

Czesław KOZIARSKI\*, Tomasz TRZASKACZ\*,  
Zbigniew FERENC\*\*

## WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE ZWYRODNIANYCH STAWÓW SYNOWIALNYCH

### TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF DEGENERATE SYNOVIAL JOINTS

#### Słowa kluczowe:

tribologia, stawy synowialne, zwyrodnienie

#### Key-words:

tribology, synovial joints, degenerative

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań, które mają na celu określenie wpływu stopnia zdegenerowania chrząstki stawowej człowieka na jej właściwości tribologiczne. Badania te przeprowadzono na drodze doświadczalnej, z wykorzystaniem modeli fizycznych. W badaniach próbka i przeciwpróbka wykonują ruch ślizgowo-toczny, co odpowiada możliwie wiernie ru-

---

\* Politechnika Wroclawska Wydział Mechaniczny, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Zakład PKMiT, 50-371 Wrocław, ul. I. Łukasiewicza 7/9; tel.: 71 320 27 73.

\*\* Politechnika Wroclawska Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, Zakład UŚ, Wybrzeże S. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław.

chowi wzajemnemu powierzchni ciernych w stawie. Wyniki z tych badań posłużyły do oceny wpływu zmian zwyrodnieniowych na zjawiska tribologiczne w chrząstce stawowej. Dostępny materiał badawczy klasyfikowano pod względem uszkodzeń powierzchni chrząstki stawowej. Pozwoliło to na porównanie kolejnych stadiów degeneracji chrząstki i odniesienie ich do zmian parametrów tribologicznych w postaci momentu tarcia i współczynnika tarcia jak i naprężeń stycznych na badanych powierzchniach.

## **WPROWADZENIE**

W ludzkim organizmie chrząstka stawowa jest jednym z tych elementów, które są najbardziej narażone na zmiany przeciążeniowo-zwyrodnieniowe. Mają na nią wpływ takie czynniki, jak urazy komunikacyjne, siedzący tryb życia czy zaburzenia w przemianie materii.

## **ANATOMICZNA BUDOWA STAWU KOLANOWEGO**

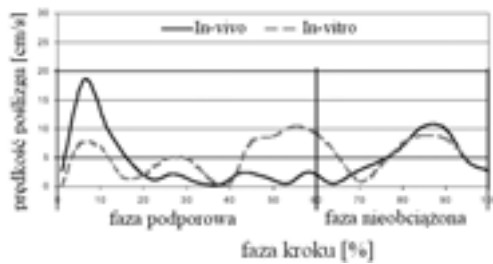
Staw kolanowy jest największym stawem synowialnym w organizmie człowieka. Podstawową jego funkcją z punktu widzenia mechaniki, podobnie jak każdego ze stawów, jest umożliwienie ruchu łączonych kości. Smarowanie w stawach, jak też w innych ruchomych węzłach ma za zadanie zmniejszenie tarcia, a co za tym idzie zużycia współpracujących powierzchni, pokrytych chrząstką stawową. W normalnych warunkach smarowania staw w zasadzie nie ulega zużyciu mechanicznemu, a powierzchnie stawowe oddzielone są od siebie cienką warstwą filmu smarującego. Pod wpływem zmian chorobowych pierwotny mechanizm smarowania ulega zmianie, przez co grubość filmu smarującego zmniejsza się, a w skrajnych przypadkach zanika.

## **BADANIA NA MODELACH STAWÓW SYNOWIALNYCH**

Jedną z dróg, jaką prowadzone są badania tribologiczne stawów jest opracowywanie modeli stawów synowialnych. W takim przypadku konieczna jest znajomość anatomicznego ukształtowania odwzorowywanego węzła ciernego, jakim jest staw synowialny. Istotna jest również wiedza o takich wielkościach fizycznych charakterystycznych dla danego stawu, jak: wartości nacisków, prędkości poślizgów czy charakter ruchu.

