

DIAGNOZOWANIE STANU STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI O ROZWIĘTEJ RZEźBIE

Volodymyr LIUBIMOV*, Janusz MUSIAŁ**, Michał STYP-REKOWSKI**

* Politechnika Rzeszowska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technik Wytwarzania i Automatykacji,
ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów

** Akademia Techniczno-Rolnicza, Wydział Mechaniczny, Zakład Obrabiarek i Robotów
ul. S. Kaliskiego 7, 85-796 Bydgoszcz, jamusual@atr.bydgoszcz.pl

Streszczenie

W niniejszym opracowaniu przedstawiono pewien sposób oceny powierzchni, w którym wykorzystano metodę pomiaru geometrycznych cech wgłębień występujących w strukturze geometrycznej powierzchni roboczych łożysk tocznych. Wykorzystując specjalistyczną aparaturę pomiarową Talyscan, dla wgłębień i pików określono: powierzchnię objętość, maksymalną oraz średnią wartość głębokości lub wysokości.

Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych świadczą o tym, że możliwe jest opisanie za pomocą proponowanej metody zmian, jakie zaszły w strukturze geometrycznej badanych powierzchni podczas procesu zużywania.

Słowa kluczowe: struktura geometryczna powierzchni, łożysko toczne, zużywanie, diagnozowanie

DIAGNOSTICS OF SURFACE GEOMETRIC STRUCTURE STATE WITH DEVELOPED SCULPTURE

Summary

In this paper some method of surface estimation was shown. To this aim measures geometric features of holes and pikes exist in geometric structure of tested surfaces of rolling bearings were used. Applying specialistic measuring Talyscan apparatus, for the holes and the pikes following quantities were obtained: area, volume, maximum and average values of depth or height, respectively.

The results of worked out experimental investigations confirm ability of description by mentioned method of the changes in geometric structure of tested surfaces which occur during wear processes. Thus, there are possibilities applications of these results in diagnostic processes.

Keywords: surface, geometric structure, rolling bearing, wear process, diagnostics

1. WPROWADZENIE

Warstwa wierzchnia elementów maszyn stanowi czynnik, który w głównej mierze determinuje ich własności, a skojarzenie warstw wierzchnich dwóch współpracujących elementów decyduje o właściwościach pary kinematycznej, jaką tworzą te elementy. Jedną z wielkości charakterystycznych warstwy wierzchniej jest struktura geometryczna powierzchni, która determinuje przebieg zużywania. Zmiany SGP powodują zmianę stanu danej pary kinematycznej, dlatego też monitorowanie tych zmian jest jednym z podstawowych działań w procesie diagnozowania [9].

Powyższe fakty świadczą jednocześnie o dużym znaczeniu warstwy wierzchniej, struktury geometrycznej powierzchni oraz podkreślają znaczenie oceny stanu WW w procesie diagnozowania. Dały też asumpt do zrealizowania przedstawionych w niniejszej pracy analiz i badań.

2. BADANIE STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI

Rozszerzenie wiedzy o ukształtowaniu struktury geometrycznej powierzchni (SGP) oraz opracowanie i stosowanie nowych sposobów jej oceny (ilościowej i jakościowej) stało się możliwe m.in. dzięki precyzyjnej, wspomaganej komputerowo aparaturze pomiarowej. Powstały nowe programowe możliwości analizy powierzchni w układzie przestrzennym (3D) co w połączeniu ze zwiększoną dokładnością narzędzi pomiarowych pozwala obserwować i mierzyć elementy SGP w skali nanometrycznej i opisać ją za pomocą wielu parametrów, nie tylko powierzchniowych lecz także objętościowych, przestrzennych, hybrydowych oraz funkcjonalnych [3,6].

W przypadku powierzchni o rozwiniętej rzeźbie, a więc takiej, w której występują duże mikronierówności (o dużej objętości) precyzyjne

lecz tradycyjne metody pomiaru (3D) nie są w pełni przydatne do ilościowego opisu SGP.

Rozwój profilometrii skaningowej przyczynił się do zwiększenia możliwości pomiarowych, np. prowadzenia badań we wstępnej fazie procesu zużycia, kiedy otrzymane wyniki za pomocą innych metod są obciążone dużym błędem (np. metoda wagowa) [5].

Analiza struktury geometrycznej powierzchni przy zastosowaniu profilometrii skaningowej dostarcza wiele informacji o rodzaju i charakterze zjawisk zachodzących w obszarze styku współpracujących powierzchni [4]. Wykorzystywana jest także do oceny przydatności środków smarowych stosowanych w węzłach tribologicznych [1].

