

MICHAŁ PENKOWSKI<sup>1</sup>, BARBARA KOCHAŃSKA<sup>2</sup>, KATARZYNA LEWANDOWSKA<sup>1</sup>,  
JERZY WTOREK<sup>3</sup>, ADAM WĄSEK<sup>2</sup>, BART TRUYEN<sup>5</sup>, PETER BOTTENBERG<sup>4</sup>

## **ZASTOSOWANIE SPEKTROSKOPII DIELEKTRYCZNEJ DO BADANIA SZKLIWA ZĘBÓW LUDZKICH**

### **APPLICATION OF DIELECTRIC SPECTROSCOPY FOR CHARACTERIZATION OF HUMAN DENTAL ENAMEL**

<sup>1</sup> Katedra i Zakład Fizyki i Biofizyki AM w Gdańsku  
kierownik: prof. dr Bartłomiej Kwiatkowski

<sup>2</sup> Katedra i Zakład Stomatologii Zachowawczej AM w Gdańsku  
kierownik: dr hab. Barbara Kochańska

<sup>3</sup> Katedra Inżynierii Biomedycznej Wydziału Elektroniki PG  
kierownik: prof. dr Antoni Nowakowski

<sup>4</sup> Department of Electronics and Information Processing,  
Faculty of Applied Sciences, Vrije Universiteit Brussel  
kierownik: prof. Ian Cornelis

<sup>5</sup> Department of Restorative Dentistry, Vrije Universiteit Brussel  
kierownik: prof. dr Peter Bottenberg

W pracy przedstawiono zastosowanie spektroskopii dielektrycznej do oceny integralności szkliwa zębów ludzkich. Metoda ta pozwala na szybkie i nieinwazyjne badanie stanu integralności szkliwa oraz detekcję zmian w strukturze szkliwa spowodowanych pęknięciami, demineralizacją i próchnicą w sytuacjach, gdy wizualna ocena zmiany jest mocno utrudniona lub niemożliwa. Wyniki pomiarów przeprowadzonych na ekstrahowanych zębach ludzkich wykazują wysoką specyficzność metody i pozwalają na rozróżnienie pomiędzy szkliwem nieuszkodzonym a zmienionym chorobowo.

Pomimo istotnego postępu w stomatologii, jaki dokonał się w ostatnich latach, wykrywanie zmian szkliwa mogących być prekursorami próchnicy jest jednym z najistotniejszych zadań stomatologii. Szczególnie trudne do wykrycia są pęknięcia szkliwa. W związku z ich małymi rozmiarami często nie poddają się one detekcji metodami barwnikowymi czy ocenie wizualnej. Podobna sytuacja jest w przypadku zmian powstających na powierzchniach stycznych w miejscu kontaktu dwóch sąsiadujących zębów. Trudna dostępność tych powierzchni do oceny wizualnej stwarza duże niebezpieczeństwo rozwoju próchnicy aż do stadiów zaawansowanych, zanim zostanie podjęta interwencja terapeutyczna.

