

# CHARAKTERYSTYKI TRIBOLOGICZNE BIOMATERIAŁÓW

JAN R. DĄBROWSKI, EUGENIUSZ SAJEWICZ  
KATEDRA MATERIAŁOZNAWSTWA  
POLITECHNIKI BIAŁOSTOCKIEJ

## Streszczenie

*W pracy przedstawione zostały refleksje Autorów dotyczące struktury i funkcji systemów biotribologicznych człowieka: stawowego oraz stomatognatycznego (zębowego). Wskazano przy tym na znaczenie charakterystyk tribologicznych materiałów na implanty biomechaniczne i wypełnienia stomatologiczne. Zamieszczone w pracy wyniki badań wskazują na złożoność oceny właściwości tribologicznych omawianych biomateriałów.*

**Słowa kluczowe:** systemy biotribologiczne, biomateriały, tarcie, zużycie

## Wprowadzenie

W systemach tribologicznych wykonywane są złożone funkcje, związane głównie z realizacją ukierunkowanego ruchu, przenoszeniem mocy, formowaniem materiałów. Dotyczy to zarówno technicznych układów tribologicznych, jak też biosystemów człowieka, szczególnie stawów i narządu zębowego [1,2]. Biomateriałom stosowanym do zabiegów naprawczych, w obrębie tych biosystemów, stawia się szereg wymogów [3], w tym również w odniesieniu do charakterystyk tribologicznych. Odpowiednie właściwości tribologiczne biomateriałów (poprawnie, układów kinematycznych zbudowanych z tych materiałów), stanowiły w dużej mierze o przełomie w endoprotezoplastyce stawu biodrowego człowieka - co skutkowało w szerokim wprowadzeniu do praktyki klinicznej tzw. "low friction arthroplasty" [4]. Jednakże nadal brak jest ustalonych kryteriów oceny jakości tribologicznej biomateriałów, zarówno na implanty biomechaniczne (przenoszące wysokie obciążenia dynamiczne), jak też na wypełnienia stomatologiczne. Dla rzetelnej oceny kryterialnej charakterystyk tribologicznych biomateriałów, niezbędna jest analiza działania odnośnych systemów biotribologicznych. Dopiero na podstawie wyników takiej analizy można formułować kryteria oraz związane z tym uwarunkowania metodyczne oceny jakości tribologicznej biomateriałów.

Celem niniejszej pracy jest omówienie aspektów tribologicznych oceny biomateriałów na sztuczne stawy i wypełnienia stomatologiczne. Omówienia dokonano w oparciu o analizę systemową tarcia stawów i narządu zębowego oraz badania własne w tym zakresie.

## Systemy biotribologiczne

Wobec złożoności strukturalnej i funkcjonalnej systemów biotribologicznych człowieka (stawy, narząd zębowy), ich opisy teoretyczne należy traktować jako modele interpretacyjne [5, 6]. Wymusza to z kolei planowanie eksperymentów tribologicznych na podstawie modelu tzw. "czarnej skrzynki" - podobieństwa funkcjonalnego obiektu i modelu [7]. W odróżnieniu jednakże od obiektów technicznych, występują poważne trudności budowy takich modeli, głównie ze względu na nie do końca poznane związki przyczyn

# TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF BIOMATERIALS

JAN R. DĄBROWSKI, EUGENIUSZ SAJEWICZ  
KATEDRA MATERIAŁOZNAWSTWA  
POLITECHNIKI BIAŁOSTOCKIEJ

## Abstract

*The paper presents the authors' discussion concerning the structure and function of human biotribological systems: joint and dental. Additionally, the authors pointed out the significance of biotribological characteristics of materials for biomechanical implants and dental fillings. The results of tests show complexity of estimating the tribological properties of the discussed biomaterials.*

**Key words:** biotribological systems, biomaterials, friction, wear

## Introduction

Tribological systems comprise complex functions, mainly concerned with the implementation of directed motion, relocation of power and material forming. The above concerns both technological tribological systems and human biosystems, especially joints and dental system [1, 2]. Biomaterials used for reparations have to meet a number of requirements [3], also in reference to tribological properties. The right tribological properties of biomaterials (more accurately, kinematic systems constructed of these materials), largely contributed to the dramatic advance in endoprostheses of human hip joint - which resulted in the common application of 'low friction arthroplasty' in clinical treatment [4]. However, it is still essential to set the criteria of tribological quality assessment of biomaterials, both for biomechanical implants (which are subject to immense dynamic pressure) and for dental fillings. For the accurate criterion assessment of tribological properties of biomaterials, it is crucial to analyse the performance of the relevant biotribological systems. Only on the basis of the results of such an analysis one can set the criteria and the methodological implications of tribological quality assessment of biomaterials.

