

Badania topografii powierzchni ceramiki cyrkonowej z zastosowaniem mikroskopu sił atomowych (Atomic Force Microscopy)

The assesment of surface topograhy of zirconium oxide ceramic using Atomic Force Microscope (AFM)

**Bohdan Bączkowski¹, Anna Ziębowicz², Bogusław Ziębowicz³,
Elżbieta Wojtyńska¹, Elżbieta Mierzwińska-Nastalska¹**

¹ **Katedra Protetyki Stomatologicznej, Warszawski Uniwersytet Medyczny**
Department of Prosthodontics, Medical University of Warsaw
Kierownik: prof. dr hab. n. med. *Elżbieta Mierzwińska-Nastalska*

² **Katedra Biomateriałów i Urządzeń Medycznych, Politechnika Śląska**
Department of Biomaterials and Medical Devices Engineering, Silesian University of Technology
Kierownik: prof. dr hab. inż. *Zbigniew Paszenda*

³ **Katedra Materiałów Inżynierskich i Biomedycznych, Politechnika Śląska**
Kierownik: dr hab. inż. *Tomasz Tański*

HASŁA INDEKSOWE:

ceramika cyrkonowa, struktura powierzchni, łączniki implantologiczne

KEY WORDS:

zirconium oxide ceramic, surface topography, implant abutments

Streszczenie

Wprowadzenie. Wdrożenie do praktyki klinicznej technologii komputerowego projektowania i frezowania uzupełnień protetycznych (CAD/CAM), a także zastosowanie wysokowytrzymałych materiałów, takich jak dwutlenek cyrkonu, charakteryzujący się wieloma korzystnymi właściwościami, pozwoliło na zastosowanie ceramiki cyrkonowej w produkcji łączników implantologicznych.

Cel pracy. Celem pracy była laboratoryjna ocena topografii powierzchni ceramiki cyrkonowej stosowanej w wykonawstwie łączników implantologicznych.

Materiał i metody. Analizie poddano próbki ceramiki cyrkonowej Wieland (Wieland, Niemcy) i Robocam (Robocam, Polska). Próbki do badań topografii powierzchni ceramiki cyrkonowej, w kształcie walców o średnicy 10 mm i wysokości 10 mm, wycięto z bloczków przygotowanych

Summary

Introduction. The implementation into a clinical practice of computer-aided design and milling technology for prosthetic restorations (CAD / CAM), as well as the use of high-strength materials such as zirconium oxide has many beneficial properties, which allowed the use of zirconium oxide ceramics in the production of implantological abutments.

The aim of the study was a laboratory assesment of surface topography of zirconium ceramics used in implant abutments manufacturing.

Material and methods. Samples of zirconia ceramics Wieland (Wieland, Germany) and Robocam (Robocam, Poland) were analyzed. Samples for testing the surface topography of zirconia ceramics, in the shape of cylinders with a diameter of 10 mm and a height of 10 mm were made, cuted from blocks prepared by manufacturers. A total of 20 samples were prepared: 10 pieces of Wieland

przez producentów. Łącznie przygotowano 20 próbek: 10 sztuk próbki ceramiki Wieland oraz 10 sztuk próbki ceramiki Robocam. W badaniach wykorzystano mikroskop sił atomowych (Atomic Force Microscopy).

Wyniki. Obserwacje jakości powierzchni badanych próbek wskazały na błędy prasowania w ceramice Wieland (pory międzyagregatowe i międzyziarnowe). Zestawienie wyników współczynnika nierówności powierzchni RMS oraz chropowatości powierzchni R_a obu próbek wskazują na dużą nierównomierność w morfologii powierzchni.

Wnioski. Wartość współczynnika RMS i R_a oraz homogenność materiału ceramicznego mogą mieć wpływ na późniejszy stopień adhezji systemów łączących łącznik implantologiczny z koroną protetyczną.

ceramic samples and 10 pieces of Robocam ceramic samples. In this research Atomic Force Microscopy has been used.

Results. Observations of the surface quality of the tested samples indicated pressing errors in Wieland ceramics (interaggregate and intergranular pores). The comparison of the results of the surface roughness coefficient RMS and the surface roughness R_a of both samples indicate a large irregularity in the surface morphology.

