

FENOMENOLOGICZNA OCENA DEGRADACJI WYPEŁNIENIA Z KOMPOZYTU POLIMEROWEGO I TKANKI ZĘBA W WARUNKACH CYKLICZNYCH OBCIĄŻEŃ DYNAMICZNYCH

DANIEL PIENIAK¹, AGATA M. NIEWCZAS^{2*}, TERESA BACHANEK², JAROSŁAW BIENIAŚ³

¹ SZKOŁA GŁÓWNA SŁUŻBY POŻARNICZEJ, ZAKŁAD MECHANIKI STOSOWANEJ, UL. SŁOWACKIEGO 52/54, 01-621 WARSZAWA

² KATEDRA I ZAKŁAD STOMATOLOGII ZACHOWAWCZEJ, UNIWERSYTET MEDYCZNY W LUBLINIE, UL. KARMEŁICKA 7, 20-081 LUBLIN

³ KATEDRA INŻYNIERII MATERIAŁOWEJ, POLITECHNIKA LUBELSKA, UL. NADBYSTRZYCKA 36, 20-618 LUBLIN

* E-MAIL: AGATA.NIEWCZAS@UMLUB.PL

Streszczenie

W artykule opisano metodę oceny degradacji struktury zęba ludzkiego poddanego regeneracji kompozytem polimerowym opartym na związkach metakrylanowych. Za miarę degradacji przyjęto stopień zaawansowania procesów zużycia fizyko-mechanicznego odniesiony do granicznego poziomu tego zużycia. Analizowano szczelinę brzeżną oraz mikropęknięcia w warstwie brzegowej twardych tkanek zęba i w materiale wypełnienia. Wykazano, że laboratoryjna obserwacja rozbudowy szczeliny w wybranych obszarach anatomicznej struktury zęba (powierzchnia żucia, wypełnienie-szklivo, wypełnienie-zębina) może być podstawą oceny stopnia degradacji całego układu zęb-wypełnienie. Przeprowadzono badania laboratoryjne, w których wykorzystano zęby ludzkie trzonowe i przedtrzonowe z wypełnieniami ubytków klasy I wg Blacka.

Słowa kluczowe: degradacja, szczelina brzeżna, kompozyt polimerowy, układ zęb-wypełnienie

[*Inżynieria Biomateriałów, 103, (2011), 8-12*]

Wstęp

Odzyskanie przez ząb leczony zachowawczo zdolności czynnościowej nie eliminuje w całości ryzyka ponownego pojawienia się próchnicy. Przyczyną tego jest między innymi zjawisko nieszczelności brzeżnej, którego konsekwencją jest proces mikroprzecieku. Mikroprzeciek bakteryjny polega na penetracji mikroorganizmów i ich proliferacji w przestrzeni pomiędzy wypełnieniem a ścianą ubytku. Nieszczelność wypełnienia powodowana jest degradacją struktur tkanek zęba, w szczególności szkliva i zębiny oraz samego wypełnienia. Wszystkie te struktury są odmienne pod względem składu oraz właściwości fizyko-mechanicznych. Właściwości fizyko-mechaniczne struktur badanego układu są istotne dla charakterystyki degradacji. Niektóre z nich przedstawiono w TABELI 1.

PHENOMENOLOGICAL EVALUATION OF DEGRADATION OF POLYMER COMPOSITE FILLING AND THE TOOTH TISSUE IN THE CONDITIONS OF CYCLICAL DYNAMIC LOADS

DANIEL PIENIAK¹, AGATA M. NIEWCZAS^{2*}, TERESA BACHANEK², JAROSŁAW BIENIAŚ³

¹ DEPARTMENT OF APPLIED MECHANICS, MAIN SCHOOL OF FIRE SERVICE, 52/54 SŁOWACKIEGO ST., 01-621 WARSZAWA, POLAND

² DEPARTMENT OF CONSERVATIVE DENTISTRY, MEDICAL UNIVERSITY OF LUBLIN, 7 KARMEŁICKA ST., 20-081 LUBLIN, POLAND

³ DEPARTMENT OF MATERIALS ENGINEERING, LUBLIN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, 36 NADBYSTRZYCKA STR., 20-608 LUBLIN, POLAND

* E-MAIL: AGATA.NIEWCZAS@UMLUB.PL

Abstract

The article focuses on the method of degradation of the human tooth structure which was subjected to regeneration by polymer composite based on metacrylate compounds. The degree of advancement of physical and mechanical usage processes related to the limit level of this usage was considered as the measurement of degradation. The marginal fissure and micro-cracks in the border surface of the hard tooth tissues and in the filling material were analyzed. It was revealed that laboratory observation of the fissure expansion in selected areas of anatomical tooth structure (mastication surface, filling-enamel, filling-dentine) may constitute the basis of evaluation of degradation degree of the whole tooth-filling system. The laboratory tests were carried out in which human molars and premolars with the fillings qualified as class I according to Black were used.