Szkliwo zębów jest najtwardszą substancją występującą w organizmie ludzkim. Związane jest to z jego budową. Pryzmaty krystaliczne hydroksyapatytu tworzące podstawowy zrąb struktury szkliwa mają cechy doskonałego izolatora. Przestrzenie międzykrystaliczne wypełnione materią organiczną są jedynymi szlakami mogącymi brać udział w przewodzeniu prądu w wyniku ruchu jonów. W przypadku demineralizacji dochodzi do zmniejszenia zawartości substancji mineralnych. Powoduje to ułatwienie przenikania wody przez przestrzenie międzykrystaliczne wraz z jonami. Następuje zmiana własności elektrycznych szkliwa przejawiająca się w obniżeniu oporności. Fakt ten przyciągał uwagę od dość dawna i pierwsze próby wykorzystania pomiarów elektrycznych sięgają roku 1956 [1]. Pomiarów przeprowadzano zazwyczaj za pomocą prądu stałego. Wartości oporności uzyskanych tą metodą były niestabilne i charakteryzowały się niską powtarzalnością. Jest to spowodowane występowaniem zjawiska polaryzacji elektrycznej, szczególnie silnie występującego przy pomiarach prądem stałym. Stosowanie elektrod niepolaryzujących się (kalomelowych, chlorkowo-srebrowych) nie daje dobrych rezultatów, ponieważ elektrody te mają odtwarzalny potencjał jedynie przy niskich natężeniach prądu. W przypadku oceny struktur szkliwa o małej wartości oporności takich jak próchnica, potencjał elektrody zmienia się powodując zafałszowanie pomiaru. Polaryzacja elektrodowa zostaje wyeliminowana podczas pomiarów za pomocą prądu zmiennego o odpowiednio wysokiej częstotliwości [2, 3]. Niedostatkim metody jest fakt, że impedancja szkliwa zdrowego i uszkodzonego zależy w różny sposób od częstotliwości i pomiar przy arbitralnie wybranej wartości częstotliwości może nie dawać jednoznacznej odpowiedzi co do stanu szkliwa. Kwestia doboru optymalnej częstotliwości pomiarowej może zostać wyeliminowana przez dokonanie pomiarów w szerokim paśmie częstotliwości. W wyniku otrzymuje się zależność składowych impedancji od częstotliwości czyli widmo impedancji. Charakter widma impedancji zależy od procesów biorących udział w przewodzeniu prądu zmiennego przez szkliwo. Jak wiadomo z badań wstępnych szkliwo nieuszkodzone, zdemineralizowane oraz pęknięcia czy próchnica mają wartości przewodności różniące się nawet o kilka rzędów wielkości [4]. Pomiarów impedancji były wykonane dla jednej wartości częstotliwości i nie dają jednoznacznej odpowiedzi, czy stosowana częstotliwość pozwala na najlepsze możliwe rozróżnienie szkliwa nieuszkodzonego od uszkodzonego.

## CEL PRACY

Celem pracy było stwierdzenie, czy za pomocą pomiarów widma impedancji szkliwa zębów ludzkich można znaleźć takie cechy widma, które mogą służyć za jednoznaczny wskaźnik zmian szkliwa zwiastujących stadia wstępne próchnicy.

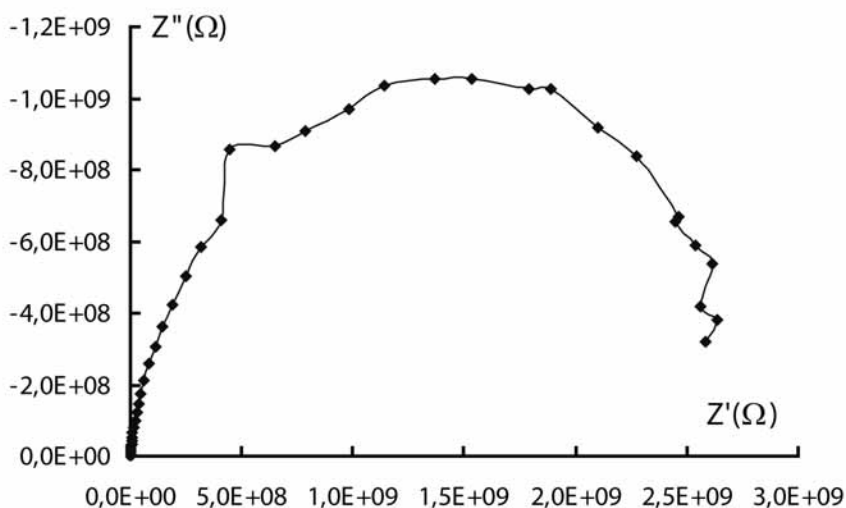
## MATERIAŁY I METODY

Do badań wykorzystano zęby ludzkie pozyskane w wyniku ekstrakcji. Zęby od chwili ekstrakcji przechowywane były w roztworze soli fizjologicznej. Przygotowanie zębów do pomiarów obejmowało umieszczenie w 0,1 molowym roztworze wodnym KCl. Po ustaleniu równowagi (kontrola konduktometryczna) zęby przygotowano do pomiarów. Po osuszeniu zębów umieszczano w specjalnym uchwycie i zalewano żywicą akrylową tworząc pierścień izolacyjny oddzielający koronę od korzenia. Pierścień ten służył jako uchwyt do mocowania zęba w ko-