Conclusions. The value of the RMS and R_a ratio and the homogeneity of the ceramic material may affect the subsequent degree of adhesion of cements connecting implant abutment with a prosthetic crown.

Wstęp

Poszukiwania materiałów, które umożliwiłyby trwałe zastąpienie uszkodzonych tkanek twardych zębów w sposób wiernie naśladowujący naturę towarzyszyło człowiekowi od wieków. Korzystne pod względem estetycznym rozwiązanie pojawiło się w VII wieku w Chinach, w związku z wynalezieniem porcelany. W dentyście na szeroką skalę ceramikę zaczęto stosować wg. różnych źródeł na przełomie XVII i XVIII wieku po opracowaniu metod jej wykonywania i obróbki. W roku 1956 Donovan i Price ostatecznie opracowali i udoskonaliли metodę napalenia porcelany na różne stopy metali, co pozwoliło na jej zastosowanie w wykonawstwie różnych stałych uzupełnień protetycznych. Systemy metalowo ceramiczne zajmowały istotne miejsce w protetyce stomatologicznej przez następne 35 lat, kiedy to prowadzono badania nad połączeniem metalu z ceramiką, stopami oraz samą ceramiką. Lata osiemdziesiąte ubiegłego wieku wprowadziły ceramikę otrzymywaną w procesie odlewniczym (Dicor), co dało przyczynek do ponownego wprowadzania nowych technologii do

protetyki stomatologicznej, a co za tym idzie zwiększonego zainteresowania się porcelaną bezmetalową.^{1,2}

Wprowadzenie pod koniec dwudziestego wieku technologii komputerowego projektowania i frezowania uzupełnień protetycznych, a także zastosowanie wysokowytrzymałych materiałów, takich jak dwutlenek cyrkonu, pozwoliło na rozszerzenie wskazań do zastosowania całoceramicznych uzupełnień stałych. Jest to spowodowane takimi właściwościami materiału jak sztywność, twardość, niskie przewodnictwo cieplne i odporność na kruche pęknięcie w środowisku jamy ustnej. Znalazł on również zastosowanie w produkcji łączników implantologicznych standardowych i indywidualnych całoceramicznych bądź hybrydowych.³

Rozwinięcie technologii CAD/CAM pozwoliło na uzyskiwanie indywidualnych łączników implantologicznych wykonanych z tlenku cyrkonu, które wytrzymały obciążenia in vitro do 700 N. Zaletą wykonawstwa abutmentów indywidualnych jest możliwość uzyskania geometrii podobnej do kształtu szlifowanego zęba oraz dokładne kształtowanie profilu wylania. Kolor naśladowający odcień zęba pozwala na

rozwiązanie problemu szarego odcienia dziąsła brzęznego. Dodatkową zaletą wydaje się być nieprzezierność radiologiczna umożliwiająca kontrolę kliniczną. Biały kolor łącznika umożliwia jednocześnie wykonawstwo na nim korony całoceramicznej. Wadą powyższych uzupełnień jest natomiast konieczność przestrzegania odpowiedniej grubości abutmentu ze względu na charakterystykę mechaniczną materiału.⁴

Ze względu na małą dostępność badań dotyczących zachowania się łączników ceramicznych wykonanych z tlenku cyrkonu, przeprowadzono badania dotyczące twardości i chropowatości,⁵ a w obecnej pracy podjęto się oceny topografii powierzchni z zastosowaniem mikroskopu sił atomowych (Atomic Force Microscopy – AFM).

Cel pracy

Celem pracy była laboratoryjna ocena topografii powierzchni tlenku cyrkonu stosowanego w wykonawstwie łączników implantologicznych z wykorzystaniem mikroskopu sił atomowych (AFM).