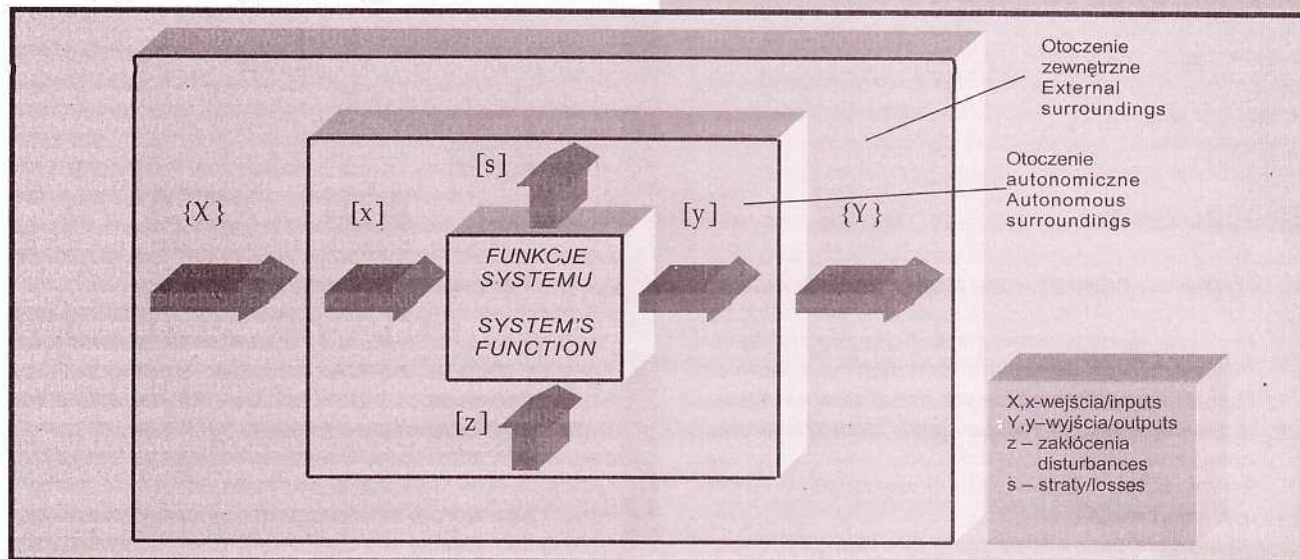
The aim of the present paper is to discuss the tribological aspects of biomaterial assessment for artificial joints and dental fillings. The discussion is based on the system analysis of joint friction and dental system and the authors' own research in this field.

## Biotribological systems

Due to the structural and functional complexity of human biotribological systems (joints, dental system) their theoretical descriptions ought to be treated as interpretational models [5, 6]. This, in turn, makes it necessary to plan tribological experiments on the basis of 'black box' model - functional similarity between the object and the model [7]. Contrary to technological objects, however, there exist serious difficulties in constructing such models, mainly due to the insufficient knowledge of cause-and-effect relation in the so called 'autonomous' surroundings of a biokinematic system. The autonomous surroundings is characteristic to

nowo-skutkowe, w tzw. "autonomicznym" otoczeniu danej układu biokinematycznego. Otoczenie autonomiczne jest charakterystyczne dla zjawiska homeostazy (sprzężenia zwrotnego), otwartego względem napływającej informacji i zamkniętego dla energii i materii [8].

the phenomenon of homeostasis (feedback), open for the oncoming information and closed for the energy and matter [8].



RYS. 1. Ogólny model funkcjonalny systemu biotribologicznego.  
FIG. 1. The general functional model of the biotribological system.

