

Joanna MYSTKOWSKA  
Jan R. DĄBROWSKI

## CHARAKTERYSTYKI TRIBOLOGICZNE UKŁADU KINEMATYCZNEGO ZĄB – MATERIAŁ KOMPOZYTOWY NA STAŁE WYPEŁNIENIA STOMATOLOGICZNE

### TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE KINEMATICS COUPLE: TOOTH – COMPOSITE MATERIAL FOR PERMANENT DENTAL FILLINGS

*W pracy przedstawiono charakterystyki tribologiczne układu kinematycznego ząb – materiał kompozytowy na stałe wypełnienia stomatologiczne. Badaniom poddano własne kompozyty zawierające źródła fluoru, nanokrzemionkę oraz modyfikator tarcia w postaci proszku polietylenu. Badania przeprowadzono przy użyciu specjalnie skonstruowanego testera tarcia zębów typu pin-on-disc w środowisku roztworu o pH śliny. Oceniano wpływ całkowitego obciążenia na współczynnik tarcia zaprojektowanych materiałów kompozytowych oraz zużycie liniowe badanych kompozytów i zużycie objętościowe tkanek zęba. Przeprowadzono obserwacje mikroskopowe struktury materiałów kompozytowych po badaniach tarciovych.*

**Słowa kluczowe:** tarcie, zużycie, zęby, kompozyty stomatologiczne.

*The paper presents a tribological characteristics of the kinematics couple: tooth - composite material for permanent dental fillings. Two original composites containing fluorine sources, nanosilica and a friction modifier in the form of polyethylene powder were investigated. The wear tests were carried out in a special solution of saliva pH using a special pin-on-disc tribotester. The impact of total load on the friction coefficient of designed composite materials and linear wear of both the analyzed materials and volume wear of the tooth samples were evaluated. The composites' friction surface including wear particles was examined by SEM.*

**Keywords:** friction, wear, teeth, dental composites.

#### 1. Wprowadzenie

Zużycie materiałów stomatologicznych jest jedną z głównych wad niemalże każdego rodzaju wypełnienia [7, 8]. Prowadzi się liczne badania w kierunku otrzymania nowych, o lepszych właściwościach tribologicznych materiałów stomatologicznych [6]. Z uwagi na szeroką możliwość modyfikacji składu chemicznego, największe nadzieje związane z otrzymaniem takiego materiału pokładane są w kompozytowych materiałach na stałe wypełnienia stomatologiczne [2, 11]. Podczas projektowania nowych kompozytów stomatologicznych bierze się pod uwagę uzyskanie kompozytów o niskim współczynniku tarcia i małym zużyciu, a jednocześnie wykazujących minimalny wpływ na zużycie przeciwnych tkanek zęba. W celu obniżenia zużycia i współczynnika tarcia materiałów stomatologicznych, intensywnie modyfikuje się skład stosowanych napełniaczy [5, 13]. Znaczna poprawa w tym kierunku może być uzyskana wskutek zastosowania odpowiedniego napełniacza, zwanego modyfikatorem tarcia. Najnowsze doniesienia literaturowe wskazują

#### 1. Introduction

The wear of dental materials is one of the major defects involving almost every type of dental filling [7, 8]. In recent years, considerable efforts have been made to develop innovative dental fillings possessing superior tribological characteristics [6]. The best way to develop such materials is to use composites because of wide possibility of chemical composition modification [2, 11]. Thus, intensive research is being carried out to find such composite materials for dental fillings that would guarantee both little friction and wear of composite materials in contact with counter sample and simultaneously the minimal influence on wear of antagonistic teeth. To reduce the friction and wear coefficients of dental materials, the composition of applied fillers is greatly modified [5, 13]. A marked improvement of the tribological properties of a material can be obtained by using an appropriate filler, called friction modifier. The latest literature data point to a significant influence of nanoparticles on the structure and properties of composite mate-

także na istotny wpływ nanocząstek na strukturę i właściwości użytkowe kompozytu. W porównaniu do powszechnie stosowanych makro- i mikrocząstek, nanocząstki cechują się równomiernym rozproszeniem w żywicy w skali nano. Dzięki temu nanokompozyty charakteryzuje większa twardość i odporność na zużycie [4]. W przypadku kompozytów stomatologicznych wykorzystywanym nanoproszkciem jest głównie silanizowana nanokrzemionka. Stosowana obok powszechnie używanych napelnaczy proszkowych wpływa na obniżenie współczynnika tarcia i zużycie materiału [14]. Ocenę charakterystyk tribologicznych materiałów stomatologicznych przeprowadza się na specjalnie skonstruowanych symulatorach tarcia [1, 3] przy zastosowaniu różnych materiałów przeciwpróbki [12, 16].