Material

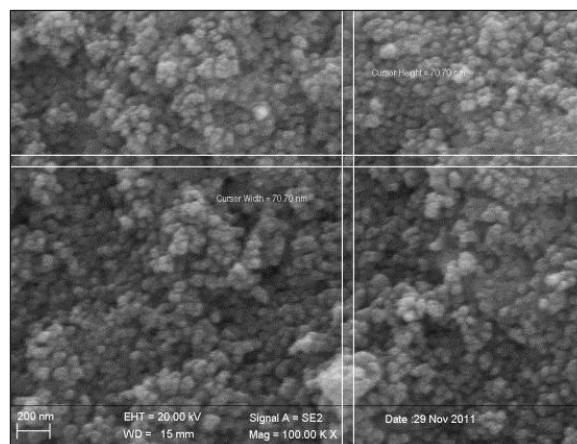
Analizie poddano próbki ceramiki cyrkonowej Wieland (Wieland, Niemcy) i Robocam (Robocam, Polska). Próbki do badań laboratoryjnych topografii powierzchni ceramiki cyrkonowej wycięto z bloczków przygotowanych przez producentów, poddanych izostatycznemu prasowaniu pod ciśnieniem 200 MPa i presynteryzowanych w temperaturze 950°C, nadając im kształt walców o średnicy 10 mm i wysokości 10 mm. Łącznie przygotowano 20 próbek: 10 sztuk ceramiki Wieland oraz 10 sztuk ceramiki Robocam. Walce do badań wyfrezowano na obrabiarce numerycznej czteroosiowej (CNC), następnie poddano synteryzacji wg protokołu wskazanego przez producenta.

Metody

Badanie jakości struktury powierzchni

Badanie powierzchni ceramiki zostało wykonane w elektronowym mikroskopie skaningowym Supra 35 (Zeiss, Niemcy) z detektorem typu SE. Ze względu na brak przewodności badane próbki poddano procesowi napylenia warstwą złota na ich powierzchni. Zastosowano napyłarkę firmy Bal-Tec (Capovani Brothers Inc, USA), model SCD050. Przy ustaleniu parametrów: czas 80 [s] oraz natężenie prądu 40 [mA], napyłono warstwę o grubości 20 [nm].

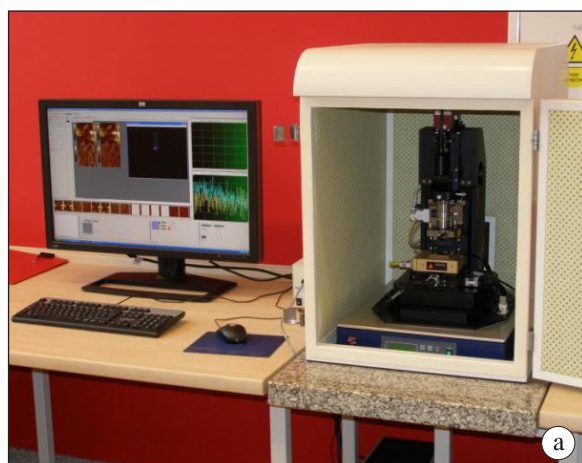
Obserwacjom poddano po dwie próbki z bloczków ceramicznych Wieland oraz Robocam. Wybranie tych dwóch próbek było uzależnione od wyników badania mikrotwardości. Badanie w mikroskopie skaningowym przeprowadzono na próbkach o najmniejszej oraz największej mikrotwardości, uzyskanej w poprzednim badaniu (5). Analizie poddano topografię powierzchni ceramiki oraz zmierzono wielkość występujących ziaren (ryc. 1).



Ryc. 1. Przykład pomiaru wielkości ziarna.

Badanie topografii powierzchni z wykorzystaniem mikroskopu sił atomowych (AFM)

Dla dokładnego pomiaru topografii powierzchni ceramiki zastosowano mikroskop sił atomowych (AFM) XE-100 firmy (Park Systems Korea). Urządzenie przedstawiono na