Keywords: degradation, marginal fissure, polymer composite, filling-tooth system

[*Engineering of Biomaterials, 103, (2011), 8-12*]

Introduction

Getting back the activity usefulness by a tooth treated preventively does not eliminate totally the risk of another occurrence of caries. One of the reasons of this is the phenomenon of marginal untightness resulting in the process of micro-leak. Bacterial micro-leak deals with microorganism penetration and their proliferation in the space between the filling and the defect wall. Filling untightness is caused by degradation of tooth tissues structures, particularly that of the dentine, enamel and filling. All these structures are different as it comes to their composition and physical and mechanical properties. Physical and mechanical properties of the studied system structures are crucial for characteristics of degradation. Some of them are presented in TABLE 1.

TABELA 1. Niektóre właściwości fizyko-mechaniczne systemu zęb-wypełnienie kompozytowe.
TABLE 1. Selected physical and mechanical properties of the tooth-composite filling system.

Parametr wytrzymałościowy Durability parameter	Struktura zęba Tooth structure			Wypełnienie kompozytowe Composite filling
	Szklivo Enamel	Zębina Dentine	Miazga Pulp	ELS
Moduł Sprężystości / Elasticity modulus [GPa]	48-84,1	14-18,6	2	9
Liczba Poissona / Poisson's factor	0,2-0,33	0,2-0,32	0,45	-
Gęstość / Density [g/cm ³]	2,9	2,1	-	2,08
Mikrotwardość / Micro-hardness [HK]	360-390	75	-	40
Wytrzymałość na zginanie / Bending strength [MPa]	-	-	-	93-132
Współczynnik intensywności naprężeń Coefficient of intensity of stresses [N•mm ^{-3/2}]	0,7-1,5	-	-	-
Skurcz polimeryzacyjny / Polymerization shrinkage [%]	-	-	-	1,64 lin.; 1,3 obj./vol.

Parametry wytrzymałościowe w wielu publikacjach uznawane są jako miary stopnia degradacji – poziomu resztkowych wartości użytkowych materiału [1]. W wielu publikacjach zakłada się, że odporność na wielokrotne mechaniczne obciążenia determinowana jest przez parametry materiału uzyskiwane w konwencjonalnych próbach wytrzymałościowych [2]. Jednakże trzeba zauważyć, że degradacja w rzeczywistych warunkach użytkowania jest wynikiem oddziaływania wymuszeń o charakterze cyklicznym na cały układ oraz interakcji struktur zęba i wypełnienia w wyniku tych wymuszeń.

W przypadku obciążeń siłami zgryzowymi wartości naprężeń maksymalnych uzyskanych metodą MES [3] wynosiły nawet 500 MPa. Występowały one w strefie styku wypełnienia z zębina, na dnie ubytku. Maksymalne pionowe siły zgryzowe (zgodne z kierunkiem osi długiej zęba) mogą wynosić nawet 1000 N [4], powierzchnia kontaktu przeciwnych zębów wynosi od 0,4-2,2 mm² [5], naprężenia w tych warunkach mogą wynosić nawet 0,45-2,5 GPa [4]. W warunkach żucia zęby ludzkie obciążone są dodatkowo siłami ścinającymi, których wektory przebiegają w płaszczyźnie poziomej i skierowane są równoległe do powierzchni żucia. W badaniach własnych prowadzonych przez autorów ustalono, że w przypadku zębów trzonowych, przy założeniu stałej siły zgryzowej równej 400 N ich wartości wynoszą od kilkunastu do kilkudziesięciu N [6].