Celem niniejszej pracy było porównanie właściwości tribologicznych dwóch własnych materiałów kompozytowych na stałe wypełnienia stomatologiczne z uwzględnieniem ich wpływu na zużycie tkanek zęba.

## 2. Materiały i metody badań

W niniejszej pracy przetestowano pod względem tribologicznym dwa kompozyty ceramiczno-polimerowe. Każdy z kompozytów składał się z osnowy organicznej, którą stanowiła mieszanina żywicy Bis-GMA (bisphenol A polyethylene glycol diether dimethacrylate), TEGDMA (triethylene glycol dimethacrylate) i DEA-EMA (diethylaminoethyl methacrylate) oraz system fotoinicjatorów i stabilizatorów. Do osnowy organicznej wprowadzono napelnicze proszkowe w postaci źródeł fluoru (fluorowane szkło o symbolu J-20, fluorek iterbu  $\text{YbF}_3$  i fluorek strontu  $\text{SrF}_2$ ), nanokrzemionka ( $\text{n-SiO}_2$ ) oraz modyfikator tarcia – polietylen (PE). Napelnicze poddane były zabiegowi silanizacji w roztworze środka silanizującego. Zabieg polegał na nanoszeniu aktywnych grup silanowych na powierzchnię cząstek napelnicza w wyparce próżniowej. Głównym zadaniem tych grup jest łączenie nieorganicznego proszku z organiczną bazą polimerową.

Po procesie homogenizacji materiałów, kompozyty utwardzono w formach z PTFE - poli(tetrafluoroetyleny) w czasie 40 sekund. Badane materiały oznaczono symbolami KW1 i KW2, a ich skład przedstawiono w tab. 1.

Badania tarciove przeprowadzono na specjalnie skonstruowanym symulatorze tarcia zębów. Widok urządzenia z zaznaczonym węzłem tarcia przedstawia rys. 1a. Jest to pneumatycznie sterowany tester tribologiczny typu pin-on-disc. Urządzenie to wprowadza ruch postępowo-zwrotny i obciążenia cykliczne działające na badaną próbkę [10]. Zastosowano następujące parametry tarcia: obciążenie – 20 MPa; czas tarcia pojedynczej próby każdego kompozytu – 5 godz., częstotliwość ruchu próbki: 1.5 Hz, droga tarcia odniesiona do kompozytu: 2.5 mm. Dobór parametrów tarcia miała na celu odwzorowanie warunków tarcia panujących w jamie ustnej. Przebadano po 6 próbek każdego kompozytu.

Tab. 1. Skład materiałów kompozytowych

Tab. 1. Composition of the materials

Symbol materiału Materials' symbol	Zawartość składników, [%obj.] / Component content, [vol.%]					
	Osnowa organiczna Organic matrix	Szkło J-20 J-20 glass	$\text{YbF}_3$	$\text{SrF}_2$	$\text{n-SiO}_2$	PE
KW1	40	40	10	-	7	3
KW2	40	40	-	10	7	3

In contrast to commonly used macro- and microparticles, nanoparticles are characterized by uniform dispersion in resin at nano scale. As a result, nanocomposites show higher hardness and wear resistance [4]. In the case of dental composites, the preferred nanopowder is silanated nanosilica. Used along with common powder fillers, it significantly decreases the friction coefficient and material wear [14]. The evaluation of tribological characteristics of dental fillings on special friction simulators is provided [1, 3] using different counter sample's material [12, 16].

The aim of this study is to compare the tribological properties of two original composite materials for dental fillings composed of two different fluorine sources and analyze their impact on the wear of teeth enamel.