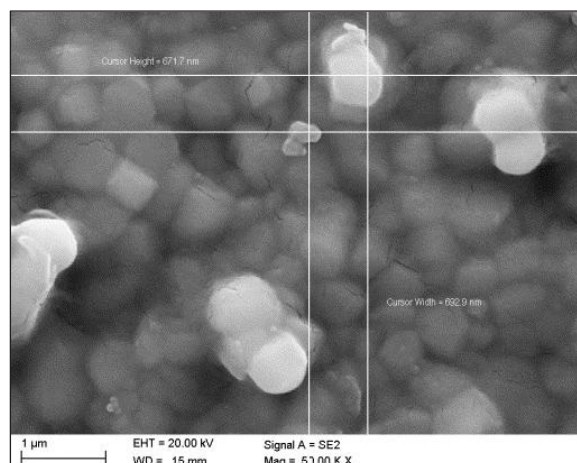
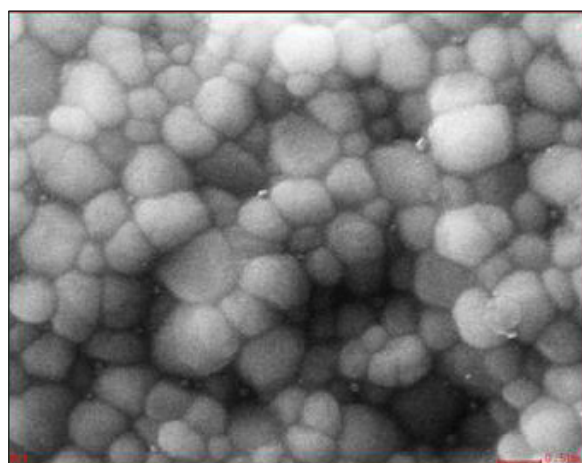
Ryc. 2. Mikroskop sił atomowych XE-100 (Park System, Korea): a – widok ogólny, b - widok jednostki pomiarowej (głowicy z mikrodźwignią).



rycinie 2. Mikroskop sił atomowych pozwala na uzyskanie obrazu powierzchni ze zdolnością rozdzielczą rzędu wymiarów pojedynczego atomu dzięki wykorzystaniu sił oddziaływań międzyatomowych. Siły oddziaływań międzyatomowych pomiędzy atomami ostrza przesuwającego się po powierzchni a atomami badanej próbki umożliwiają wykorzystanie detekcji ruchów ostrza do obrazowania. Ostrze jest wytworzone na sprężystej mikrodźwigni (mikrobelce), której odchylenie umożliwia wyznaczenie siły oddziaływania międzyatomowego pomiędzy atomami ostrza i badanej powierzchni. Mapa sił dla każdego punktu powierzchni próbki jest przetwarzana komputerowo na obraz. Pomiar ugięcia mikrodźwigni jest najczęściej dokonywany metodami optycznymi – wiązką lasera.

W badaniach zastosowano tryb kontaktowy pracy mikroskopu. Podczas pracy w tym trybie ostrze sondy o bardzo małych rozmiarach (100 μm długości, 10 μm szerokości oraz 1 μm grubości) znajdowało się w delikatnym

„fizycznym” kontakcie z próbką. Sonda umocowana była na końcu mikrodźwigni o niskiej stałej sprężystości, mniejszej od efektywnej stałej sprężystości utrzymującej razem atomy próbki. Kiedy skaner delikatnie przemieszczał sondę wzdłuż powierzchni próbki, siły kontaktowe powodowały wychylenie mikrodźwigni, proporcjonalne do zmian topografii próbki. Odległość między ostrzem sondy a powierzchnią próbki jest bardzo mała i działające siły mają charakter odpychający, wynikający z odpychania elektrostatycznego. W trybie bezkontaktowym wykorzystywane są siły odpychające van der Waals’a, siły kapilarne (wywierane przez cienką warstewkę wody, często obecną na powierzchni próbki podczas pracy w powietrzu atmosferycznym) oraz siły wywierane przez samą mikrodźwignię. Mikroskopia sił atomowych jest podstawową metodą badawczą w przypadku powierzchni, kiedy obrazowanie wykorzystujące szeroko stosowaną mikroskopię elektronową jest utrudnione, m.in. z powodu niskiej przewodności materiału.⁶⁻⁸



Ryc. 3. Powierzchnia ceramiki (powiększenie 10.00 KX); a – ceramika Wieland, b – ceramika Robocam.

W celu opisu powierzchni łączników określono współczynnik nierówności powierzchni (Rough Mean Square – RMS), wyrażany w nanometrach i określany według wzoru:⁶

$$\text{RMS} = \sqrt{\frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2}$$

gdzie: n – liczba przykładowych punktów,

Z_i – wysokość każdego punktu dla współrzędnej z,

\bar{Z} – średnia wartość próbki dla współrzędnej z.