Na RYS. 1 przedstawiona została graficzna prezentacja systemowego opisu układów biokinematycznych człowieka, z zaznaczeniem, obok klasycznego otoczenia zewnętrznego, również otoczenia o charakterze autonomicznym, wraz ze sprzężeniem zwrotnym parametrów charakterystycznych dla funkcji wejścia - wyjścia. Jest to propozycja modelu funkcjonalnego systemu, typu "czarna skrzynka" [5, 7]. Rozważania szczegółowe dotyczące struktury i funkcji przedstawionego modelu, wykraczają poza ramy tej pracy. Elementy tych rozważań zostały przedstawione we wcześniejszych publikacjach Autorów [6, 9]. W tym miejscu należy wszakże zwrócić uwagę na niektóre odrębności pomiędzy omawianymi biosystemami i technicznymi systemami tribologicznymi. Przede wszystkim chodzi o nieporównywalnie wysoki poziom samoorganizacji procesów w systemach biotribologicznych, w tym o znaczenie zjawiska homeostazy. Dla przykładu, znamieną jest rola chondrocytów jako ośrodków regulacji wymiany materii i energii w obrębie chrząstki stawowej [10]. Ogólnie znana jest reakcja stawów w chorobie zwyrodnieniowej, w kierunku powiększenia powierzchni stawowych, a tym samym obniżenia nacisków jednostkowych [10]. Reakcją na zbyt wysokie obciążenia mechaniczne w zdrowym stawie może być też przebudowa morfologiczna powierzchni stawowych [10,11]. Może się to przejawiać w tworzeniu kulistych wydzielin na powierzchniach stawowych (prawdopodobnie o charakterze lipidowym), korzystnie wpływających na charakterystyki tribologiczne w takich połączeniach biokinematycznych. Znać są reakcje składników morfologicznych zębów na działanie bodźców zewnętrznych, charakterystyczne dla zjawiska homeostazy. Można tu wymienić procesy reparacji, czyli odkładania się zębiny trzeciorzędowej przy nadmiernym ścieraniu zębów [9]. Złożoność oraz odrębności systemów biotribologicznych w porównaniu z technicznymi, nie ułatwiają planowania eksperymentów badawczych. Badania biotribologiczne i wnioskowanie nie mogą być więc całkowicie oparte na teorii i metodologii opracowanej dla technicznych systemów tribologicznych. Wydaje się przy tym, że lepsze poznanie cech strukturalnych i funkcjonalnych, szczególnie w obrębie otoczenia autonomicznego badanych układów biotribologicznych, może korzystnie wpłynąć

FIG. 1 presents the graphic representation of systematic description of human biokinematic systems, and, besides the classic external surroundings, also the autonomous surroundings along with the feedback of parameters characteristic for the input-output function. This is the suggestion of the functional model of the system, of 'black box' type [5, 7]. The detailed discussion concerning the structure and the function of the presented model surpass the scope of the present paper. Some elements of that discussion were presented in the authors' earlier publications [6, 9]. Still, some discrepancies between the discussed biosystems and the technological tribosystems ought to be pointed out. First of all, one ought to note the high level of process self-organisation within biotribological systems, eg. the significance of homeostasis. For example, the role of chondrocytes as the centre of matter and energy exchange within the joint cartilage [10]. The reaction of joints resulting in extending joint area, and thus reducing the mechanical loads of individual pressures [10]. Excessive mechanical pressures in the healthy joint may result in morphological reconstruction of the joint surface [10,11]. This may be manifested by the form of spherical excretions on the joint surface (probably of lipid type), which positively affect the tribological properties in such biokinematic systems. It is known how morphological components in teeth are affected by the external stimuli. These reactions are typical of the phenomenon of homeostasis, one of the being the reparation process - basically: accumulating the tertiary dentine, which happens at excessive abrasive action affecting teeth [9]. The complexity and distinction of biotribological systems in comparison with the technological ones, does not make the scheduling of tests any easier. Thus, tribological research and inference cannot be fully based on the theory and methodology worked out for the technologically-oriented tribological systems. At the same time, it seems, better understanding of structural and functional properties, especially within the autonomous surroundings in the analysed biotribological systems, may affect positively the scientific quality and the practical relevance of the conducted tests.