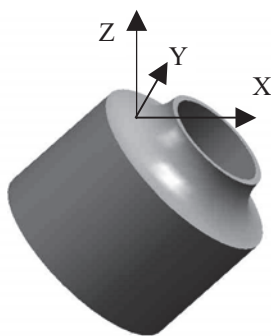
W niniejszym opracowaniu przedstawiono sposób oceny powierzchni, w którym wykorzystano metodę pomiaru wgłębień i pików (wierzchołków) występujących w strukturze geometrycznej badanych powierzchni.

Wykorzystując specjalistyczną aparaturę pomiarową Talyscan 150 firmy Taylor-Hobson z zastosowaniem programu Mountains Map Universal, określono maksymalną oraz średnią wartość głębokości lub wysokości odpowiednio: wgłębień lub wierzchołków oraz ich powierzchnię i objętość.

3. OBIEKT I METODA BADAŃ

Jako obiekt badań przyjęto skośne łożysko kulkowe. Wybrano ten typ łożyska gdyż, ze względu na postać konstrukcyjną i związaną z nią kinematyką jego elementów, duża jest intensywność zjawisk towarzyszących transformacji struktury geometrycznej powierzchni, co stwarza lepsze warunki obserwacji.

Ze względu na charakter obciążenia, kinematykę elementów łożyska i całą istotę jego działania w warunkach rzeczywistych w badanej tocznej parze kinematycznej większe zmiany zachodzą na bieżni na pierścieniu wewnętrznym, dlatego też pomiary i obserwacje przeprowadzono na tym elemencie łożyska. Postać konstrukcyjną obiektu badań wraz z przyjętym układem współrzędnych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Obiekt badań i przyjęty w badaniach układ współrzędnych

Obserwacji przebiegu zmian dokonywano na bieżni na nieruchomym pierścieniu wewnętrznym, w określonym miejscu, w którym kulka oddziałuje na bieżnię ze zdefiniowaną siłą, dlatego też istotne jest jednoznaczne zorientowanie tego pierścienia w przestrzeni badawczej [2].

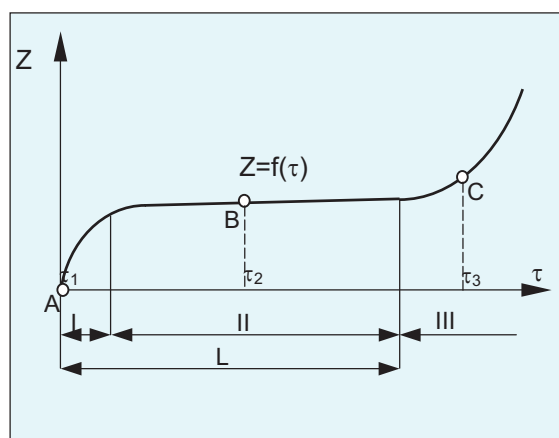
Wyniki badań rejestrowano dla trzech wartości czasu τ :

- na początku badań (początek I okresu), dla $\tau_1=0$ s,
- w okresie ustalonej intensywności zmian (mniej więcej w połowie II okresu), $\tau_2=2,1 \cdot 10^5$ s,
- w końcowym okresie zdatości łożyska (III okres), $\tau_3=3,9 \cdot 10^5$ s.

Przyjęcie punktów pomiarowych o powyższych współrzędnych wynikało z rezultatów kompleksowych badań skośnych łożysk tocznych opisanych w pracy [7].

Na rysunku 2 przedstawiono przebieg procesu zużycia. Wyraźne są w nim trzy okresy:

- I – szybkiego wzrostu intensywności zużycia,
- II – ustalonego poziomu lub niewielkich zmian zużycia,
- III – ponownie szybkiego wzrostu intensywności zużycia.