Metoda

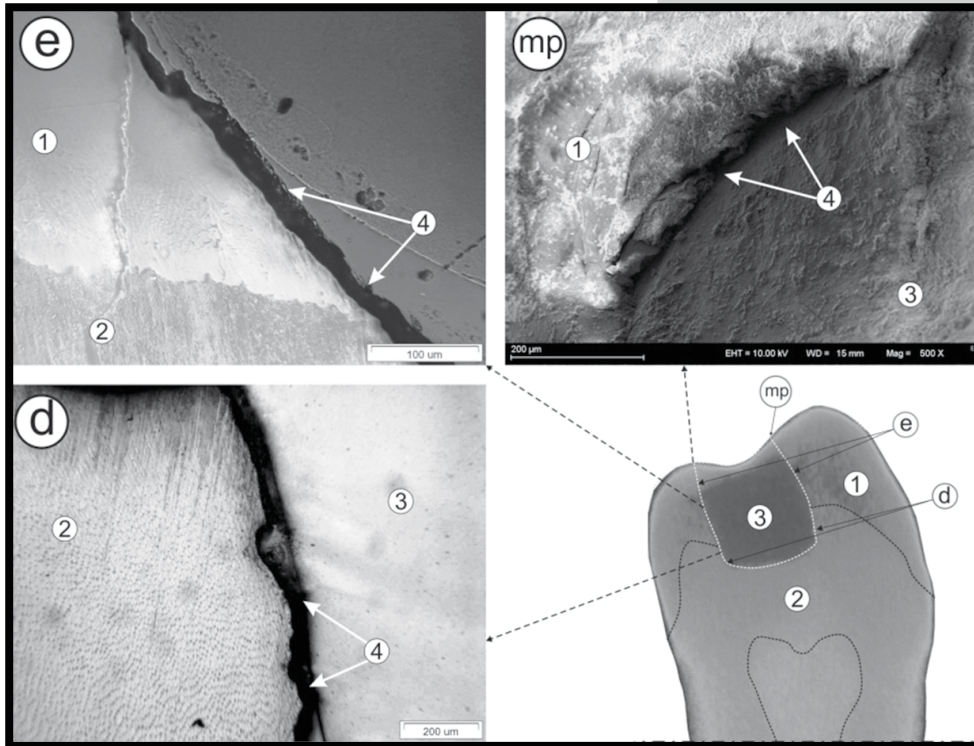
Do badań wykorzystano zęby ludzkie trzonowe i przedtrzonowe. Zęby te usunięto ze względów ortodontycznych i chirurgicznych. W zębach wypreparowano ubytki modelowe klasy I wg. Blacka o głębokości trzech milimetrów umożliwiającej kontakt ze szkliwem i zębina. W ubytkach założono wypełnienia z materiału kompozytowego ELS (Saremco AG) zgodnie ze wskazaniami producenta. Materiał kompozytowy zakładano do ubytku warstwami o grubości ok. 2 mm każda i naświetlano lampą halogenową przez 40 sek. Próbki zębów przygotowane w sposób opisany powyżej poddano cyklicznym obciążeniom mechanicznym na specjalistycznym stanowisku badawczym symulującym akt żucia [7]. Degradację w obszarze styku tkanek zęba i wypełnienia oceniano za pomocą obserwacji mikroskopowych. W analizie mikroskopowej wyróżniono trzy anatomiczne obszary: powierzchnię żucia (mp), obszar styku wypełnienia ze szkliwem (e), obszar styku wypełnienia z zębina (d) (RYS. 1). Za pomocą mikroskopu SEM prowadzono obserwacje powierzchni żucia. Natomiast w celu oceny degradacji w płaszczyźnie zgodnej z kierunkiem długiej osi zęba (skrośnej) prowadzono obserwacje na mikroskopie optycznym. Przekroje zębów z wypełnieniem wykonano każdorazowo po serii cyklicznych obciążeń.

In numerous publications strength parameters are used as measurements of degradation degree – the level of residual use values of a material [1]. In a number of publications it is assumed that resistance to multiplied mechanical loads is determined by material parameters obtained in the course of conventional strength tests [2]. However, it shall be noticed that degradation in actual consumption conditions results from cyclical stimulation of the whole system as well as interaction of tooth structures and filling being an outcome of such stimulation.

In the case of occlusion forces loads, the values of maximum stresses obtained by MES method [3] amounted to even 500 MPa. They were noticed in the contact area of filling and dentine, at the bottom of the defect. Maximum vertical occlusion forces (compatible with direction of the long tooth axis) may even equal 1000 N [4], contact surface of the opposite teeth equals from 0.4 to 2.2 mm² [5], stresses in such conditions may be as high as 0.45-2.5 GPa [4]. In the conditions of mastication, human teeth are additionally loaded by shearing forces, the vectors of which run horizontally and are directed parallel to the mastication surface. Authors' studies showed that, in the case of molars, in the presence of constant occlusion force equal 400 N, their values amount from a few to tens of N [6].