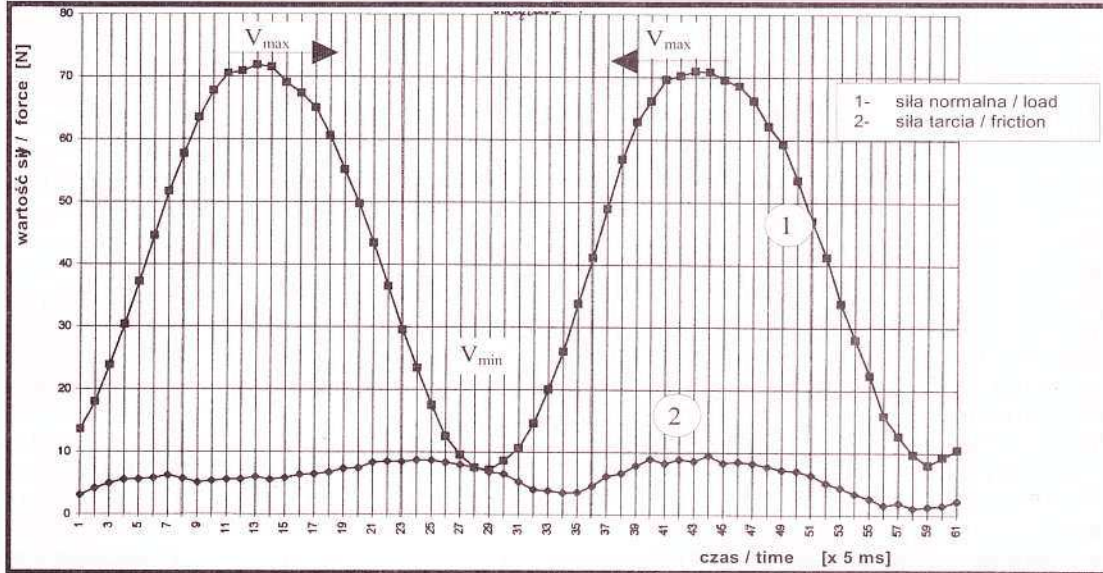
## Badania własne

Wykonano badania modelowe tarcia w odniesieniu do stawu biodrowego człowieka oraz układu zębowego. W pierwszej grupie eksperymentów oceniano charakterystyki tribologiczne następujących układów materiałowych: chrząstka/polietylen wysokomolekularny (PE) oraz chrząstka /stop implantacyjny Co-Cr-Mo. Ponadto, oceniano charakterystyki tribologiczne dla pary tarciowej : wypełnienie stomatologiczne (Valux)/szkliwo zęba.

The authors carried out model tests on friction in reference to human hip joint and dental system. In the first group of experiments, the tribological characteristics of the following components were estimated: cartilage/highly molecular polyethylene (PE) and cartilage/ implant alloy Co-Cr-Mo. Additionally, the tribological characteristics were assessed for the abrasive couple: dental filling (Valux)/ dental enamel.

The tests were conducted with a tribometer described in the previous paper [12]. The friction pair is pin-on -disc.

Biological samples (joint cartilage, enamel) were fixed



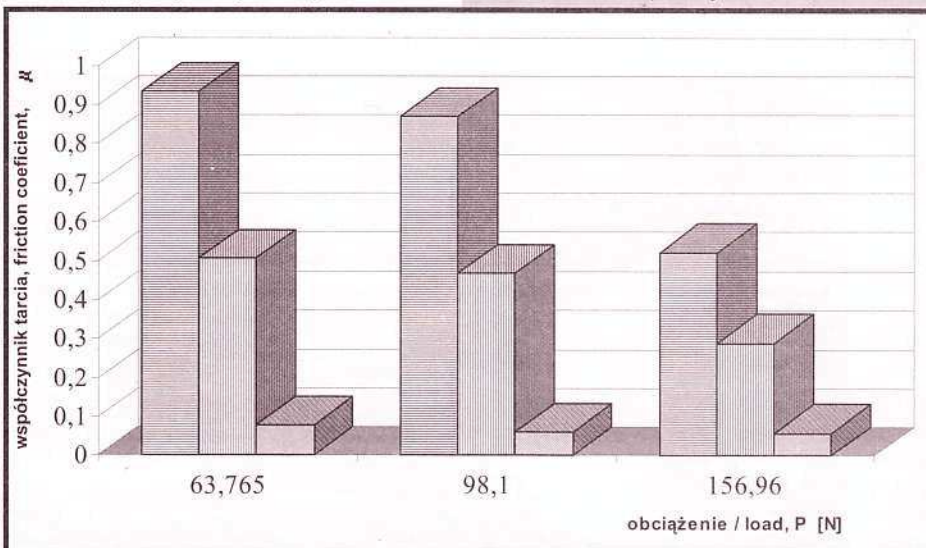
RYS. 2. Zmiany siły normalnej i siły tarcia w układzie chrząstka/PE.