morze pomiarowej oraz miała za zadanie wyeliminowanie prądów płynących po powierzchni szkliwa. Następnie odcinano korzeń i po rozwierceniu kanału wprowadzano do jego wnętrza drut Ag, pozostawiając wystający koniec na długość około 1 cm. Ząb mocowano w komorze pomiarowej wypełnionej 0,1 molowym KCl tak, aby korzeń był zanurzony w roztworze. Pierścień izolacyjny zakrywał całe wnętrze komory uniemożliwiając parowanie wody. Jako elektrodę pomiarową stosowano elektrodę igłową AgCl. Siła nacisku elektrody była stała i równa 1 N. Jako drugą elektrodę stosowano blaszkę srebrną elektrolitycznie pokrytą AgCl i umieszczoną w roztworze mającym kontakt z korzeniem [4]. Pomiar impedancji wykonywano w zakresie częstotliwości od 1 Hz do 100 kHz za pomocą analizatora impedancji Solartron 1260A, wyposażonego w przystawkę do pomiaru impedancji typ 1294A. Amplituda sygnału pomiarowego była równa 1 V. Wszystkie pomiary były wykonane w temperaturze pokojowej. Do pomiarów wykorzystano 8 zębów: 3 przedtrzonowe oraz 5 trzonowych. Liczba punktów pomiarowych dla pojedynczego zęba była równa od trzech do dziewięciu. Punkty pomiarowe obejmowały zarówno szkliwo bez widocznych zmian jak i miejsca z widocznymi zmianami (demineralizacja, pęknięcia, próchnica). Weryfikację stanu szkliwa przeprowadzono po wykonaniu pomiarów elektrycznych. Wybrane zęby poddano cięciu na pile diamentowej wraz z rejestracją stanu szkliwa metoda fotograficzną.

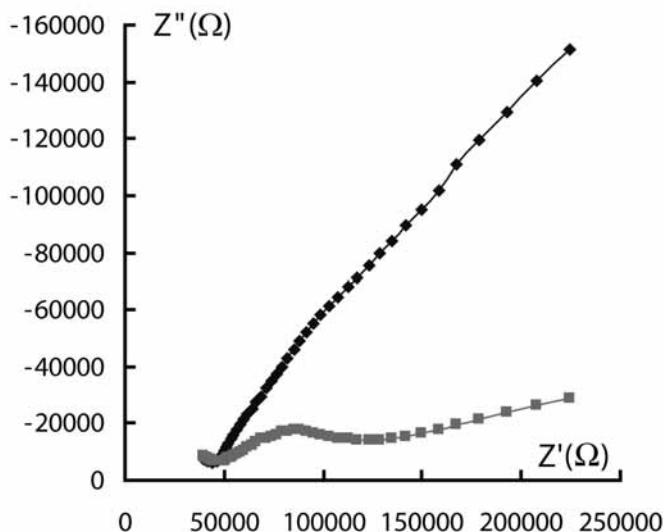
## WYNIKI

Jako wynik pojedynczego cyklu pomiarowego uzyskiwano widmo impedancji. Widmo to jest prezentowane jako wykres Cole'a-Cole'a [5] czyli funkcja w kartezjańskim układzie współrzędnych, gdzie na osi odciętych przedstawiona jest składowa rzeczywista impedancji



Ryc. 1. Wykres Cole'a-Cole'a dla szkliwa nieuszkodzonego. Nieregularny kształt wykresu spowodowany jest zakłóceniami w zakresie niskich częstotliwości oraz składową o częstotliwości sieci

Fig. 1. Cole-Cole plot for sound enamel. Irregular shape of arc is caused by low frequency noise and spurious of the main frequency



Ryc. 2. Wykres Cole'a-Cole'a dla szkliwa z próchnicą (kwadraty) oraz dla pęknięcia szkliwa (romby)  
 Fig. 2. Cole-Cole plot for enamel with cavities (squares) and for crack of enamel (diamonds)

a na osi rzędnych składowa urojona. Częstotliwość jest tu parametrem (ryc. 1). Wyznaczone widma można podzielić na dwie kategorie.

Pierwsza to wykresy mające charakter regularnego łuku lub jego odcinka (ryc. 1). We wszystkich przypadkach obie składowe impedancji osiągają duże wartości rzędu setek megomów.

