu warstwy wierzchniej. Inżynieria Powierzchni nr 1/1999.
- [3] Hebda M., Wachal A.: Trybologia. WNT, Warszawa 1980.
- [4] Kolman R.: Mechaniczne wzmocnienie powierzchni części maszyn. WNT, Warszawa 1965.
- [5] Matuszewski M., Styp-Rekowski M.: Significance Meaning of Texture Direction of Surfaces' Geometric Structure for Course of Wear Process. International Journal of Applied Mechanics and Engineering, vol. 9/2004, pp. 111-116.

[6] PN-87M-04250: Warstwa wierzchnia. Terminologia.

[7] Sikora J.: Studia nad metodyką badania wytrzymałości zmęczeniowej łożysk ślizgowych poprzecznych. Zeszyt naukowy nr 534 Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1996.

[8] Śliwiński W.: Proces docierania metalowych par trących w warunkach smarowania. Zeszyt naukowy nr 71 Politechniki Krakowskiej, Kraków 1990.

[9] Zakościelny St.: Wpływ kierunkowości śladów obróbki oraz sposobu wytwarzania na ścierność i ścieralność honowanej powierzchni na przykładzie siłowników hydraulicznych. Praca doktorska, Gliwice 1981.

[10] Zwierzycki W., Grądkowski M. (redakcja): Fizyczne podstawy doboru materiałów na elementy maszyn współpracujących tarciovo. Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2000.

[11] Żółtowski B., Cempel Cz. (redakcja): Inżynieria diagnostyki maszyn, Instytut Technologii Eksploatacji, Radom 2004.

[12] Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki maszyn. Wyd. ATR, Bydgoszcz 1996.



Mgr inż. Maciej Matuszewski ukończył w 1998r. studia na Wydziale Mechanicznym Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy. Od 2000 roku jest pracownikiem tego wydziału zatrudnionym na stanowisku asystenta w Zakładzie Obrabiarek i Robotów funkcjonującego w strukturach Katedry Inżynierii Produkcji. W pracy naukowej zajmuje się badaniami stanu warstwy wierzchniej oraz transformacją warstwy wierzchniej. Prowadzi badania dotyczące wpływu kierunkowości SGP na proces zużywania elementów maszyn. Autor lub współautor kilku publikacji dotyczących tej tematyki.