FIG.2. The changes in load and friction force in joint cartilage/ PE system.

Badania prowadzono za pomocą tribometru, opisanego szczegółowo w pracy [12]. Układ tarciowy stanowiła para trzpień/tarcza. Preparaty biologiczne (chrząstka stawowa, szkliwo zębów) mocowano specjalnym klejem do powierzchni trzpienia ( $\varnothing$  4mm).

with a special glue to the surface of the cup ( $\varnothing$  4mm). Tribological tests were conducted in the conditions of alternating standard load on the cup (0 ... 200 N) at the oscillating motion of disk (100 cycles/min, the abrasive passage 4 mm).

Testy tribologiczne prowadzono w warunkach przemiennych obciążeń normalnych trzpienia (0...200 N), przy ruchu oscylacyjnym tarczy (100 cykli/min, droga tarcia 4mm). Badania tarcia chrząstek i materiałów implantacyjnych prowadzone były w obecności 1% roztworu wodnego karboksymetylocelulozy, natomiast wypełnienia ze szkliwem - przy smarowaniu



RYS. 3. Zmienność współczynnika tarcia w układzie chrząstka/PE.

FIG. 3. Changeability of friction coefficients in joint cartilage/ PE system.

wodnym roztworem buforowym (pH = 6,5). Prowadzono również obserwacje mikroskopowe powierzchni tarcia.

The tests on the abrasive action of cartilage and the implant materials were conducted in the presence of 1% water solution of carboxymethylcellulose, while the fillings and enamel at lubricating with the water buffer solution (pH = 6.5). In addition to the above, the abraded surface of friction was examined using a microscope.

FIG. 2 shows an example part of computer records indicating the changes of standard load and the friction force for the cartilage/ PE system. The system's working cycles reach the maximum values of standard forces at the highest

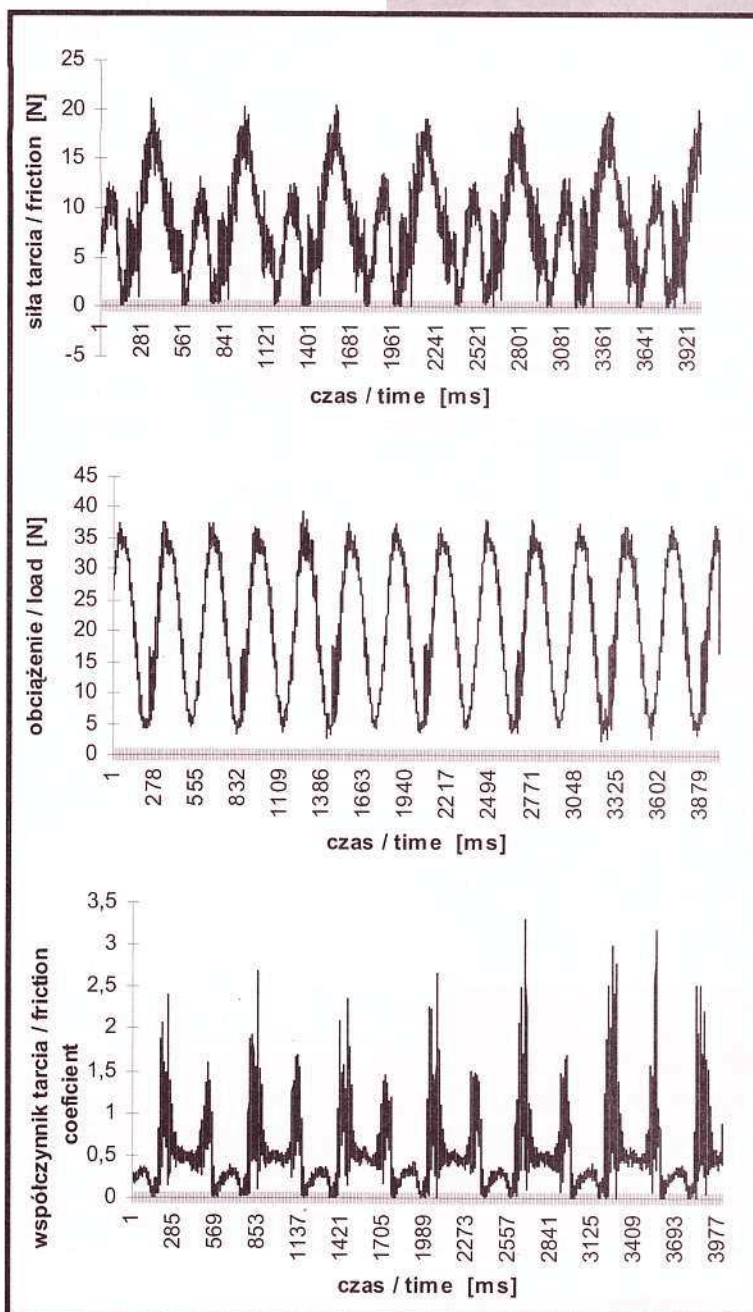
Na RYS. 2 przedstawiona została część zapisu komputerowego zmian obciążenia normalnego i siły tarcia dla układu