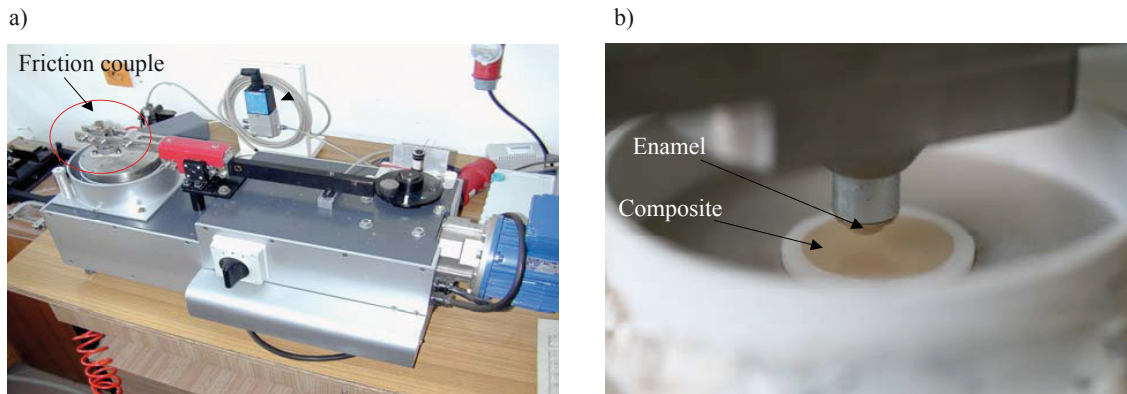
## 2. Materials and research methods

In this work two ceramic-polymer composites were tribologically tested. Each composite consisted of a polymer matrix in which the mixture of the following organic resins was used: Bis-GMA (bisphenol A polyethylene glycol diether dimethacrylate), TEGDMA (triethylene glycol dimethacrylate), DEA-EMA (diethylaminoethyl methacrylate) and a system of photoinitiators and stabilizers. Into organic matrix the powder fillers in form of fluorine sources (fluoridated glass with J-20 symbol, ytterbium fluoride  $\text{YbF}_3$  and strontium fluoride  $\text{SrF}_2$ ), nanosilica ( $\text{n-SiO}_2$ ) and friction modifier – polyethylene (PE). The other part of the composite was a mixture of inorganic powders: fluorine sources and friction modifiers. The surface of all inorganic fillers was treated with functional silane. The aim of the silanization process is to absorb active silane groups on powder surface at vacuum evaporator. After the silanisation process reactive silane is combined with inorganic filler and can co-polymerize with the polymer network.

All constituents were weighed into a porcelain mortar and precisely mixed until uniform polymer paste was obtained. The paste was placed into cylindrical PTFE - polytetrafluoroethylene molds and subjected to hardening for 40 seconds. The composition of the materials marked with symbols KW1 and KW2 is presented in tab. 1.

Tribological tests were conducted on special teeth wear simulator. The tribological tester picture with friction couple is presented in fig. 1a. It is a special pneumatic-controlled pin-on-disc tribological tester.

The device exerted progressive-returnable motion and cyclic loads on the material's surface [10]. The following process parameters were used: load – 20 MPa; friction time of each composite sample test – 5 hours, frequency of sample motion – 1.5 Hz, composite friction path – 2.5 mm. The parameters simulated natural oral cavity friction conditions. Six samples of each material were evaluated.



Rys. 1. Widok symulatora tarcia (a) i węzła tarcia (b)  
 Fig.1. Friction tester (a) and friction couple (b)

Węzeł tarcia, którego widok szczegółowy prezentuje rys. 1b, składał się z próbki i przeciwpróbki. Próbką w eksperymencie były wytworzone kompozyty ceramiczno-polimerowe, zaś przeciwpróbkę stanowiło szkliwo ludzkie osadzone w aluminiowej oprawie. Próbki szkliva wycinano z zębów trzonowych i przedtrzonowych, usuniętych ze względów ortodontycznych. Proces tarcia wykonano w środowisku roztworu o pH = 6.8, odpowiadającym pH śliny.

Badania tribologiczne pozwalają oszacować współczynnik tarcia i ocenić zużycie liniowe badanych materiałów oraz zużycie objętościowe tkanek zębów przeciwstawnych (szkliwa).