Method

Human molars and premolars were used in the tests. They had been removed due to surgical and orthodontic reasons. Model defects of class I according to Black each 3 mm deep to enable the contact with the enamel and dentine were prepared. ELS (Saremco AG) composite material was applied to defects in accordance with manufacturer's instructions. Composite material was applied in layers, each 2 mm thick, and exposed to light curing lamp for about 40 seconds. Tooth specimens prepared in the above described manner underwent cyclical mechanical loads at the specially designed research station simulating a mastication act [7]. Degradation in the contact area between tooth tissues and filling was observed under a microscope. In the course of microscope analysis the three anatomical areas were distinguished: mastication surface (mp), contact area between filling and the enamel (e), contact area between filling and the dentine (d) (FIG. 1). Observation of the mastication surface was performed with the use of SEM microscope. In order to evaluate degradation on the surface compatible with the tooth long axis direction (through), optical microscope was used. Tooth sections with a filling were made each time following cyclic loads series.



RYS. 1. Obszary obserwacji mikroskopowych: mp – granica szkliwo-wypełnienie na powierzchni żującej, e – granica szkliwo-wypełnienie, d – granica zębina-wypełnienie, 1 – szkliwo, 2 – zębina, 3 – wypełnienie kompozytowe, 4 – szczelina brzeżna.

FIG. 1. Areas of microscopic observations: mp – border enamel - filling on mastication surface, e – border enamel-filling, d – border dentine-filling, 1 – enamel, 2 – dentine, 3 – composite filling, 4 – marginal crevice.

Wyniki

Miary degradacji mechanicznej

Stwierdzono, że obszar koncentracji największych naprężeń podczas eksploatacji zwykle znajduje się w obszarze styku bryły wypełnienia i tkanki twardej zęba [9,10], co skutkuje największą degradacją w tym obszarze, zainicjowaną skurczem polimerizacyjnym materiału wypełnienia [8]. Umożliwia to ograniczenie obserwacji układu do tego obszaru i diagnozy stanu – poziomu zasobu użytkowego na podstawie kompleksowej miary stopnia degradacji. Jako miarę stopnia degradacji wybrano parametr diagnostyczny o najbardziej istotnym znaczeniu dla całego układu zęb-wypełnienie. Zgodnie z powyższym jako miarę degradacji mechanicznej układu zęb-wypełnienie przyjęto wymiary geometryczne szczeliny brzeżnej.

Wyniki pomiarów szerokości szczeliny brzeżnej w wyróżnionych strefach anatomicznych struktury zęba zostały poddane kompleksowej analizie statystycznej. Test „post hoc” przeprowadzono w celu oceny różnic między wynikami w kolejnych zakresach obciążenia. Wybrano test HSD Tukey’a dla nierównych licznosci bazujący na analizie kontrastów w analizowanych grupach wyników pomiarów. Nie zaobserwowano istotnych różnic między wynikami wewnątrz grup determinowanych liczbą cykli żucia (MC), we wszystkich anatomicznych strefach pomiaru. Nie wykazano również istotnych różnic między strefami pomiarowymi w próbkach nie poddanych obciążeniu oraz w próbkach po 30000 cykli żucia. Natomiast wyniki uzyskane po 60000 i 100000 cykli żucia różniły się istotnie od wyników uzyskanych we wcześniejszych przedziałach obciążenia oraz między sobą, we wszystkich anatomicznych strefach pomiaru. Następnie, przeprowadzono analizę poziomu uszkodzenia – degradacji *D* układu w oparciu o statystyki opisowe rozkładów szerokości szczeliny (średnią szerokość szczeliny w kolejnych zakresach obciążeń). Degradację układu z wypełnieniem określono wykorzystując zmodyfikowane równanie Hwanga i Hana pozwalające określić procentowo poziom degradacji w przyjętym zakresie obciążenia [11].