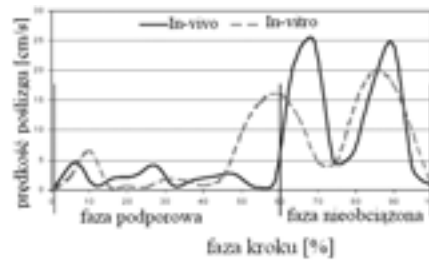
Wartość prędkości poślizgu zależna jest od fazy zgięcia kolana, prędkości kroku i geometrii kłykci stawu kolanowego. Dla obydwu kłyk-

ci stawu kolanowego: przygodkowego i bocznego, wartości prędkości poślizgu w tej samej chwili są różne (**Rys. 1 i 2**) [**L. 4**].



**Rys. 1.** Prędkość poślizgu powierzchni stawowych na kłykcii przyśrodkowym w trakcie jednego kroku [**L. 4**]

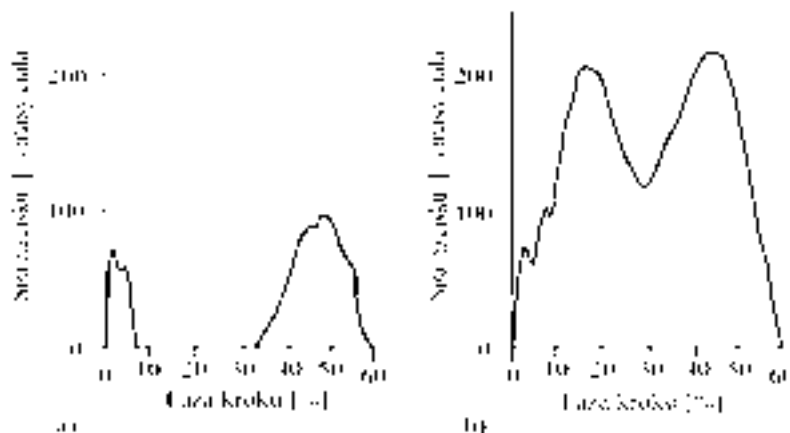
Fig. 1. Slip velocity at the articular surface femoral condyle in one step [**L. 4**]



**Rys. 2.** Prędkość poślizgu powierzchni stawowych na kłykcii bocznym w trakcie jednego kroku [**L. 4**]

Fig. 2. Slip velocity at the articular surface femoral condyle in one step [**L. 4**]

W znacznym stopniu zmieniają się również wartości sił obciążających działających w danej chwili na współpracujące powierzchnie stawowe. Podobnie jak w przypadku prędkości poślizgu tak i tu wartości sił obciążających na kłykciach przyśrodkowym i bocznym w tej samej chwili nie są sobie równe. Wartości tych sił zależą w głównej mierze od masy ciała oraz prędkości kroku, która decyduje o wielkości sił dynamicznych (**Rys. 3**).



**Rys. 3.** Teoretyczny przebieg sił nacisku na powierzchniach panewki stawu kolanowego dla [**L. 3**]: a) części bocznej, b) części przyśrodkowej

Fig. 3. The theoretical pressure forces on the surfaces of the knee to the acetabulum [**L. 3**]: a) part of the side, b) parts of the medial

Do przeprowadzenia badań na opracowanym modelu stawu zostało zbudowane stanowisko badawcze realizujące podstawowe obciążenia i ruchy stawu kolanowego [L. 1]. Jest ono kompromisem pomiędzy tribometrami a symulatorami stawów i umożliwia badanie oporów ruchu na próbkach biologicznych. Badania na tym stanowisku obejmują pomiary momentu tarcia przy ustalonym kierunku budowy tkanki dla różnych stopni zmian zwyrodnieniowych. W trakcie badań próbka i przeciwpróbka wykonują ruch ślizgowo-toczny, co odpowiada możliwie wiernie ruchowi wzajemnemu powierzchni ciernych w stawie.