Zużycie kompozytów określano poprzez pomiar zużycia liniowego w miejscu śladu tarcia na podstawie pomiaru chropowatości powierzchni przy wykorzystaniu profilografometru Taylor Hobson. Zużycie badanych próbek szkliva obliczano, jako objętościowy ubytek materiału, odniesiony do drogi tarcia [9].

Po procesach tarcia powierzchnie próbek kompozytowych w miejscu śladu tarcia obserwowano za pomocą mikroskopu skaningowego Hitachi S 3000N.

### 3. Wyniki badań

W badaniach określano współczynniki tarcia kompozytowych materiałów z przeznaczeniem na stałe wypełnienia stomatologiczne oraz zużycie liniowe badanych materiałów i zużycie objętościowe twardych tkanek zębów (szkliwa).

#### 3.1. Współczynnik tarcia

Wartości współczynników tarcia własnych materiałów kompozytowych o symbolach KW1 i KW2 przedstawiono na rys. 2. Z wykresu widać, iż w początkowej fazie tarcia zachodzą procesy docierania współpracującego węzła tarcia. Współczynniki tarcia obu kompozytów maleją w czasie w ciągu pierwszych dwóch godzin tarcia, po czym stabilizują się i przez następne 3 godziny przyjmują wartości ok. 0.39 - 0.40. Nieco większe wartości współczynnika tarcia przyjmuje kompozyt z dodatkiem fluorku strontu (KW1).

#### 3.2. Zużycie kompozytów i szkliwa zębów

Obok współczynnika tarcia analizowano również wpływ tarcia na zużycie materiałów kompozytowych i przeciwstawnych tkanek zęba.

The friction couple, which is detailed in fig. 1b was composed of sample and counter sample. The tested samples were fabricated ceramic-polymer composites, and the counter sample - human enamel mounted in alumina form (fig.1b). The enamel samples were cut out from molar and premolar teeth, extracted for orthodontic reasons. The friction process was conducted in the presence of solution with pH=6.8 (pH of natural saliva).

The experimental investigations have made it possible to estimate friction coefficients, linear wear of materials and volume wear of inverse hard tooth tissues.

The composite wear was estimated by linear wear at wear track on the basis of surface roughness measured using Taylor Hobson profilographometric techniques. The wear of the examined enamel samples, such as the volume tissue wear related to friction track, was evaluated [9].

Following the friction process, composite sample surfaces at wear track were examined using scanning electron microscope Hitachi S 3000N.

### 3. Results

Friction coefficients of original composites for dental fillings and linear wear of investigated composites and volume wear of hard tooth tissues (enamel) were investigated.

#### 3.1. Friction coefficient

The measurements of friction coefficients of KW1 and KW2 composite materials are presented in fig. 2. As seen from the graph an initial friction phenomenon between the co-operating couple can be observed at the beginning of the process. The friction coefficients of both composites decreased during the first two hours, then they stabilized for the following 3 hours at the level of 0.39-0.40. It was also discovered that the friction coefficient of the composite strongly depended on its composition and was found to be higher in the material with an addition of strontium fluoride (KW1).

#### 3.2. Wear of composites and teeth enamel

Apart from the measurements of friction coefficients, the investigations included the analysis of the impact of friction on both the composite materials' wear and inverse tooth tissues.

Zużycie liniowe zaprojektowanych w niniejszej pracy materiałów kompozytowych wynosi w granicach 21  $\mu\text{m}$  dla kompozytu KW2 na bazie fluorku strontu i 24  $\mu\text{m}$  dla materiału KW1 z dodatkiem fluorku iterbu (rys. 3). Jest to relatywnie niska wartość zużycia i według danych literaturowych odpowiada wartości zużyciu handlowych materiałów kompozytowych [15].

Dokonano również pomiaru zużycia materiału przeciwpórkki, którą stanowiło ludzkie szkliwo. Objętościowe zużycie szkliwa wynosiło ok. 0,48  $\text{mm}^3$  w przypadku tarcia w układzie z kompozytem KW2 i ok. 0,54  $\text{mm}^3$  w przypadku tarcia w układzie z kompozytem KW1 na bazie fluorku iterbu. Odpowiednie wyniki prezentowane są na rys. 4.