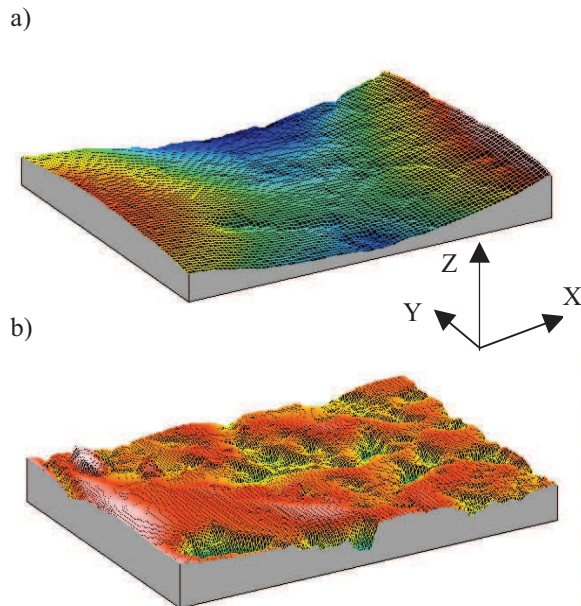


Rys. 2. Graficzny zapis typowego procesu zużycia

W tradycyjnym ujęciu przyjmuje się, że trwałość jest sumą I i II okresu. Na podstawie badań [7] stwierdzono, że przy kryterium trwałości w postaci poziomu oporów ruchu do okresu wyznaczającego granicę zdatości a więc jako trwałość łożysk można przyjąć jeszcze część okresu III, dlatego też w tym okresie przyjęto trzeci punkt, w którym obserwowano przebieg zmian. Współrzędne punktów pomiarowych: A, B, C, w których dokonywano pomiarów i obserwacji zaznaczono na rysunku 2.

Obraz 3D mierzonej powierzchni przedstawiony jest na rysunku 3a, natomiast powierzchnia po

odfiltrowaniu krzywoliniowego zarysu powierzchni teoretycznej na rysunku 3b.



Rys. 3. Mikrogeometria badanej powierzchni: a) obraz 3D mierzonej powierzchni, b) chropowatość powierzchni po odfiltrowaniu krzywoliniowej nominalnej powierzchni teoretycznej

Ze względu na fakt, że badana była powierzchnia o zarysie krzywoliniowym (wkłęsło-wypukła), wyznaczono teoretyczną powierzchnię jej krzywizny, a następnie poddano odfiltrowaniu otrzymując odwzorowanie obrazu na powierzchni płaskiej.

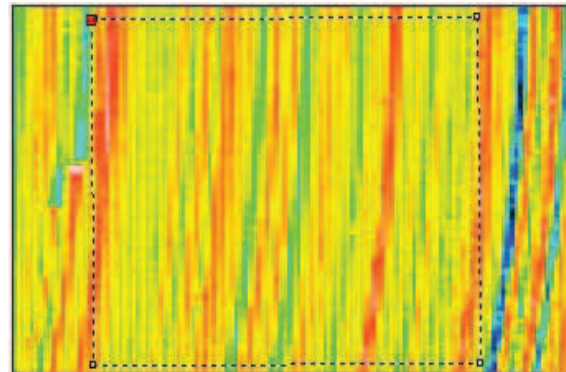
4. GRAFICZNA PREZENTACJA I ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Wyniki badań zostały przedstawione poniżej w formie graficznej. W badaniach pomiarów dokonywano na powierzchni o wymiarach 2mm x 2mm. Do oceny badanych powierzchni wykorzystano wielkości opisujące elementarne fragmenty struktury geometrycznej powierzchni: wgłębienia i wzniesienia jakie na powierzchni występują. Zbiór tych wielkości tworzyły:

- pole powierzchni, mm^2 ,
- objętość zagłębień i występów, μm^3 ,
- maksymalna wartość (odpowiednio: głębokości lub wysokości), μm ,
- średnia wartość głębokości lub wysokości, μm .

Obraz badanej powierzchni dla czasu $\tau_1=0\text{s}$, tzn. przed rozpoczęciem procesu eksploatacji, oraz wyniki pomiarów przyjętych wielkości przedstawiono na rysunku 4. Na badanej powierzchni widoczne są ślady obróbki, zaś

z porównania parametrów dla wgłębień oraz wzniesień wynika, że wartości te są zbliżone – są tego samego rzędu. Świadczy to o tym, że początkowa struktura powierzchni bezpośrednio zależy od parametrów obróbki wykańczającej tego elementu łożyska oraz od geometrii ostrza narzędzia, za pomocą którego tę obróbkę realizowano.



	wgłębienie	wzniesienie
powierzchnia [mm^2]	0,67	0,342
objętość [μm^3]	484262	190407
max. wartość [μm]	2,44	2,47
średnia wartość [μm]	0,723	0,557