Druga kategoria to widma pozostałe o charakterze nieregularnym, składające się z wycinków dwóch łuków lub odcinka prostoliniowego (patrz ryc. 2).

Wszystkie widma drugiego typu mają jedną wspólną cechę: wartości obu składowych impedancji są o kilka rzędów wielkości mniejsze niż w pierwszej kategorii. Wyniki wykazują dużą powtarzalność i kilkakrotna rejestracja widma dla tego samego punktu w różnych odstępach czasu nie zmienia charakteru widma. Widma pierwszej kategorii związane są z punktami szkliwa, w których nie zaobserwowano na przekroju zęba odstępstwa od stanu prawidłowego. W przypadku widm drugiej kategorii w każdym przypadku stwierdzono zmiany w szkliwie w mierzonym punkcie. Zmiany te to: demineralizacja sięgająca zębiny, pęknięcia szkliwa, początkowe stadia próchnicy (głównie w rejonie bruzd na powierzchni zgryzu) oraz przypadki złożone, zawierające więcej niż jedno wymienione zjawisko.

## DYSKUSJA

Własności elektryczne szkliwa i zębiny wykazują istotne różnice. Oporność właściwa nieszkodzonego szkliwa jest o około trzy rzędy wielkości większa od oporności właściwej

zębiny [6]. Główną przyczyną tego faktu jest znaczna różnica pomiędzy spistością struktury obu tkanek zęba. W przypadku zębiny duża zawartość materii organicznej tworzy szlaki dla dyfuzji wody wraz z jonami, natomiast szkliwo nieuszkodzone o małej zawartości materii organicznej i wody posiada cechy dobrego izolatora. Dlatego pomiar impedancji za pomocą dwóch elektrod, z których jedna umieszczona jest w kanale zęba, a druga pozostaje w kontakcie z zewnętrzną powierzchnią szkliwa, wyznacza głównie impedancję szkliwa. W przypadku zmian w szkliwie, zwiększających jego przepuszczalność wody, przejawia się to w zmianach impedancji układu. Widmo impedancji, posiadające kształt regularnego łuku o środku na osi odciętych, można scharakteryzować za pomocą układu zastępczego, w którym podstawowymi elementami są równolegle połączone rezystancja i pojemność (układ RC). Każdy układ RC charakteryzuje częstotliwość charakterystyczna, zwana częstotliwością relaksacyjną. Jest to częstotliwość, przy której składowa rzeczywista i urojona impedancji są sobie równe. Gdy wykres Cole'a-Cole'a wykazuje odstępstwa od opisanego kształtu, świadczy to o istnieniu w schemacie zastępczym więcej niż jednego czasu relaksacji i nie jest możliwe użycie przedstawionego prostego modelu. W sytuacji, gdy istnieje ciągle widmo rozkładu czasów relaksacji układu, można zastosować w schemacie zastępczym element o stałej fazie (tzw. *constant phase element* – CPE). Taka sytuacja ma miejsce w przypadku widm dla nieuszkodzonego szkliwa. W wyniku procedury modelowania uzyskuje się cztery parametry:

1. oporność równoległą  $R_p$
2. pojemność równoległą  $C_p$
3. parametr  $\alpha$  charakteryzujący CPE
4. parametr T charakteryzujący CPE.