Uzyskane wyniki badań wskazują, że właściwości tribologiczne materiałów kompozytowych zależą w dużym stopniu od składu chemicznego. Istotny jest więc odpowiedni dobór napełniaczy proszkowych, zarówno źródeł fluoru i modyfikatorów tarcia.

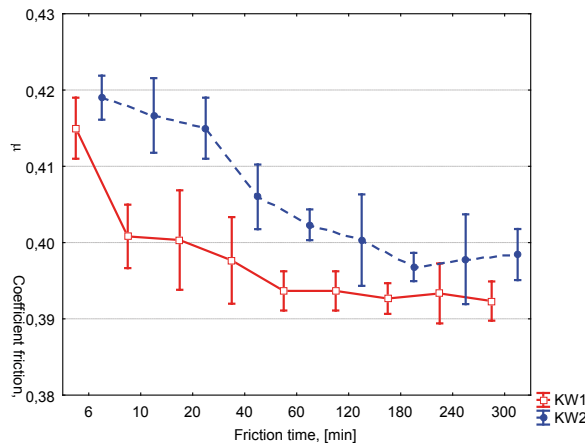
Po testach tribologicznych wykonano obserwacje mikroskopowe śladów tarcia na powierzchni obu badanych materiałów. Na rys. 5 przedstawiono różnice w powierzchniowej strukturze kompozytów po procesach tarcia. W obu materiałach widać mikropęknięcia w ich strukturze. W przypadku materiału KW2 wyraźnie widoczne są pęknięcia w obszarze warstw wierzchnich, prawdopodobnie o charakterze zmęczeniowym. Ze zdjęć widać wyraźne różnice strukturalne pomiędzy materiałami. Obserwuje się dodatkowo występowanie wolnych cząstek napełniaczy o różnych rozmiarach.

The linear wear of the analyzed composite materials is close to 21  $\mu\text{m}$  for KW2 composite with addition of strontium fluoride and 24  $\mu\text{m}$  for KW1 composite with addition of ytterbium fluoride (fig. 3). A relatively low wear of the authors' original composite materials was observed. It was similar to the wear of commercially available dental fillings [15].

One of the most important parameters associated with the wear properties of dental composites is the rate of wear of the enamel of the antagonistic teeth. In the investigations the volume loss of the enamel was evaluated after the wear tests against the composites. The results of these investigations are shown in fig. 4. The KW2 composite with strontium fluoride showed a lower rate of wear of enamel counter-samples (about 0,48  $\text{mm}^3$ ) than KW1 composite (about 0,54  $\text{mm}^3$ ) filled with ytterbium fluoride addition.

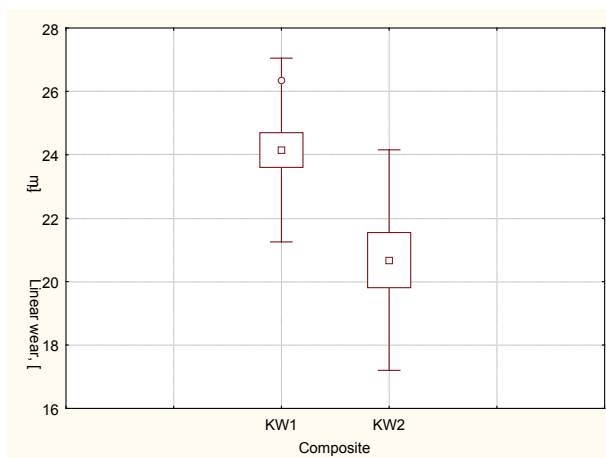
The investigation results show that the tribological characteristics of the composite materials produced by the authors are dependent, to a high degree, on the chemical composition of the samples. Hence an appropriate choice of powder fillers in form of fluorine sources and friction modifiers is very important.

Following the friction tests, microscopic observations of the composite surfaces, at wear tracks, were made. Some differences between the surface structures of the tested materials are presented in fig. 5. In both materials some microcracks in their structure are observed. In the case of KW2 composite, considerable microcracks in the material structure, showing fatigue characteristics, are observed. Fig. 5 also illustrates significant structural differences between KW1 and KW2. Additionally, on the materials' surface, some free filler particles of different dimensions were observed.