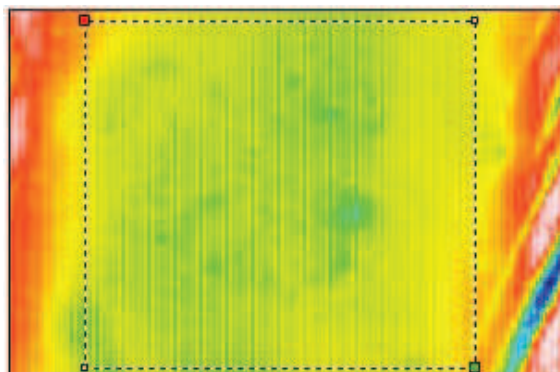
Rys. 4. Wyniki pomiarów w I okresie, dla $\tau_1=0\text{ s}$

Następnie łożyska z pierścieniami wewnętrznymi eksploatowano przez czas $\tau_2=2,1 \cdot 10^5\text{ s}$. Wyniki pomiarów po tym czasie zostały przedstawione na rysunku 5.

Na podstawie wyników tego fragmentu badań można stwierdzić, że wartość parametrów dla wgłębień wzrosła, a dla wzniesień zmalała. Spowodowane jest to tym, że toczenie się obciążonych kulek po bieżni spowodowało wyrównanie badanej powierzchni na skutek trwałych odkształceń plastycznych.

Na tym etapie nie widać jeszcze wyraźnych oznak zużycia. Widoczne są nieznaczne skutki zużywania, które można zaliczyć do ubytków w wyniku ścierania oraz efektów brinellowania, spowodowanego obecnością twardych produktów zużywania w smarze. Nie stanowią one jeszcze podstawy do dyskwalifikacji powierzchni i uznania obserwowanego elementu jako niezdatnego do dalszego użytkowania.

W badaniach przyjęto, że łożyska toczone zostaną poddane pomiarom dla trzech czasów: na początku eksploatacji – punkt A, w okresie ustalonej intensywności zmian – punkt B oraz w końcowym okresie zdatności łożyska – punkt C. Wartości wielkości stanowiących podstawę oceny badanych powierzchni próbek w ostatnim okresie, dla czasu $\tau_3=3,9 \cdot 10^5\text{ s}$, zostały przedstawione na rysunku 6.



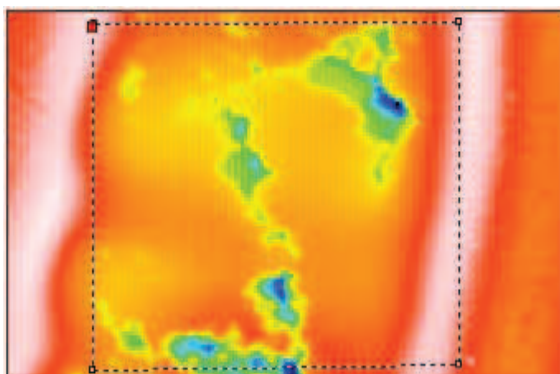
	wgłębienie	wzniesienie
powierzchnia [mm ²]	1,17	0,206
objętość [μm ³]	1252306	91753
max. wartość [μm]	3,49	1,61
średnia wartość [μm]	1,07	0,445

Rys. 5. Wyniki pomiarów w II okresie, dla $\tau_2=2,1 \cdot 10^5$ s

Znacznie większe zużycie obserwowane na powierzchniach przejawiało się w następujących formach:

- zużycia ściernego,
- odkształceń plastycznych,
- pittingu.

Zwiększona koncentracja produktów zużycia w środku smarowym powodowała także zwiększone występowanie tzw. brinellowania.



	wgłębienie	wzniesienie
powierzchnia [mm ²]	1,18	0,094
objętość [μm ³]	7651355	133871
max. wartość [μm]	35,0	5,22
średnia wartość [μm]	6,5	1,43

Rys. 6. Wyniki pomiarów w III okresie, dla $\tau_3=3,9 \cdot 10^5$ s

Porównując wartości badanych parametrów dla poszczególnych czasów, stwierdzić należy, że wraz ze wzrostem czasu eksploatacji badanych próbek wzrasta maksymalna głębokość występujących w strukturze wgłębień – od ok. 40% po czasie τ_2 do 1300% po czasie τ_3 . Dzieje się tak przy niewiele zmieniającej się w przedziale czasu $\tau_2 - \tau_3$ ich powierzchni. Może to świadczyć o postępującej destrukcji powierzchni powodowanej oddziaływaniem zewnętrznych wymuszeń siłowych podczas eksploatacji.