W niniejszej pracy przedstawiono przygotowanie i klasyfikację próbek przed przystąpieniem do pomiarów momentów tarcia i obliczenia współczynnika tarcia. Dostępny materiał badawczy klasyfikowano pod względem uszkodzeń powierzchni chrząstki stawowej i wieku dawcy. Pozwoliło to na porównanie kolejnych stadiów degeneracji chrząstki oraz odniesienie ich do zmian parametrów tribologicznych, tj. momentu tarcia, współczynnika tarcia jak też naprężeń stycznych na badanych powierzchniach. Pracę zrealizowano na następujących etapach:

- usystematyzowanie i ocena uszkodzeń chrząstki przy zmianach zwyrodnieniowych według skali Outerbridge'a [L. 2];
- przeprowadzenie na próbkach biologicznych badań modelowych – wpływ zmian chrząstki stawowej na współczynnik tarcia.

## MATERIAŁ BADAWCZY

Badanym materiałem była chrząstka, którą pozyskano z preparatów sekcyjnych oraz z zabiegów alloplastyki stawu biodrowego (Rys. 4). Użyty materiał wraz z oznaczeniami par próbek przedstawiony został w Tabeli 1. W trakcie badań konieczne było przebadanie próbek pochodzących ze stawów zdrowych i zdegenerowanych. Przy wyborze miejsca pobrania kierowano się zatem takimi aspektami, jak ułożenie włókien kolagenowych, grubość chrząstki, promień krzywizny (Rys. 5).

**Tabela 1. Zestawienie materiału użytego do badań**

Table 1. Material used for testing

oznaczenie par próbek	rodzaj materiału	wiek	Płeć
M45	kłyckie kości udowej	45	M
M52	kłyckie kości udowej	52	M
P-1	głowa kości udowej	31	M
P-2	głowa kości udowej	62	M
P-3	głowa kości udowej	58	M
P-4	głowa kości udowej	65	K
P-5	głowa kości udowej	63	M

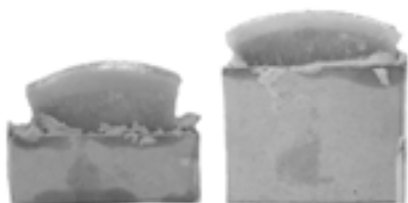
**Rys. 4. Przygotowane do badań próbki kostne**

Fig. 4. Prepared samples for testing bone

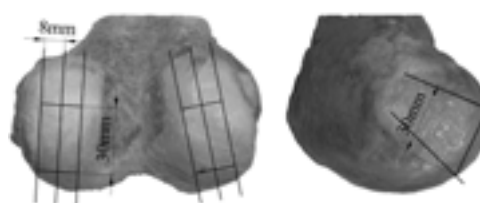
**Rys. 5. Widok kłycki kości udowej wraz z zaznaczonym miejscem wycięcia próbek**

Fig. 5. View of the femoral condyle along with the selected place to cut samples

## KLASYFIKACJA MATERIAŁU BADAWCZEGO

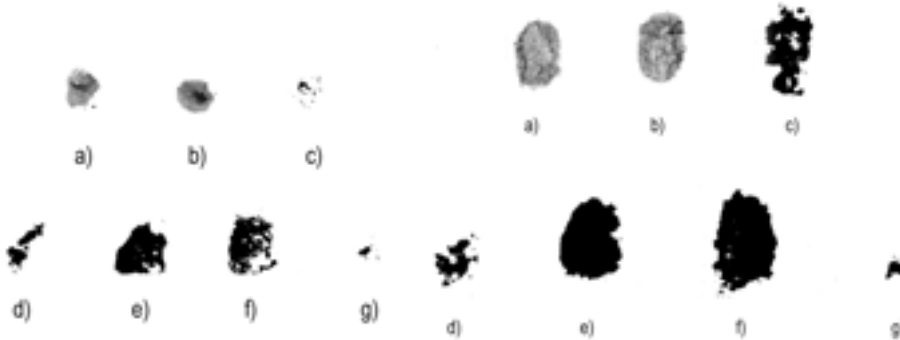
W celu określenia stopnia zmian zwyrodnieniowych i uszeregowania pobranych próbek w zależności od stopnia zdegenerowania, przyjęto następujące kryteria, wynikające z właściwości mechanicznych:

- wyniki obserwacji makroskopowej i mikroskopowej powierzchni,
- chropowatość powierzchni, wielkość i kształt pola styku.