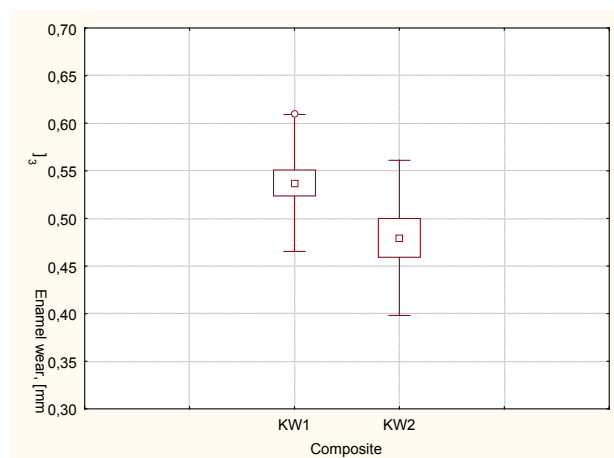
Rys. 2. Przebieg współczynników tarcia kompozytów KW1 i KW2 podczas procesu tarcia

Fig.2. Friction coefficients of the tested materials



Rys. 3. Zużycie liniowe kompozytów podczas tarcia

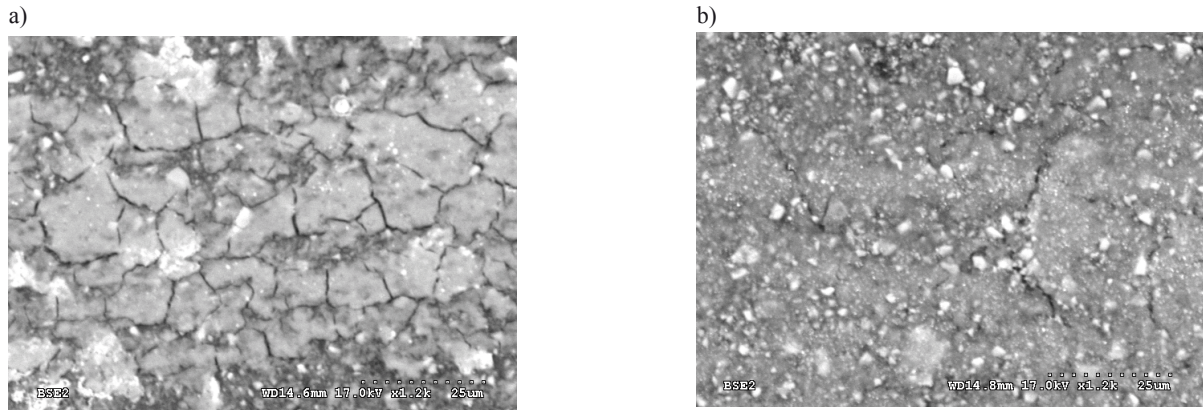
Fig. 3. Linear wear of the composites



Rys. 4. Zużycie objętościowe szkliwa podczas tarcia

Fig.4. Volume wear of the enamel counter samples





Rys. 5. Ślad tarcia kompozytów po tarcii: a) KW1, b) KW2  
 Fig. 5. Wear tracks of composites: a) KW1, b) KW2

#### 4. Dyskusja

Z dokonanego przeglądu literatury wynika, że rozwój badań nad materiałami stomatologicznymi wskazuje wyraźną tendencję do stosowania materiałów kompozytowych. Wynika to głównie z korzystnych właściwości mechanicznych i estetycznych tego typu wypełnień oraz szerokiej możliwości kształtowania ich struktury i właściwości biofunkcjonalnych. W poszukiwaniu nowych, lepszych materiałów kompozytowych na stałe wypełnienia stomatologiczne szczególną uwagę zwraca się m.in. na poprawę charakterystyk tribologicznych. Próby opracowania optymalnego składu chemicznego składają do poszukiwania nowych lepszych substytutów żywicy Bis-GMA oraz napelniaczy, głównie modyfikatorów tarcia. Ważnym z punktu widzenia komfortu pacjenta i satysfakcji lekarza jest stosowanie wypełnień o korzystnych charakterystykach tribologicznych. Chodzi w szczególności o zwiększenie odporności na zużycie wypełnień, a jednocześnie obniżenie zużycia zębów przeciwstawnych (kontaktowych). Problematyka ta została podjęta w niniejszej pracy - zwłaszcza w kontekście kształtowania charakterystyk tribologicznych badanych materiałów, jak również metodyki badań. Do badań tarciovych wykorzystano specjalnie skonstruowany symulator tarcia zębów. W badaniach tych oceniano współczynniki tarcia oraz zużycie materiałów i tkanek zębów przeciwstawnych.