du chrząstka/PE. Cykle pracy układu charakteryzują się zmiennością kierunków ruchu oraz maksymalnymi wartościami sił normalnych przy największych prędkościach ruchu.

Zamieszczone na RYS. 2 dane świadczą o braku znaczących zmienności siły tarcia przy wyraźnie zmiennych obciążeniach próbki i zmianie kierunku ruchu ( $v \sim 0$ ). Oszacowane współczynniki tarcia dla maksymalnych, średnich i minimalnych obciążeń normalnych, przedstawione są na RYS. 3. Widoczne są tu znaczące różnice wartości współczynników tarcia w zakresie poszczególnych poziomów obciążeń (maksymalnych).

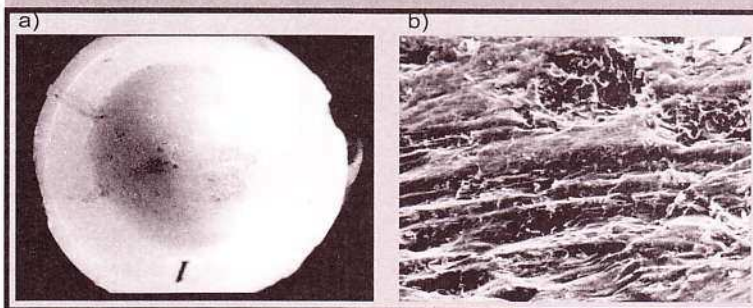
Podobny charakter zmienności wartości współczynników tarcia zaobserwowano dla pozostałych badanych układów materiałowych, również pary tarciowej: wypełnienie stomatologiczne (Valux)/szkliwo zęba. Wyniki tych ostatnich badań przedstawione zostały na RYS. 4.

Podobnie jak w przypadku badań materiałów implantacyjnych, również tutaj wyraźnie widoczna jest zmienność obciążenia i współczynników tarcia, które osiągają wartości maksymalne przy najniższym poziomie obciążeń. W odróżnieniu od wyników poprzednich badań, również tu wyraźnie zaakcentowana jest zmienność siły tarcia. Należy podkreślić, że warunki pracy węzłów biokinematycznych silnie zależą od interakcji w otoczeniu autonomicznym. W dużej mierze związane jest to z procesami chorobowymi, cechami osobniczymi, reakcją na oddziaływania zewnętrzne. Przykładem tego mogą być wyniki badań powierzchni dna panewek polietylenowych po realloplastyce endoprotez typu Weller'a [13].



RYS. 4. Zmiany obciążenia i siły tarcia w układzie tribologicznym: Valux / szkliwo zęba.

FIG. 4. The changes in load and friction force in the tribological system: Valux/ enamel.



RYS.5. Zdjęcia powierzchni tarcia panewki polietylenowej: a) widok dna panewki, b) struktura ziarniny (SEM, 200x).