## STANOWISKO I PRZEBIEG POMIARU

Pomiar wielkości i kształtu pola styku przeprowadzano po wycięciu próbek kostnych wraz z chrząstką stawową (sposób przygotowania próbki został opisany w [L. 1]). Siły nacisku, którymi obciążano powierzchnię stawową, zawierały się w przedziale 0÷105 N i miały identyczne wartości jak siły obciążające, zastosowane następnie podczas pomiarów momentu tarcia.

W wyniku przeprowadzonych doświadczeń uzyskano odciski pola styku powstającego przy obciążaniu próbek przyjętymi siłami nacisku. Przykładowe odciski przedstawiono na **Rys. 6 i 7**. Można na nich zaobserwować, że wraz ze wzrostem siły obciążającej zmienia się nie tylko wielkość, ale i kształt pola styku.



**Rys. 6.** Odciski pól styku dla siły obciążającej  $F_N = 0$  N, gdzie: a) próbka M-45; b) próbka M-52; c) próbka P-1; d) próbka P-2; e) próbka P-3; f) próbka P-4, g) próbka P-5

Fig. 6. Literal fields of contact force loading  $F_N = 0$  N, where: a) sample M-45, b) sample M-52, c) sample P-1, d) sample P-2, e), the sample P-3, f) sample P-4, g) sample P-5

**Rys. 7.** Odciski pól styku dla siły obciążającej  $F_N = 78$  N, gdzie: a) próbka M-45; b) próbka M-52; c) próbka P-1; d) próbka P-2; e) próbka P-3; f) próbka P-4, g) próbka P-5

Fig. 7. Literal fields of contact force loading  $F_N = 78$  N, where: a) sample M-45, b) sample M-52, c) sample P-1, d) sample P-2, e), the sample P-3, f) sample P-4, g) sample P-5

Wyznaczenie wielkości pola styku  $S$  pozwoliło na obliczenie średniego nacisku  $p$ , jaki wywierają na siebie współpracujące powierzchnie próbek. Uzyskane wyniki z powyższych badań zebrano w **Tabeli 2 i 3**, a przykładowe przedstawiono na **Rys. 8–11**. Ze względu na ograniczenia przyjętej metody pomiaru wielkości pola powierzchni, wynikającego głównie z jej dokładności [**L. 1**], otrzymane wyniki posłużyć mogą jedynie do oceny jakościowej, a nie ilościowej uszkodzeń.

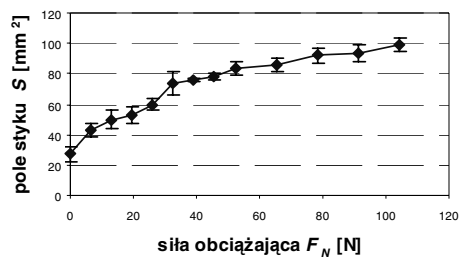
**Tabela 2. Uzyskane wielkości pola styku dla poszczególnych sił obciążających**  
 Table 2. Obtained values of field size for the individual loading forces

siła nacisku $F_N$ [N]	pole styku $S$ [mm <sup>2</sup> ]						
	M-45	M-52	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5
0	27	29	23	17	61	59	2
20	53	54	60	13	99	108	4
52	81	83	65	25	105	126	5
78	92	90	81	26	104	132	5
105	96	98	89	26	111	137	7

**Tabela 3. Uzyskane wartości średniego nacisku w polu styku dla poszczególnych sił obciążających**

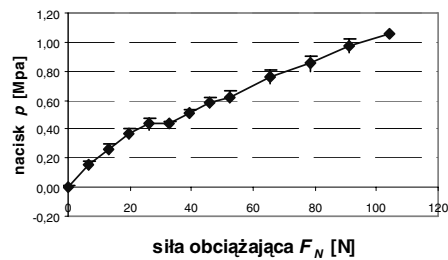
Table 3. Obtained values of the average contact pressure for the individual loading forces

siła nacisku $F_N$ [N]	nacisk $P$ [MPa]						
	M-45	M-52	P-1	P-2	P-3	P-4	P-5
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,0
20	0,38	0,37	0,25	1,45	0,15	0,14	4,1
52	0,64	0,63	0,60	2,10	0,37	0,31	7,3
78	0,85	0,87	0,73	3,04	0,57	0,44	11,7
105	1,09	1,07	0,89	3,98	0,71	0,57	11,9