Współczynnik RMS stanowi odchylenie standardowe od wartości średniej obliczane z obszaru na podstawie siatki punktów (charakteryzowanych przez wysokość Z_i). Wyznaczono także chropowatość powierzchni ceramiki Ra. Współczynnik nierówności powierzchni RMS oraz chropowatość powierzchni Ra obliczono w programie XEI zintegrowanym z mikroskopem AFM, który jest narzędziem do edycji uzyskanych obrazów oraz ich obróbki.

Wyniki

Wyniki badania jakości struktury powierzchni

Obserwacje jakości powierzchni materiału w mikroskopie skaningowym wskazały na

błędy prasowania w ceramice Wieland (pory międzyagregatowe i międzyziarnowe), które mogły mieć wpływ na jej właściwości mechaniczne. Zarejestrowano liczne pory o kształcie nieregularnym, które mogą świadczyć o niedoskonałości procesu prasowania (ryc. 3a). Natomiast ceramika Robocam w obrazie SEM wykazywała większą jednorodność i uporządkowanie ziaren (ryc. 3b).

Podczas obserwacji próbek w SEM zmierzono wielkość ziarna. Norma ISO 13356 „Implants for surgery – Ceramic materials based on yttria-stabilized tetragonal zirconia (Y-TZP)” podaje, że przekątna ziarna nie powinna przekraczać 0.4 μm . Analizując wyniki umieszczone w tabeli można stwierdzić, że obie próbki wykonane zarówno z ceramiki cyrkonowej Wieland, jak i Robocam przekraczają granicę normy ponad dwukrotnie. Wyniki pomiaru wielkości ziaren przedstawiono w tabeli 1.

Wyniki badania topografii powierzchni z zastosowaniem mikroskopu sił atomowych (AFM)

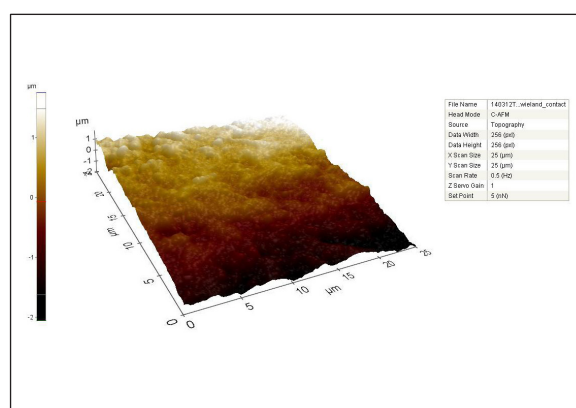
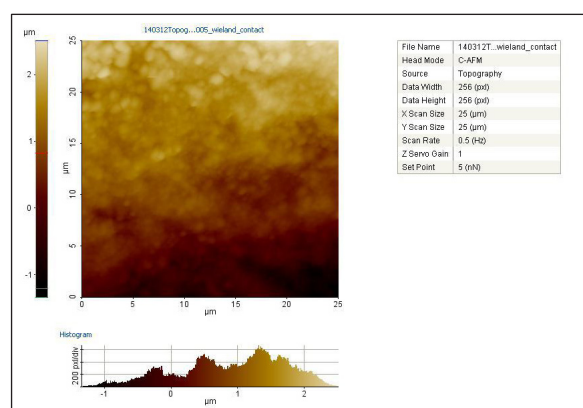
Wyniki badań morfologii powierzchni w postaci obrazów topograficznych 2D oraz odwzorowań 3D przeprowadzonych przy użyciu mikroskopu sił atomowych przedstawiono na rycinach 4 i 5. Zestawienie wyników