Łączna objętość wgłębień po pierwszym okresie eksploatacji, a więc dla czasu τ_2 wzrasta 1,5-krotnie a po czasie τ_3 prawie 15-krotnie, co stanowi potwierdzenie intensywnego występowania wspomnianej destrukcji.

Inna sytuacja występuje w przypadku wzniesień. Ich maksymalna wysokość początkowo maleje (o ok. 35%) a następnie rośnie (o ponad 110%) w stosunku do wartości początkowej. Powierzchnia wzniesień w tym czasie zmniejsza się o ponad 70%. Taka zmiana świadczy o stopniowym wygładzaniu powierzchni w wyniku wielokrotnego przetaczania się po niej obciążonych elementów tocnych.

Objętość wzniesień w analizowanym czasie także maleje, lecz tylko o około 30%.

Dla celów diagnostycznych zakres parametrów opisujących strukturę geometryczną powierzchni rozszerzono o parametry objętościowe (odnoszą się one także do objętości wgłębień i wzniesień):

- Smmr – współczynnik objętości materiału, mm³/mm²,
- Smvr – współczynnik objętości pustek materiałowych, mm³/mm².

Ze względu na rodzaj dominującego procesu zużywania (tribologiczne) w analizach diagnostycznych proponuje się uwzględnić kolejne parametry, które zaliczane są do grupy parametrów funkcjonalnych:

- Sci – wskaźnik zatrzymania płynu przez rdzeń,
- Svi – wskaźnik zatrzymania płynu przez wgłębienia.

Uwzględniono także podstawowy parametr chropowatości jakim jest średnie arytmetyczne odchylenie mikronierówności od linii średniej, a więc parametr Sa.

Wartości analizowanych wielkości dla poszczególnych czasów eksploatacji badanych łożysk zestawiono w Tabelicy 1.

Tabelica 1. Wartości analizowanych parametrów

Parametr	Czas		
	τ_1	τ_2	τ_3
Smmr [mm ³ /mm ²]	0,002	0,004	0,035
Smvr [mm ³ /mm ²]	0,002	0,002	0,005
Sci	1,37	2,05	1,43
Svi	0,14	0,058	0,163

Sa [μm]	0,58	1,37	3,63
----------------------	------	------	------

Na podstawie porównania dwóch pierwszych parametrów wnioskować można, że badana powierzchnia wykazuje największe rozwinięcie dla czasu τ_3 . Taka ocena wynika z faktu, że w tym pomiarze największe są obydwaj współczynniki objętości a spowodowane jest to tworzeniem się losowo rozłożonych, głębokich wgłębień o małym polu przekroju w wyniku oddziaływania wymuszeń zewnętrznych.

Najlepszymi cechami tribologicznymi, co przejawiało się największą wartością współczynnika S_{ci} i najmniejszą współczynnika S_{vi} , badana powierzchnia charakteryzowała się w punkcie B (dla czasu τ_2). Jest to czas właściwej eksploatacji, podczas którego następują najmniejsze zmiany w całym cyklu istnienia wytworu.

Obserwowana na tym tle zmiana parametru chropowatości S_a ma charakter zgodny z oczekiwaniami, tzn. w całym przedziale czasowym jego wartość rośnie.

5. PODSUMOWANIE

Występujące w warstwach powierzchniowych duże mikronierówności mogą być wynikiem przyjętej techniki obróbki lub zachodzącego procesu zużycia. Taki stan powierzchni niekoniecznie musi być dyskwalifikujący gdyż ubytki materiału lub zagłębienia mogą mieć oddziaływanie dychotomiczne. Z jednej strony, jako nieciągłość struktury stanowią one miejsca inicjacji pęknięć zmęczeniowych, z drugiej zaś – ich objętość może stanowić lokalny magazyn smaru poprawiający współpracę powierzchni.

Wyniki przeprowadzonych badań doświadczalnych świadczą, że stosując proponowaną metodę możliwe jest opisanie zmian jakie zaszły w strukturze geometrycznej badanych powierzchni podczas procesu zużycia, a więc przedstawić jej bieżący stan. Można tego dokonać także w przypadku gdy w strukturze geometrycznej ich powierzchni znajdują się duże zagłębienia lub występy. Przy tradycyjnych metodach oceny taka rozwinięta struktura powierzchni może powodować znaczne zniekształcenia oceny.