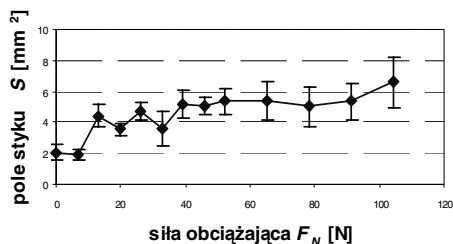
**Rys. 8. Średnia wielkość pola styku  $S$  w funkcji siły obciążającej  $F_N$  dla próbki M-45**

Fig. 8. Average field size  $S$  as a function of the contact loading force  $F_N$  of the sample M-45



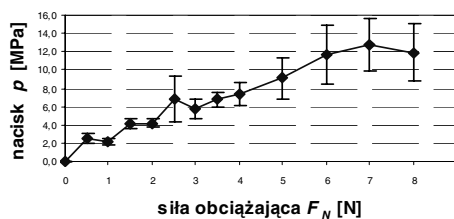
**Rys. 9. Średnia wartość nacisku  $p$  w polu styku w funkcji siły obciążającej  $F_N$  dla próbki M-45**

Fig. 9. The average value of contact pressure  $p$  as a function of field strength for sample loading  $F_N$  M-45



Rys. 10. Średnia wielkość pola styku  $S$  w funkcji siły obciążającej  $F_N$  dla próbki P-5

Fig. 10. Average field size  $S$  as a function of the contact loading force  $F_N$  of the sample P-5



Rys. 11. Średnia wartość nacisku  $p$  w polu styku w funkcji siły obciążającej  $F_N$  dla próbki P-5

Fig. 11. The average value of contact pressure  $p$  as a function of field strength for sample loading  $F_N$  P-5

## PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów stwierdzono, że:

- Wielkość i kształt pól styku dla próbek z chrząstką zdegenerowaną znacznie odbiega od rezultatów uzyskanych dla chrząstek zdrowych. W przypadku próbek P-1, P-2 i P-5 przez cały cykl obciążania uzyskiwano nieregularne kształty pola styku, a przy mniejszych wartościach siły obciążającej uzyskiwano odcisk składający się z kilku oddzielnych fragmentów. Widoczne są tam również obszary wewnątrz pola styku, na których jednak nie dochodzi do kontaktu powierzchni.
- Dla próbki P-1 uzyskano zbliżone wielkości pola styku dla poszczególnych sił obciążających do tych uzyskanych dla próbek ze zdrową chrząstką stawową. W podobny sposób narastała też wielkość pola styku. Dla próbek M-45 i M-52 było to spowodowane prawdopodobnie znaczną grubością chrząstki oraz jej niezmienną sztywnością. W przypadku próbki P-1 za liniowy przyrost wielkości pola styku odpowiedzialny może być nieregularny kształt pola styku, początkowo złożony z kilku osobnych fragmentów. Stąd, pomimo utraty sztywności chrząstki stawowej, wielkość pola styku nie zbliża się asymptotycznie do ustalonej wartości (w zakresie zastosowanych sił obciążających) tak jak ma to miejsce dla pozostałych próbek zdegenerowanych.
- W przypadku próbki P-2 uzyskano o około 75% mniejszą wielkość pola styku niż dla próbek pochodzących z chrząstek zdrowych lub dla