T a b e l a 1. Wyniki pomiaru ziaren ceramiki Wieland i Robocam

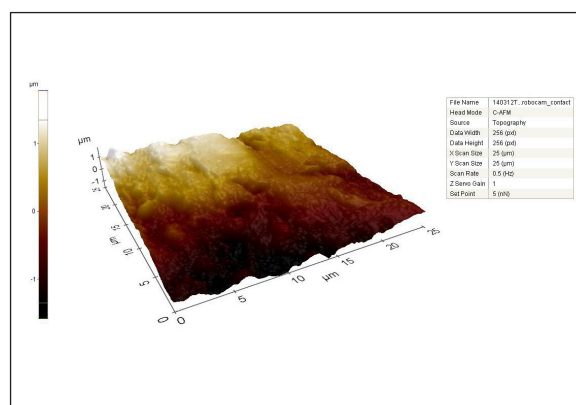
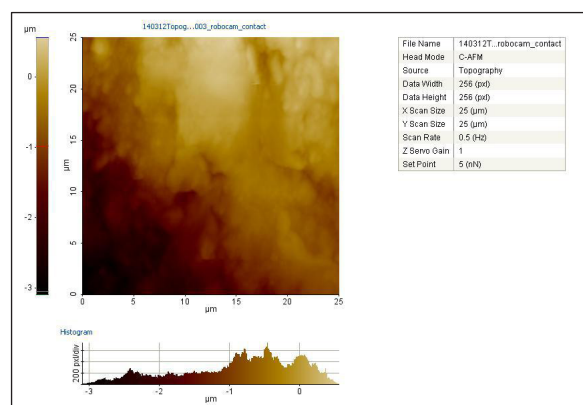
| Rodzaj próbki | Wymiary ziarna [nm] długość / wysokość | Przekątna ziarna [μm] |
|---------------|---|------------------------------------|
| Wieland | 775,3/330,9 | 0,790 |
| Robocam | 6783/637,1 | 0,958 |

T a b e l a 2. Porównanie parametrów chropowatości powierzchni badanych materiałów

| Ceramika | RMS [μm] | Ra [μm] | Wysokość minimalna [μm] | Wysokość maksymalna [μm] | Średnia wartość wysokości [μm] |
|----------|-----------------------|----------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|---|
| Wieland | 0,799 | 0,670 | -1,340 | 2,508 | 0,896 |
| Robocam | 0,839 | 0,682 | -3,097 | 0,561 | -0,877 |



Ryc. 4. Obraz topograficzny otrzymany z wykorzystaniem mikroskopu sił atomowych ceramiki Wieland: a - obraz 2D, b – trójwymiarowy wykres nierówności.



Ryc. 5. Obraz topograficzny otrzymany z wykorzystaniem mikroskopu sił atomowych ceramiki Robocam: a - obraz 2D, b – trójwymiarowy wykres nierówności.

współczynnika nierówności powierzchni RMS oraz chropowatości powierzchni Ra przedstawiono w tabeli 2.

Ceramika Robocam charakteryzuje się większymi wartościami współczynnika RMS oraz Ra, które wynoszą odpowiednio 0,839 [μm] oraz 0,682 [μm]. Wartości RMS i Ra dla ceramiki Wieland wynosiły 0,799 μm i 0,770 [μm]. Obrazy morfologii powierzchni obu próbek wskazują na jej dużą nierównomierność, o czym świadczą rozszerzone histogramy rozkładu wysokości na obrazach 2D oraz jej wartości minimalnej i maksymalnej. Pochylenie otrzymanych obrazów spowodowane jest kształtem geometrycznym badanych obiektów, co w nieznanym stopniu wpływa na kształt histogramu oraz wartości minimalnej i maksymalnej wysokości. Większe wartości RMS oraz Ra mogą sprzyjać większej przyczepności warstw nakładanych na jego powierzchnię.

Dyskusja

Łączniki indywidualne ceramiczne mogą być wykonywane w pewnych systemach implantologicznych jako alternatywa dla łączników standardowych lub indywidualnych abutmentów hybrydowych. Powstają one po zaprojektowaniu w programie CAD na podstawie skanowania modelu roboczego w skanerze optycznym. Następnie na podstawie zgromadzonych w bibliotece implantów i dostosowanych do nich łączników oraz zeskanowanego indywidualnie profilu wyłaniania przedziąsłowego możliwe jest zaprojektowanie przez technika łącznika, który jest indywidualnie dostosowany zarówno do kształtu tkanek miękkich, jak i szerokości podstawy i wysokości przyszłej nadbudowy. Łącznik wykonywany jest w tradycyjnej technologii frezowania we frezarce CNC (Computerized Numerical Control), a następnie podlega synteryzacji. Wykonanie łącznika w tej technologii pozwala na optymalne podparcie tkanek miękkich i uzyskanie