Można zatem przyjąć, że prezentowany sposób

oceny stanowić będzie pewne uzupełnienie metod diagnostycznych stanu elementów maszyn a więc i całych obiektów technicznych.

LITERATURA

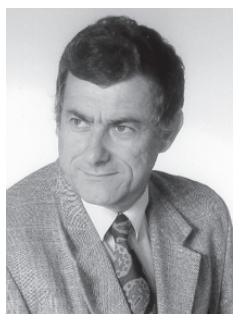
- [1] Klimczak T.: Zastosowanie profilometrii skaningowej do pomiaru objętości ubytków materiału spowodowanych zużyciem. Materiały III Międzynarodowego Sympozjum INSYCONT, Kraków 1990r., s. 433-442.
- [2] Musiał J.: Badania wpływu wybranych obciążeń zewnętrznych na zmiany geometrii powierzchni roboczych łożysk tocznych. Praca doktorska, Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz 2003r.
- [3] Musiał J., Styp-Rekowski M.: Surface Layer Transformation under External Extortions. International Journal of APPLIED MECHANICS AND ENGINEERING. Zielona Góra 2004, pp. 123-128.
- [4] Nyc R. : Możliwości zastosowania profilometrii skaningowej do interpretacji zużycia elementów maszyn. Problemy Eksploatacji nr 3/2000r, s.183-191.
- [5] Nyc R., Szudrowicz M.: Zastosowanie profilometrii skaningowej do analizy śladów zużycia kulek z aparatu czterokulowego. Materiały XXIII Jesiennej Szkoły Tribologicznej, Zielona Góra 1999r., s. 171-176.
- [6] Oczó E. K., Liubimov V.: Struktura geometryczna powierzchni. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003r.
- [7] Styp-Rekowski M.: Znaczenie cech konstrukcyjnych dla trwałości skośnych łożysk kulkowych. Wydawnictwo Uczelniane ATR, seria Rozprawy, nr 103, Bydgoszcz 2001r.
- [8] Żółtowski B.: Podstawy diagnostyki maszyn. Wydawnictwo Uczelniane ATR, Bydgoszcz 1996r.



Prof. dr hab. inż. Volodymyr LIUBIMOV – od 1996 roku profesor w Katedrze Techniki Wytwarzania i Automatykacji Politechniki Rzeszowskiej. Uprzednio pracował w Politechnice Kijowskiej. Zajmuje się problematyką techniki obróbki ubytkowej, ze szczególnym uwzględnieniem metrologii warstwy wierzchniej materiałów kształtowanych różnymi metodami, w tym podczas skrawania z dużą prędkością, i obróbki powierzchni optycznych. Autor ponad 200 artykułów i 4 książek z zakresu obróbki skrawaniem oraz kształtowania warstwy wierzchniej. Członek Międzysekcyjnego Zespołu Inżynierii Powierzchni Komitetu Budowy Maszyn Polskiej Akademii Nauk.



Dr inż. Janusz MUSIAŁ – od 2004 roku adiunkt na Wydziale Mechanicznym Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy. W pracy naukowej zajmuje się badaniem warstwy wierzchniej ze szczególnym uwzględnieniem struktury geometrycznej powierzchni elementów obiektów technicznych oraz transformacją technologiczną i eksploatacyjną warstwy wierzchniej. Głównym obiektem tych badań są pary kinematyczne z tarciami tocznym. W 2003 roku obronił pracę doktorską dotyczącą powyższego zakresu. Jest autorem bądź współautorem ponad 25 opracowań opublikowanych w czasopiśmie naukowych oraz materiałach konferencyjnych.



Dr hab. inż. Michał STYP-REKOWSKI ukończył studia na Wydziale Budowy Maszyn PG. Od 1972 roku jest pracownikiem Wydziału Mechanicznego Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy. Aktualnie zatrudniony jest na stanowisku profesora nadzwyczajnego ATR jako kierownik Zakładu Obrabiarek i Robotów. Zajmuje się badaniem stanu obiektów technicznych oraz procesami zużycia tribologicznego maszyn i ich elementów, szczególnie zaś obrabiarek. W swoim dorobku ma ponad 100 publikacji z tego zakresu, zamieszczonych w źródłach krajowych i zagranicznych oraz 4 monografie a także szereg opracowań konstrukcyjnych wdrożonych w praktyce przemysłowej. Członek m.in. Polskiego Towarzystwa Tribologicznego Środowiskowego Zespołu Sekcji Podstaw Eksploatacji KBM PAN.