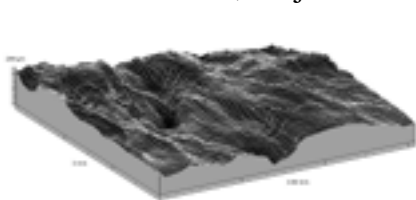
próbki P-1. Jednocześnie średnia wartość nacisku w polu styku była w przybliżeniu trzykrotnie większa niż dla wspomnianych wcześniej próbek, co spowodowane było niewielką grubością chrząstki. Spostrzeżenie to potwierdza fakt, iż w całym cyklu obciążania przyrost wielkości pola styku, w stosunku do jego wartości początkowej, jest niewielki w porównaniu z rezultatami uzyskanymi dla próbek M-45 i M-52. Pole styku było znacznie mniejsze niż dla próbek odniesienia – nieznaczny przyrost pola styku podczas obciążania oraz znaczna średnia wartość nacisku dowodzą istnienia cienkiej warstwy odkształcalnej (chrząstki) na twardej powierzchni (kość korowa). Podobne zjawisko zaobserwowano na powierzchni próbki P-5, która całkowicie pozbawiona była chrząstki. W tym przypadku uzyskano czternastokrotnie mniejsze pole styku niż dla próbek wzorcowych, jedenastokrotnie większą wartość średniego nacisku oraz niewielki przyrost pola styku, którego kształt był nieregularny i składał się z kilku fragmentów.

- W przypadku próbek P-3 i P-4 nieregularne kształty pola styku przy mniejszych wartościach przybierały kształty zbliżone do obserwowanych dla chrząstek zdrowych. Wielkość pól styku jest jednak większa niż w przypadku chrząstek zdrowych. W tym przypadku odnotowano spadek wartości średniego nacisku, który był mniejszy o około 35%. Charakterystyczny dla tych próbek jest również przyrost wielkości pola styku. W odróżnieniu od próbek wzorcowych M-45 i M-52, gdzie przyrost ten był niemalże liniowy, tutaj obserwujemy jego bardzo szybkie zwiększanie się na początku cyklu obciążania. W późniejszej fazie, dla sił obciążających większych od około 30 N, przyrost wielkości pola styku jest nieznaczny. Ponieważ grubość chrząstek zmierzona na przekroju próbek nie uległa znacznym zmianom w stosunku do próbek odniesienia i wynosiła  $1,5 \div 2$  mm wysnuto wniosek, że straciła ona znacznie na swojej sztywności. Potwierdza to fakt, iż przy niezminionej szerokości próbki (8 mm) uzyskano pole styku o szerokości około 10 mm. Stąd też po początkowo szybkim wzroście pola styku (przy niewielkich wartościach siły obciążającej, gdzie obciążenie przenoszone było przez podatną chrząstkę) nastąpił etap bardzo powolnego wzrostu wielkości pola styku, gdy obciążenie przenoszone było przez kość znajdującą się pod chrząstką. Zjawisko to objawiło się wyraźniej na próbce P-4.

Pomiary struktury geometrycznej powierzchni przeprowadzono na profilografometrze FORM TALYSURF – 120L. Rejestrowano parametry: średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości  $S_a$  [ $\mu\text{m}$ ], średnie kwadratowe odchylenie chropowatości  $S_q$  [ $\mu\text{m}$ ], gęstość wierzchołków nierówności powierzchni  $S_{ds}$  [ilość/mm], wskaźnik tekstury powierzchni  $S_{tr}$  (przyjmuje wartości z przedziału 0÷1), wskaźnik zatrzymania cieczy przez wgłębienia  $S_{vi}$  [%].

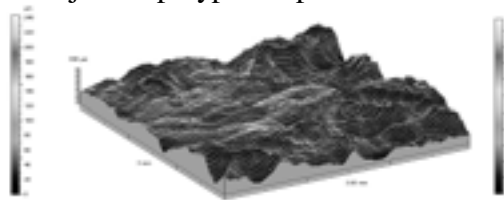
Na obrazie przestrzennym powierzchni próbki M-45 (**Rys. 12**) zaobserwowano kilka wgłębień (głębokość 138  $\mu\text{m}$ ) o łagodnych brzegach. Wgłębienia mają postać rowków ułożonych w jednym kierunku, co świadczy o anizotropowym charakterze powierzchni.