zadowalającego efektu estetycznego. Wadą tych łączników jest ich kruchość, może to ograniczać możliwość stosowania tej technologii w praktyce klinicznej. Dostępne są systemy, które dają możliwość wykonywania łączników całoceramicznych, co zależne jest od geometrii gniazda implantu i możliwości wykonania tego elementu bez narażenia go na niebezpieczeństwo uszkodzenia w trakcie montażu i dokręcania nadbudowy protetycznej do implantu. Wszystkie elementy konstrukcji wykonane z tlenku cyrkonu muszą posiadać odpowiednią grubościennosc, co zapobiega ich pękaniu.⁹⁻¹¹

Obecnie wiele firm oferuje wykonawstwo łączników indywidualnych bądź indywidualizowanych dla prawie wszystkich systemów implantologicznych dostępnych na rynku. Jednakże mnogość rozwiązań związanych zarówno z geometrią połączenia wszczep - łącznik, a także samego implantu i jego platformy wymaga poznania właściwości mechanicznych i fizykochemicznych łączników w celu ułatwienia właściwego ich doboru.

W piśmiennictwie dostępne są badania wskazujące na niekorzystne procesy, które mogą mieć miejsce podczas użytkowania uzupełnień protetycznych wykonanych na podbudowie z tlenku cyrkonu, takie jak odpryskiwanie ceramiki licującej tzw. chipping^{3,12} czy wpływ przemiany wewnętrznej tlenku cyrkonu na jego długoczasową stabilność w warunkach jamy ustnej.^{13,14} Zachowanie się ceramiki cyrkonowej w środowisku jamy ustnej, jako materiału wykorzystywanego w wykonawstwie łączników implantologicznych jest poddawane obserwacjom klinicznym.

W badaniach laboratoryjnych przeprowadzonych w obecnej pracy dotyczących oceny topografii powierzchni ceramiki cyrkonowej z zastosowaniem w pierwszej kolejności mikroskopu elektronowego a następnie mikroskopu sił atomowych analizie poddano próbki materiału Wieland (Wieland, Niemcy) i Robocam (Robocam, Polska).

Mikroskop skaningowy jest rodzajem mikroskopu elektronowego, gdzie obraz uzyskiwany jest poprzez skupianie wiązki elektronów o średnicy do 0,1 nm, na powierzchni próbki. Omiatając badany obszar skanuje go linio-wo. Elektrony wiązki są przyspieszane w polu elektrycznym, a następnie skupione w soczewkach elektromagnetycznych. Dzięki odchyłaniu się cewek następuje skanowanie próbki. Większość elektronów zostaje w materiale i na skutek różnego rodzaju oddziaływań traci energię emitując elektrony wtórne, światło bądź promieniowanie rentgenowskie. Przy wykorzystaniu określonego detektora promieniowania można uzyskać obraz próbki. Układ może być wyposażony w wiele detektorów.

Podczas obserwacji próbek pod mikroskopem dokonano pomiaru wielkości ziarna. Norma ISO¹⁵ podaje, że przekątna ziarna nie powinna przekraczać 0,4 µm. Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono, że obie próbki zarówno z ceramiki Wieland, jak i Robocam przekraczają granicę normy ponad dwukrotnie. Różnica w wielkości ziaren jest prawdopodobnie spowodowana tym, że próbki ceramiki poddawane były procesowi spiekania, który powoduje znaczny rozrost ziarna.^{15,16}

Badania mikrostruktury wskazały na błędy prasowania materiału Wieland, o czym świadczą obserwowane przestrzenie międzyagregatowe i międzyziarnowe. Zagęszczenia w ceramice Wieland były wyraźnie mniejsze niż w ceramice Robocam. *Jaegermann* i wsp.¹⁴ podają, że pory międzyagregatowe i międzyziarnowe mogą mieć wpływ zarówno na właściwości mechaniczne, jak i gęstość pozorną materiału. Można zatem stwierdzić że homogenność materiału Wieland jest mniejsza i charakterystyka ta może mieć wpływ na jego właściwości mechaniczne.