FIG.5. Friction surface of PE-cup : a) cup bottom, b) structure of granular tissue (SEM, 200x).

speed of motion and feature changeable directions of motion.

The data in FIG. 2 indicate the lack of significant changes in the friction force at apparently changeable load in the sample and changed direction of motion ( $v \sim 0$ ). The estimated friction coefficients for maximum, medium and minimum standard load are shown in FIG. 3. One can notice considerable differences of the values of friction coefficients within the respective levels of (maximum) load. A similar type of coefficient value changeability was observed in the other analysed material systems, e.g. the abrasive couple: dental filling (Valux)/enamel. The results of the latter tests are shown in FIG. 4

As in the case of tests on implant materials, the load and friction coefficient changeability is apparent - they reach maximum values at the minimum level of load. Contrary to the results of the former tests, the changeability of friction force is clearly accentuated here.

It ought to be stressed that the operating conditions of biokinematic pairs largely depend on the interactions in autonomous surroundings. It is mainly associated with the course of a disease, personal features, reactions to the external stimuli. An example of the above can be the results of tests on the bottom of the polyethylene bearing after the realloarthoplasty of Weller's endoprostheses [13].

Microscopic observations and histological tests indicate numerous deposits of granular tissue on the bottom of some bearings. FIG. 5 shows photographs of such a surface with visible granular tissue. These deposits create a sort

of 'border layer' on the contact surface, which strongly affects the conditions of friction.

W obserwacjach mikroskopowych i badaniach histologicznych, stwierdzono liczne złogi ziarniny na powierzchniach dna niektórych panewek. Zdjęcia takiej powierzchni, z widoczną ziarniną, przedstawione są na RYS. 5. Złogi te tworzą swoistą "warstwę graniczną" na powierzchniach kontaktowych - silnie oddziałujących na warunki tarcia.

## Podsumowanie

Przenoszenie osiągnięć metodologii badań tribologicznych w systemach technicznych do układów biologicznych, musi być poprzedzone analizą odrębności tych systemów, szczególnie w odniesieniu do ich cech strukturalnych i funkcjonalnych. Obok wyboru podstawowych dla takiej analizy parametrów, głównie w odniesieniu do kinematyki ruchu i dynamiki obciążeń, należałoby również uwzględnić zjawiska i skutki oddziaływań w otoczeniu autonomicznym danego układu biotribologicznego. Trzeba tu jednak podkreślić, że ten ostatni postulat - aczkolwiek ważny z punktu widzenia poziomu naukowego wnioskowania - z uwagi na złożoność i niewielki stopień rozpoznania interakcji w otoczeniu autonomicznym układów tarcia stawów i zębów, jest trudny do spełnienia.

W tym kontekście, wyniki badań własnych wskazują na wątpliwe znaczenie naukowe i użytkowe wielu charakterystyk tribologicznych materiałów implantacyjnych i wypełnień stomatologicznych - najczęściej w oparciu o wielkość zużycia i wartości współczynników tarcia - otrzymanych w warunkach obciążeń statycznych i prostej kinematyce ruchu (ruch jednostajny, prostoliniowy). Wydaje się więc, że zdecydowanie korzystniejsze dla oceny jakości wymienionych biomateriałów, byłoby badanie ich charakterystyk tribologicznych w warunkach obciążeń dynamicznych i złożonej kinematyce ruchu - zbliżonych do rzeczywistych warunków tarcia. Należałoby również ustalić inne, ważne z punktu widzenia poziomu merytorycznego wnioskowania czynniki, związane z cechami charakterystycznymi danego układu biotribologicznego, takie jak: rodzaj smaru, geometria próbek, przygotowanie powierzchni trących, wymiana ciepła z otoczeniem, drgania i inne.

Trudnym do rozwiązania problemem, podobnie zresztą jak i w tribotechnice, jest wybór właściwych metod i narzędzi badawczych. Większość znanych symulatorów tarcia stawów i układu zębowego, w stopniu niewystarczającym odwzorowują kinematykę ruchu i dynamikę obciążeń w rzeczywistych układach biotribologicznych. Wydaje się więc, że niezbędna jest tu unifikacja metod i narzędzi badawczych.