Results

Measurements of mechanical degradation

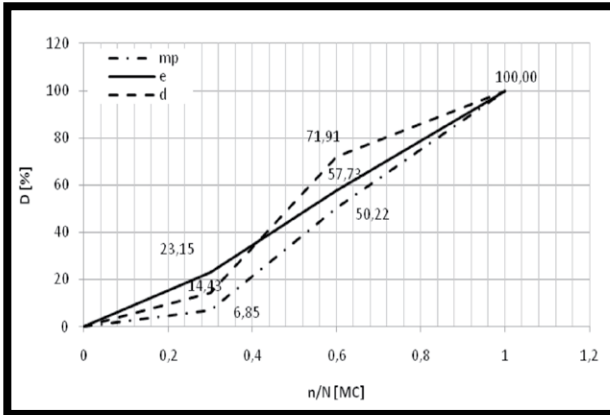
It was observed that the concentration area of the highest stresses during exploitation is usually situated in the contact area of the filling body and the tooth hard tissue [9,10], which results in the most visible degradation in this area, initiated by a polymerization shrinkage of the filling material [8]. This guarantees the limitation of observation of the system to this particular area and the diagnosis of the state – the level of consumption reserve on the basis of complex measurement of degradation degree. Diagnostic parameter of the most crucial significance for the whole tooth-filling system was chosen. In accordance with the above, geometrical sizes of the marginal fissure were accepted as the measurement of mechanical degradation of the tooth-filling system.

Measurement results of the marginal fissure width in the distinguished anatomical zones of the tooth structure were next submitted to the complex statistical analysis. Post hoc test was carried out in order to evaluate the differences between the results in subsequent load ranges. Tukey’s HSD test for unequal representations based on the analysis of contrasts in the analyzed groups of measurement results was chosen. No significant differences determined by a number of mastication cycles (MC) between the results inside the groups were observed in all anatomical zones of the measurement. The same was observed in the case of the specimens which did not undergo a load and in the specimens after 30000 mastication cycles. The results obtained after 60000 and 100000 mastication cycles significantly differed from the ones obtained in the previous load ranges and among each other individually, in all anatomical zones. Next, analysis of the damage degree was performed – degradation *D* of the system based on descriptive statistics of fissure width ranges (mean width of the fissure in subsequent load ranges). Degradation of the system with a filling was determined with the use of modified Hwang and Han’s equation which allows to establish percentage degree of degradation in an accepted load range [11].

$$D = \frac{(x_0 - x_n)}{(x_0 - x_N)}$$

gdzie: D – poziom uszkodzenia, x_0 – średnia szerokość szczeliny brzeżnej dla próbek nie poddanych obciążeniu, x_n – średnia szerokość szczeliny w kolejnych zakresach obciążenia, x_N – średnia szerokość szczeliny dla granicznej liczby cykli obciążeniowych, n – zakres obciążenia cyklicznego, N – graniczna wartość obciążenia cyklicznego.

Graniczną trwałość układu z wypełnieniem przyjęto na poziomie $N = 10^5$ MC. Przebieg funkcji uszkodzenia – degradacji przedstawiono na RYS. 2.



RYS. 2. Przebiegi funkcji degradacji układu w strefach: powierzchni żucia (mp), szkliwa (e), zębiny (d).

FIG. 2. Function of degradation in the zones of: mastication surface (mp), enamel (e), dentine (d).

Przedstawione na wykresie przebiegi funkcji degradacji wskazują na stabilny przyrost ryzyka (lub prawdopodobieństwa) uszkodzenia układu zęb-wypełnienie w strefie szkliwa (e). Najwyższą zmiennością charakteryzuje się przebieg krzywej degradacji w obszarze zębiny (d). Najniższym poziomem degradacji w kolejnych zakresach obciążenia charakteryzuje się obszar powierzchni żucia (mp). Przebiegi wszystkich krzywych wskazują na stosunkowo stabilny wzrost uszkodzenia. Nie obserwuje się zatrzymania przyrostu degradacji, co w tym konkretnym przypadku oznaczałoby zatrzymanie rozbudowy szczeliny brzeżnej. W przedmiotowych badaniach obserwacja dynamiki rozbudowy szczeliny brzeżnej w zależności od liczby cykli obciążeniowych umożliwia prognozowanie przebiegu procesu degradacji układu zęb-wypełnienie. W tym celu obliczono średnią prędkość propagacji szczeliny w kierunku równoległym do powierzchni żucia zęba [12].

$$v_x = \frac{dx}{dn}$$

gdzie: v_x – prędkość propagacji w kierunku równoległym do powierzchni żucia, x – szerokość szczeliny brzeżnej, n – liczba cykli obciążenia.