Ocenę topografii powierzchni materiałów prowadzono przy użyciu mikroskopu sił atomowych AFM. W badaniach wykazano, że materiał Robocam charakteryzuje się

większymi wartościami współczynnika RMS oraz Ra. Zobrazowanie morfologii powierzchni obu materiałów wykazuje dużą nierównomierność, o czym świadczą rozszerzone histogramy rozkładu wysokości na obrazach 2D. Pochylenie otrzymanych obrazów spowodowane może być kształtem geometrycznym badanych łączników, co w nieznacznym stopniu mogło wpływać na kształt histogramu oraz wartości minimalnej i maksymalnej wysokości. Większe wartości RMS oraz Ra sprzyjają większej przyczepności warstw nakładanych na jego powierzchnię.

Wnioski

Wartość współczynnika RMS i Ra oraz homogenność materiału ceramicznego mogą mieć wpływ na późniejszy stopień adhezji systemów łączących łącznik implantologiczny z koroną protetyczną.

Piśmiennictwo

1. *Kern M, Knode H*: The all-ceramic, resin bonded bridge. *Quintess Int* 1991; 22: 257-262.
2. *Niewiadomski K, Szczepanik A*: Empress II nowe możliwości estetycznych uzupełnień protetycznych. VIP Warszawa, 2002.
3. *Schmitter M, Mussotter K, Rammelsberg P*: Clinical performance of extended zirconia frame – works for fixed dental prostheses: two-year results. *J Oral Rehabil* 2009; 36: 610-615.
4. *Sumi T, Braian M, Shimada A*: Characteristics of implant – CAD/CAM abutment connections of two different internal connection systems. *J Oral Rehab* 2012; 39, 5: 391-398.
5. *Bączkowski B, Ziębowicz A, Ziębowicz B, Wojtyńska E, Mierzwińska-Nastalska E*: Badania twardości i chropowatości tlenku cyrkonu stosowanego w wykonawstwie łączników implantologicznych. *Protet Stomatol* 2020; 1: 33-43.

6. *Gotszalk TP*: Systemy mikroskopii bliskich oddziaływań w badaniach mikro- i nanostruktur, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2004.
7. *Howland R, Benatar L*: STM/AFM. Mikroskopy ze skanującą sondą – element teorii i praktyki, WIM PW, Warszawa, 2002.
8. www.parkAFM.com, instrukcja obsługi mikroskopu AFM XE-100 Park Systems.
9. *Manicone PF, RossiIometti P, Rafaelli L*: An overview of zirconia ceramics basic properties and clinical applications. *J Dent* 2007; 35: 819-826.
10. *Ozkurt Z*: Clinical success of zirconia in dental application. *Int J Prosthodont* 2010; 19: 64-68.
11. *Kelly JR, Denry I*: Stabilized zirconia as a structural ceramics; an overview. *Dent Mater J* 2008; 24: 289-298.
12. *Ortorp A, Kihl M, Carlsson G*: A 3-year retrospective and clinical follow-up study of zirconia single crowns performed in a private practice. *J Dent* 2009; 37: 731-736.
13. *Kohorst B, Brinkmann H, Li J*: Marginal accuracy of four – unit zirconia fixed dental prostheses fabricated using different computer – aided manufacturing systems. *Eur J Oral Sci* 2009; 116: 319- 325.
14. *Jaegermann Z, Michalik R*: Materiały ceramiczne dla protetyki stomatologicznej – badanie właściwości fizycznych i mikrostruktury tworzyw cyrkonowych. *Szkło i Ceramika*, 2010.
15. ISO 13356: 2008 (E), Implants for surgery – Ceramic materials based on yttria – stabilized tetragon al zirconia (Y-TZP).
16. *Zych Ł*: Formowanie i spiekanie nanometrycznego proszku tlenku cyrkonu. Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2006.

Zaakceptowano do druku: 25.06.2020

Adres autorów: 02-097 Warszawa, ul. Binieckiego 6.

© Zarząd Główny PTS 2020.