Jako parametr służący do oceny stanu szkliwa wykorzystuje się  $R_p$ . Duża wartość  $R_p$  świadczy o małym sumarycznym przekroju dróg dyfuzji wody w szkliwie, natomiast zmniejszenie  $R_p$  wskazuje na ubytek substancji mineralnej, powodujący zwiększenie procentowego udziału w szkliwie materii organicznej odpowiedzialnej za transport wody. Dla szkliwa uszkodzonego kształt wykresu jest bardziej skomplikowany i nie poddaje się aproksymacji za pomocą tak prostego modelu jak dla szkliwa zdrowego. Charakter modelu dla szkliwa uszkodzonego jest zależny od kształtu widma i nie istnieje możliwość utworzenia jednego wspólnego typu modelu dla różnych kształtów widma. Istotną cechą odróżniającą widmo szkliwa patologicznego od widma szkliwa zdrowego jest niska wartość obu składowych impedancji. Widma składające się z fragmentów dwóch lub więcej łuków świadczą o występowaniu więcej niż jednego czasu relaksacji w układzie. Komplikacja tego typu spowodowana jest pojawieniem się dodatkowych zjawisk. W relatywnie szerokich przestrzeniach międzykrystalicznych dyfuzja molekuł wody wraz z zawieszonymi w niej jonami przestaje być procesem jednowymiarowym. Sprawia to, że pojawiają się dodatkowe czasy relaksacji, które nie są obserwowane podczas transportu elektrolitów przez wąskie szczeliny. Ciągły rozkład rozmiarów struktur odpowiedzialnych za przewodzenie elektrolitów przez szkliwo sprawia, że mamy do czynienia z ciągłym rozkładem czasów relaksacji układu ograniczonym do pewnych przedziałów wartości. Stwarza to konieczność wprowadzenia większej liczby swobodnych parametrów modelu, które wymagają dopasowania. Analizując sytuację należy mieć na uwadze fakt, że niniejsze badania mają na celu weryfikację spektroskopii impedancyjnej jako metody stosowanej w praktyce klinicznej. W tym przypadku przestaje być istotna dokładna wartość elementów modelu, natomiast podstawowym problemem jest niezawodność różnicowania szkliwa zdrowego od uszkodzonego, bez wnikania w charakter uszkodzenia. Biorąc pod uwagę dwa parametry:

1. kształt widma

2. średnie wartości składowych impedancji

można w świetle przedstawionych wyników uzyskać różnicowanie stanu szkliwa z bardzo dużą wiarygodnością. Istotnym ograniczeniem metody wydaje się niska dostępność aparatury umożliwiającej pomiar widma impedancji w zakresie dużych wartości obu składowych impedancji charakteryzujących szkliwo zębów ludzkich.

## PIŚMIENNICTWO

1. Mumford J. M.: Relationship between the electrical resistance of human teeth and the presence and extent of dental caries. *Br. Dent. J.* 1956, 100, 239. – 2. Matsumoto H., Fearnhead R. W.: On the ability to correlate changes in electrical impedance with the formation of subsurface lesions in tooth enamel. *J. Dent.* 1980, 8, 4, 355. – 3. Matsumoto H.: Some problems involved in measurement of electrical impedance of carious teeth. *J. Dent.* 1981, 9, 1, 43. – 4. Penkowski M., Kochańska B., Wtorek J., Truyen B., Bottenberg P., Wąsek A.: Pomiary impedancji szkliwa zębów w zakresie niskiej częstotliwości. *Ann. Acad. Med. Gedan.* 2003, 33, 179. – 5. Pethig R., Kell D. B.: The passive electrical properties of biological systems: their significance in physiology, biophysics and biotechnology. *Phys. Med. Biol.* 1987, 32, 8, 933. – 6. Levinkind M., Vandernoot T. J., Elliott J. C.: Electrochemical impedance characterization of human and bovine enamel. *J. Dent. Res.* 1990, 69, 12, 1806.

M. Penkowski, B. Kochańska, K. Lewandowska, J. Wtorek, A. Wąsek, B. Truyen, P. Bottenberg

### APPLICATION OF DIELECTRIC SPECTROSCOPY FOR CHARACTERISATION OF HUMAN DENTAL ENAMEL

#### Summary

The present study was carried out to investigate the impedance spectroscopy as a method for determination of the state of dental enamel. All impedance measurements were made using frequency response analyser Solartron 1260A with the impedance measuring unit 1294A. Impedance spectra were obtained in the frequency range from 1 Hz to 100 kHz. Enamel of ten teeth was measured. Four different states of dental enamel were measured: sound enamel, demineralized, cracks and cavities. In all cases of intact enamel were obtained similar impedance spectra presented as Cole-Cole plots. Those plots had regular shape of arc or part of arc. All other cases resulted in distorted spectra consisted of several arcs or irregular line. In the case of sound enamel, both components of impedance spectra had values several orders of magnitude higher than the decayed enamel. In spite of fact that spectra of different stages of enamel decay have great variety of shapes, it is possible to recognise sound enamel only taking into consideration the shape of Cole-Cole plot and the mean value of both components of the impedance.

Adres: dr Michał Penkowski

Katedra i Zakład Fizyki i Biofizyki AMG

ul. Dębinki 1, 80-211 Gdańsk

e-mail: mipen1@wp.pl