Na obrazie przestrzennym powierzchni próbki P-5 (**Rys. 13**) zaobserwowano kilka ostrych, pojedynczych wzniesień (wysokość 127  $\mu\text{m}$ ), powierzchnia ma łagodniejszy charakter od powierzchni próbki M-45. Zdecydowanie wyższa (niemalże dwukrotnie) jest średnia ilość wzniesień na milimetrze kwadratowym, istnieje również charakterystyczne ułożenie kierunku nierówności, tak jak miało to miejsce w przypadku próbki M-45.



**Rys. 12. Powierzchni próbki M-45**

Fig. 12. Sample surface M-45



**Rys. 13. Powierzchnia próbki P-5**

Fig. 13. Sample surface P-5

Na podstawie pomiarów struktury geometrycznej powierzchni możemy wysnuć następujące wnioski:

- Na każdej ze zmierzonych próbek stwierdzono inny charakter struktury geometrycznej powierzchni. Zaobserwowano zarówno powierzchnie z rozległymi wgłębieniami o łagodnych zboczach (próbka P-3), powierzchnie z głębokimi ubytkami z bardzo stromymi zboczami wgłębień (próbka P-2), jak i powierzchnie z chaotycznie rozmieszczonymi uszkodzeniami bez określonego charakteru i kierunku.
- Wspólną cechą wszystkich próbek z chrząstkami zdegenerowanymi jest duża różnica pomiędzy największym wgłębieniem a najwyższym szczytem. Powierzchnie chrząstek zdegenerowanych wyróżniają się również znaczną anizotropią nierówności.

- Sam pomiar struktury nie pozwala określić stopnia uszkodzenia chrząstki stawowej, konieczne jest odniesienie uzyskanych wyników z konkretnego pomiaru do pozostałych badań. Przykładem potwierdzającym to stwierdzenie są wyniki dla powierzchni próbki P-5. Pod względem wartości zmierzonych parametrów powierzchnia ta uzyskała średnie wartości spośród próbek ze zdegenerowaną chrząstką. Sytuację zmienia jednak wniosek wyciągnięty z obserwacji makroskopowej, że próbka ta jest w całości pozbawiona chrząstki.

## LITERATURA

1. Trzaskacz T.: Wpływ zmian zwyrodnieniowych stawów synowialnych na ich właściwości tribologiczne. Rozprawa doktorska. Politechnika Wrocławska, Instytut Konstrukcji i Eksploatacji Maszyn, Wrocław 2006.
2. Czyrny Z.: Badanie obrazowe w diagnostyce chrząstki stawowej. Acta Clinica, tom 1, nr 1, marzec 2001.
3. Hurwitz D., Sumner D., Andriacchi P., Sugar D.: Dynamic knee loads during gait predicts proximal tibial bone distribution. Journal of biomechanics Vol. 31/1998, 423–430.
4. Johnson T., Adriacchi T., Laurent M.: Develot of a knee wear test method based on prosthetic in vivo slip velocity profiles. 46th Anual Meeting, Orthopaedic Research Society, 12–15.05.2000 Orlando, Florida.
5. Owellen M.C.: Biotribology: The effect of lubricant and load on articular cartilage wear and friction. Mechanical Engineering, Virginia Politechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, Juli 1997.

**Recenzent:**  
**Magdalena NIEMCZEWSKA-WÓJCIK**

## Summary

**Joint cartilage in the human body is one of those elements that is most vulnerable to overload and degenerative changes. These changes are influenced by factors such as traffic accidents, lack of physical activates or metabolic disturbances.**

**In the paper, the results of a research aiming at the determination of the degeneration rate of the cartilage of a human joint on its**

tribological properties were presented. This experimental research was carried out using physical models.

To carry out this research, a test stand modelling a fundamental scheme of loading and motion for the knee joint had been constructed. The research carried out with this stand included the measurement of the friction moment for different rates of degeneration changes (textural orientation of the cartilage included). The specimen and counter specimen used in the testing are in sliding/rolling contact, which reflects, to a maximum degree possible, the relative motion of frictional surfaces in a joint. The results of this research were used for the evaluation of the influence of degenerative changes on tribological changes in the joint cartilage.