W warunkach fizjologicznych wpływ na zużycie zębów i materiałów stomatologicznych ma duża liczba i złożoność czynników zewnętrznych (obciążenie, temperatura) i wewnętrznych (ślina, stan tkanek zęba).

W niniejszej pracy do badań tribologicznych zastosowano specjalnie skonstruowany symulator tarcia zębów, a badania przeprowadzono przy parametrach odpowiadających naturalnym warunkom jamy ustnej. Badaniom poddano dwa własne materiały kompozytowe na stałe wypełnienia stomatologiczne. Wyniki współczynnika tarcia, zużycia materiałów i szkliwa zębów wykazują nieznaczne różnice pomiędzy badanymi materiałami. Zaobserwowano, że dodatek fluorku strontu w niewielkim stopniu wpływa na podwyższenie współczynnika tarcia i jednocześnie obniża zużycie liniowe testowanego materiału i szkliwa materiału przeciwpróbki. Można więc sądzić, że kompozyty KW1 i KW2 po odpowiedniej modyfikacji składu chemicznego mogą być zaproponowane do stosowania na stałe wypełnienia stomatologiczne.

#### 4. Discussion

Studying the literature data on the subject one can observe a strong tendency to use composite materials for the new generation of dental fillings. This is due to good mechanical and aesthetic properties of the composites as well as enormous possibilities of shaping their structural and biofunctional properties. In this context particular attention is focused on the tribological characteristics, which are responsible for the durability of the dental fillings. Attempts at creating optimal chemical compositions of the materials involve looking for substitutes of Bis-GMA resin and fillers, mainly friction modifiers.

An essential factor, especially from the point of view of the patient's comfort and dentist's satisfaction is the use dental fillings characterized by good tribological properties, which are mainly connected with an increase of dental filling wear resistance and simultaneous decrease of inverse (contact) teeth wear. This problem was undertaken by the present authors, particularly in the context of shaping tribological characteristics of the analyzed materials and testing methods. Thus, special equipment applying reciprocating movement and cyclic loading to test the materials was devised. During the tests, friction coefficients and wear of materials and inverse teeth tissues were evaluated.

In the physiological conditions a number of internal and external factors such as saliva, teeth tissue conditions, load and temperature exert considerable impact on the tooth wear and dental fillings.

The testing method, in which the composite samples worked against the human enamel counter-specimen, simulated the masticatory pattern occurring in the mouth whilst eating. Two originally made composite materials for permanent dental fillings were tested. The results of friction coefficients, wear of materials and teeth enamel exhibit minor differences between tested materials. It was observed that the addition of strontium fluoride had little influence on the increase of the material's friction coefficient. However a decrease of linear wear of the tested material and enamel counter-sample was observed. Thus, it could be concluded that KW1 and KW2 composites, after an appropriate modification of their chemical composition, are potential materials for permanent dental fillings

## 5. Podsumowanie

W pracy określono charakterystyki tribologiczne układu kinematycznego zęb – materiał kompozytowy na bazie żywicy Bis-GMA i źródeł fluoru. Podczas badań zaobserwowano, że zużycie przez tarcie kompozytów ceramiczno-polimerowych przeznaczonych na stałe wypełnienia stomatologiczne zależy od rodzaju napelnacza proszkowego i jest niższe dla kompozytu z dodatkiem fluorku strontu. Kompozyt ten wpłynął także na niższy stopień zużycia szkliwa zęba. Z kolei niższe wartości współczynnika tarcia uzyskano dla kompozytu na bazie fluorku iterbu.