Charakterystyki prędkości propagacji (RYS. 3) uzyskane podczas próby cyklicznych obciążeń dynamicznych wykazują współbieżność w obszarze wypełnienie-zębina (d) oraz w obszarze powierzchni żucia (mp) w zakresie liczby cykli obciążeniowych od 0 do 60000 MC. W kolejnym etapie obserwacji (60000 do 100000 MC) występuje stabilizacja prędkości propagacji szczeliny.

$$D = \frac{(x_0 - x_n)}{(x_0 - x_N)}$$

where: D – damage, x_0 – mean value of marginal fissure width for specimens not subjected to load, x_n – mean value of marginal fissure width in subsequent load ranges, x_N – mean value of marginal fissure width for the limit number of load cycles, n – range of cyclical load, N – limit value of cyclical load.

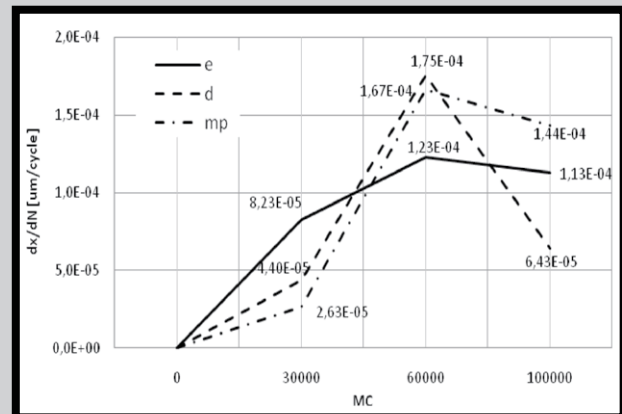
Limit durability of the system with a filling was accepted at the level $N=10^5$ MC. The course of damage – degradation function is presented in FIG. 2.

Degradation functions presented in the diagram point out to the stable risk (or probability) increase of the tooth-filling system damage in the zone of the enamel (e). The degradation curve in the dentine zone (d) can be characterized by the highest variability. The lowest degradation degree in the subsequent load ranges characterizes the area of mastication surface (mp). All curves indicate relatively steady damage increase. No stoppage of degradation degree can be observed, which, in this particular case would mean the retention of the marginal fissure expansion. In the subject studies, observation of the dynamics of the marginal fissure expansion in the relation to the number of load cycles allows for accurate prognosis of the course of the tooth-filling system degradation. In order to achieve this, mean speed of the fissure propagation in the direction parallel to the tooth mastication surface was calculated [12].

$$v_x = \frac{dx}{dn}$$

where: v – propagation speed in the direction parallel to the mastication surface, x – marginal fissure width, n – number of load cycles.

Characteristics of propagation speed (FIG. 3) obtained in the course of cyclic dynamic load tests point out to the existing concurrency in the filling-dentine (d) area and in the mastication area (mp) in the range of the number of load cycles from 0 to 60000 MC. Stabilization of the fissure propagation speed is observed between 60000 to 100000 MC.



RYS. 3. Prędkości propagacji szczeliny brzeżnej w strefach: powierzchni żucia (mp), szkliwa (e), zębiny (d).

FIG. 3. Speeds of marginal fissure propagation in the zones of: mastication surface (mp), enamel (e), dentine (d).

1. Stwierdzono, że szczelina brzeżna w systemie ząb-kompozytowe wypełnienie stomatologiczne, powstająca na skutek skurczu polimeryzacyjnego, powiększa się systematycznie pod wpływem cyklicznych wymuszeń o charakterze dynamicznym.

2. Wykorzystując właściwe testy statystyczne wykazano, że wyniki pomiarów szerokości szczeliny w wybranych obszarach anatomicznej struktury zęba mogą być podstawą do obliczeń i analizy poziomu degradacji układu ząb-wypełnienie.

3. Stwierdzono, że dynamika degradacji wypełnienia oceniana na podstawie pomiarów szerokości szczeliny brzeżnej w warunkach próby obciążeń mechanicznych różni się w odmiennych obszarach anatomicznych zęba. W większości przypadków degradacja układu była większa w obszarze zębiny niż w obszarze szkliwa i na powierzchni żucia. Zjawisko to jest najprawdopodobniej spowodowane dużymi różnicami właściwości fizyko-mechanicznych struktur kompozytu polimerowego oraz zębiny, a w szczególności niekorzystnym rozkładem naprężeń w tej strefie dla wypełnień I klasy wg Blacka.