## Podziękowania

Autorzy składają podziękowania Pani doc.dr hab.med.Wandzie Stokowskiej i Panu doc.dr hab.med.Januszowi Popko z Akademii Medycznej oraz Panu dr med. Zbigniewowi Mazurkiewiczowi z Wojewódzkiego Szpitala Zespolonego im. Z.Śniadeckiego w Białymstoku za pomoc w pozyskaniu preparatów biologicznych do badań.

## Piśmiennictwo

- [1] Downson J.at al.: Thin films in tribology. Tribology Series, 25. Els. Sc. Publ.Co., Amsterdam-London-New York-Tokyo 1993.
- [2] Dumbleton J.H.: Tribology of natural and artificial joints. Tribology Series, 4. Els.Sc.Publ.Co., Amsterdam-Oxford-New York 1981.
- [3] Ungethuen M.: Technologische und biomechanische Aspekte der Hueft- und Kniealloarthoplastik. Verlag Haus Huber, Bern-Stuttgart-Wien 1978.
- [4] Charnley J.: Low friction arthroplasty of the hip. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg-New York 1979.

## Conclusion

The transfer of tribological research methodology in technological to biological systems, should be preceded by the analysis of such systems' distinctiveness, especially in reference to their functional and structural properties. Apart from the choice of basic parameters for such an analysis, mainly concerning the kinematics of motion and dynamics of load, also the phenomena and effects of its performance in the autonomous surroundings of a biotribological system. It should be emphasized, however, that it is difficult to meet the latter condition - considering its complexity and insufficient knowledge of interactions in the autonomous surroundings of friction systems of joints and teeth, although it is important from the point of view of scientific inference.

Taking that into account, the results of the authors' own tests indicate that there is little scientific and practical merit of numerous tribological characteristics of implant materials and dental fillings - which are as a rule based on the extent of wear and the values of friction coefficient obtained in the conditions of static load and simple kinematics of motion (uniform and straight-line motion). Thus, it seems that tests on the tribological characteristics in conditions of dynamic load and complex kinematics of motion - close to the actual conditions of friction, would be far more useful. It should also be establish other factors, important for the inference, associated with the characteristic features of a biotribological system e.g. the type of lubricant, the shape of samples, preparation of abrasive surface, heat exchange with the surroundings, vibrations etc.

As in tribotechnology, the choice of the right research methods and devices is another problem to be solved. Most simulators of friction in joint and dental system now in use, are not able to imitate the kinematics of motion and dynamics of load to a satisfactory degree in the actual biotribological systems. It seems necessary then to unify the research methods and devices.

## References

- [5] Leszek W.: Metodologiczne podstawy badań trybologicznych. PWN, Warszawa-Poznań 1981.
- [6] Dąbrowski J.R., Sajewicz E.: Wybrane zagadnienia metodyczne badań biotribologicznych. Tribologia, 5, (1995), 593-600.
- [7] Marczak R.: Smarowanie w warunkach specyficznych wymuszeń. Materiały XV Jesiennej Szkoły Tribologicznej, Kołobrzeg, 1992, cz.1., 45-62.
- [8] Bertalanffy L.: Ogólna teoria systemów. PWN, Warszawa 1984
- [9] Sajewicz E.: Tribologiczne aspekty działania układu stomatognatycznego człowieka. Zeszyty Naukowe PŁ, Seria Mechanika, 85 ( 996), 133-140.
- [10] Małydyk E., Wagner T.: Patomorfologia stawów. PZWL, Warszawa 1991.
- [11] Popko J., Dąbrowski J., Dudarew A., Sajewicz A., Iwaszkiewicz B.: Badania tribologiczne stawu biodrowego po założeniu endoprotezy połowicznej w obserwacjach eksperymentalnych. Chir.Narz.Ruchu Ortop.Pol., LXI Supl.3A, (1996), 127-131
- [12] Sajewicz E., Dudarew A., Dąbrowski J.R., Popko J.: Urządzenie do badań biotribologicznych, Materiały IV Seminarium Naukowego: "Mechanika w medycynie", Rzeszów, 1998, 241-244.
- [13] Dąbrowski J.R., Mazurkiewicz Z., Szostakowski T.: Artificial human joints -imperfect bearings. Biocybernetics and Biomed.Eng., 16, (1996), 117-125.