## 5. Summary

In this work tribological characteristics of the kinematics couple: tooth - composite material on the basis of Bis-GMA resin and fluorine sources were investigated. The results showed that the wear of ceramic-polymer composites intended for dental fillings clearly depends on the type of powder filler used and is lower for a composite with an addition of strontium fluoride. Also the enamel wear is found to be lower in a couple containing the same powder filler. However, the composite with an addition of ytterbium fluoride is characterized by a lower friction coefficient.

\*\*\*\*\*

*This work was supported by the Statutory Work of Department of Materials and Biomedical Engineering (Faculty of Mechanical Engineering, Białystok Technical University). The authors are grateful to the Institute of Glass, Ceramics, Refractory and Construction Materials (Warsaw) for working out and preparation of the J-20 glass for the research.*

\*\*\*\*\*

## 6. References

1. Adachi L K, Saiki M, de Campos T N. An in vitro investigation of human enamel wear by restorative dental materials. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry* 2001; 249(2): 465-468.
2. Antunes P V, Ramalho A. Study of abrasive resistance of composites for dental restoration by ball-cratering. *Wear* 2003; 255: 990-998.
3. Heintze S D, Cavalleri A, Forjanic M, Zellweger G, Rousson V. A comparison of three different methods for the quantification of the in vitro wear of dental materials. *Dental Materials* 2006; 22: 1051-1062.
4. Mandikos M N, McGivney G P, Davis E, Bush P J, Carter M. A comparison of the wear resistance and hardness of indirect composite resins. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 2001; 85(4): 386-395.
5. Mystkowska J, Dąbrowski J R. The influence of friction process on the structure of composite. *Engineering of Biomaterials* 2007; 69-72: 26-29.
6. Mystkowska J, Dąbrowski J R. The influence of selected powder fillers on the tribological properties of composite materials for dental fillings. *Solid State Phenomena* 2009; 144: 33-38.
7. Nagarajan V, Jahanmir S, Thompson V. In vitro contact wear of dental composites. *Dental Materials* 2004; 20: 63-71.
8. Oh W, DeLong R, Anusavice K J. Factors affecting enamel and ceramic wear: A literature review. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 2002; 87: 451-459.
9. Sajewicz E. On evaluation of wear resistance of tooth enamel and dental materials. *Wear* 2006; 260: 1256-1261.
10. Sajewicz E, Kulesza Z. A new tribometer for friction and wear studies of dental materials and hard tooth tissues. *Tribology International* 2007; 40: 885-895.
11. Shabaniyan M, Richards L C. In vitro wear rates of materials under different loads and varying pH. *The Journal of Prosthetic Dentistry* 2002; 87: 650-656.
12. Shortall A C, Hu X Q, Marquis P M. Potential countersample materials for in vitro simulation wear testing. *Dental Materials* 2002; 18: 246-254.
13. Siejka-Kulczyk J, Mystkowska J, Lewandowska M, Dąbrowski J R, Kurzydłowski K J. The influence of nano-silica on the wear resistance of ceramic-polymer composites intended for dental fillings. *Solid State Phenomena* 2009; 151: 135-138.
14. Wetzel B, Hauptert F, Friedrich K, Zhang M Q, Rong M Z. Impact and wear resistance of polymer nanocomposites at low filler content. *Polymer Engineering and Science* 2002; 9: 1919-1927.
15. Yap A U J, Teoh S H, Chew C L. Effects of cyclic loading on occlusal contact area wear of composite restoratives. *Dental Materials* 2002, 18: 149-158.
16. Zantnar C, Kielbassa A M, Martus P, Kunzelmann K H. Sliding wear of 19 commercially available composites and compomers. *Dental Materials* 2004; 20: 277-285.

**Dr inż. Joanna MYSTKOWSKA**

**Prof. dr hab. inż. Jan R. DĄBROWSKI**

Zakład Inżynierii Materiałowej i Biomedycznej

Wydział Mechaniczny

Politechnika Białostocka

ul. Wiejska 45c, 15-351 Białystok, Polska

tel. (085) 746-92-50

e-mail: j.mystkowska@pb.edu.pl, jrd@pb.edu.pl