4. Degradacja wypełnienia kompozytowego w praktyce stomatologicznej nie powinna być oceniana jedynie na podstawie obserwacji powierzchni żucia ponieważ stan układu na powierzchni żucia nie zawsze jest reprezentatywny dla całego układu. Wnioskowanie o degradacji jedynie na podstawie obserwacji ograniczonych do powierzchni żucia układu może prowadzić do przeszacowania trwałości wypełnienia.

Podziękowania

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2011 jako projekt badawczy.

Conclusions

1. It was revealed that the marginal fissure in the tooth-composite dental filling system which forms as a result of polymerization shrinkage systematically grows when exposed to cyclical load stimulation of dynamic nature.

2. With the use of relevant statistical tests, it was revealed that measurement results of the marginal fissure width in selected areas of the anatomical tooth structure may constitute the basis for calculations and analysis of the tooth-filling system degradation.

3. It was observed that the dynamics of the filling degradation assessed on the basis of the marginal fissure widths measurements in the conditions of mechanical load tests differs in diverse anatomical areas of the tooth. In majority of cases, the system degradation was greater in the dentine area as compared with the enamel and mastication areas. This is probably caused by big differences of physical and mechanical properties of polymer composite structures and those of the dentine and in particular, by a negative distribution of stresses in this zone for class I fillings according to Black.

4. Degradation of composite filling in dental practice should not be evaluated solely on the basis of the observation of the mastication surface because the state of the system in the mastication area is not always representative for the whole system. Conclusions concerning degradation made exclusively on the basis of observations limited to the system mastication surface may lead to overestimation of the filling durability.

Acknowledgements

Presented work was financed from the scientific funds in the years 2008-2011 as a research project.

Piśmiennictwo

- [1] Papadogiannis Y., Lakes R.S., Palaghias G., Helvatjoglu-Antoniades M., Papadogiannis D. Fatigue of packable dental composites. *Dental Materials* 23 (2007), s. 235-242.
- [2] Htang A., Ohsawa M., Matsumoto H. Fatigue resistance of composite restorations: effect of filler content. *Dental Materials*. 11 (1995), s. 7-13.
- [3] Ausiello P., Apicella A., Davidson C.L. Effect of adhesive layer properties on stress distribution in composite restorations – a 3D finite element analysis. *Dental Materials* 18 (2002), s. 295-303.
- [4] Li Hong He, Swain M. V., Understanding the mechanical behavior of human enamel from its structural and compositional characteristics, *J Mech Behav of Biomed Mat* 1 (2008), 18-29.
- [5] Hayasaki, H., Okamoto, A., Iwase, Y., Yamasaki, Y., Nakata, M., 2004. Occlusal contact area of mandibular teeth during lateral excursion. *Int. J. Prosthodont.* 17, 72-76.
- [6] Niewczas A. M., Pieniak D., Bachanek T., Surowska B., Bieniaś J., Pałka K., Prognosing of functional degradation of bio-mechanical systems exemplified by the tooth-composite filling system, *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 2010, 1 (45), 23.

References

- [7] Hunicz J, Niewczas A. M., Kordos P, Pieniak D. Experimental test stand for analysis of composite dental fillings degradation. *Eksploatacja i Niezawodność - Maintenance and Reliability*, 2007, 2, 37-43.
- [8] Ausiello P., Apicella A., Davidson C.L., Rengo S. 3D – finite element analyses of cusp movements in human upper premolar, restored with adhesive resin – based composites; *Journal of Biomechanics*, 34 (2001), s. 1269-1277.
- [9] Davidson C.L., Davidson - Kaban S.S. Handling of mechanical stresses in composite restorations. *Dental Update* 25 (1998), s. 274-279.
- [10] Davidson C. L., Feilzer A. J. Polymerization shrinkage and polymerization shrinkage stress in polymer-based restoratives. *Journal of Dentistry* 25 (1997), s.435-440.
- [11] Topoliński T. Zmęczenie tworzyw polimerowych. Mechanizmy zniszczenia, fenomenologiczne hipotezy procesu zmęczeniowego niszczenia; w *Metody doświadczalne w zmęczeniu materiałów i konstrukcji* red. J. Szala, wyd. ATR w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2000.
- [12] Ochelski S. *Metody doświadczalne mechaniki kompozytów konstrukcyjnych*. wyd. WNT, Warszawa 2004.