

Małgorzata Lange

ZASTOSOWANIE ULTRADŹWIĘKOWEJ METODY ECHA W DIAGNOSTYCE STOMATOLOGICZNEJ

Streszczenie. W artykule ukazano ultradźwięki, jako nowe źródło informacji diagnostycznej w stomatologii. Przedyskutowano przejście ultradźwięków przez ząb i omówiono parametry elektroakustyczne głowicy ultradźwiękowej. Podano wyniki wstępnych badań eksperymentalnych struktury podpowierzchniowej zęba.

1. Stan zagadnienia

Diagnostyka stomatologiczna od dawna nie dopracowała się nowych metod badawczych, a jej możliwości są dość ograniczone ze względu na specyficzną budowę zęba i trudności penetracyjne. Diagnostykę ultradźwiękową można uznać za atrakcyjną, ponieważ badanie ultradźwiękami jest nieszkodliwe, powtarzalne i w odróżnieniu od badań rentgenowskich, genetycznie bezpieczne. Poza tym, przy zastosowaniu technik impulsowych, natężenie ultradźwięków (rzędu dziesiątych części $[mW/cm^2]$ w impulsie) nie powoduje zmian w badanych strukturach biologicznych.

Ultradźwięki w stomatologii zaczęto stosować w celu dostarczenia lekarzom nowych informacji o zębach, kościach i tkankach miękkich jamy ustnej. Wcześniejsze zastosowania dotyczyły wykorzystania funkcji mechanicznej ultradźwięków (wiertła dentystyczne) [1], dalsze poszły w kierunku diagnostyki stomatologicznej [2] [3] [4] i sprowadzały się do:

- prób wykrywania wczesnych zmian próchnicowych, niedostrzegalnych z punktu widzenia metod klasycznych,
- badań warstwy przejściowej między zębem i amalgamatowym materiałem wypełniającym, przy pomocy których można by określić jakość nakładanych wypełnień,
- zbadania możliwości monitorowania dynamiki demineralizacji powierzchni szkliwa, co dałoby pogląd na mechanizm powstawania próchnicy zębowej,
- wnikanie przy pomocy ultradźwięków do komory miazgowej w celu stwierdzenia zwyrodniającego zapalenia miazgi zębowej, czego nie można wykryć metodami klasycznymi.

Poniżej przedstawiono analizę przejścia ultradźwięków przez ząb, podano trudności, z którymi zetknęła się autorka przy pierwszych w kraju próbach wykorzystania metod odbicia impulsowego do badań takiej struktury jak

zęb. Podano opis głowicy ultradźwiękowej zastosowanej w próbach eksperymentalnych i wyniki tych prób.

2. Analiza przejścia ultradźwięków przez zęb

Warunki propagacji fal ultradźwiękowych są zależne od wielu własności ośrodka, w którym te fale się rozchodzą. Własności akustyczne ośrodka charakteryzuje między innymi impedancja akustyczna Z :

$$Z = \rho c \quad (1)$$

ρ - gęstość ośrodka [kg/m^3]

c - prędkość fali ultradźwiękowej w danym ośrodku [m/s].

Fala ultradźwiękowa w postaci krótkiego impulsu, padając na granicę dwóch ośrodków, różniących się parametrami akustycznymi, częściowo odbija się od niej, a częściowo przenika do następnego ośrodka. Współczynniki odbicia i przenikania wyrażane wzorami (2) i (3), zależą od impedancji akustycznych tych ośrodków:

$$k_I = \frac{I_{\text{ODB}}}{I_{\text{PAD}}} = \left(\frac{\rho_2 c_2 - \rho_1 c_1}{\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1} \right)^2 = \left(\frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \right)^2 \quad (2)$$

$$q_I = \frac{I_{\text{PRZEN}}}{I_{\text{PAD}}} = \frac{4\rho_1 c_1 \rho_2 c_2}{(\rho_2 c_2 + \rho_1 c_1)^2} = \frac{Z_1 Z_2^4}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (3)$$

k_I - współczynnik odbicia,

q_I - współczynnik przenikania,

I - natężenie fali (odbitej, padającej, przenikającej),

Z_1 - impedancja akustyczna ośrodka 1,

Z_2 - impedancja akustyczna ośrodka 2.

Fala ultradźwiękowa, poza zjawiskami odbicia i przenikania, może ulec załamaniu (zgodnie z prawem Snelliusa) jak i dyfrakcji, która może wystąpić, gdy ośrodek nie jest jednorodny (dla zęba w przybliżeniu zakłada się jednorodność poszczególnych tkanek). Po uwzględnieniu strat energii, związanych z tłumieniem fal ultradźwiękowych w danym ośrodku, natężenia zmniejsza się w funkcji odległości zgodnie ze wzorem:

$$I = I_0 e^{-\delta x} \quad (4)$$

I_0 - natężenie początkowe (dla $x = 0$) [mW/cm^2],

x - odległość [cm],

δ - współczynnik tłumienia [$1/\text{cm}$],

I - natężenie fali w odległości x .

Jeżeli po wprowadzeniu do danej struktury biologicznej impulsu ultradźwiękowego, zaobserwuje się echa, można obliczyć odległości granic poszczególnych rodzajów tkanek od źródła ultradźwięków, korzystając ze wzoru:

$$l = \frac{tc}{2} \quad (5)$$

t - czas między wysłanym impulsem a powrotnym echem,
c - prędkość ultradźwięków w badanej tkance,
l - odległość granicy tkanek od przetwornika.

Z informacji zawartej w amplitudzie echa o wiele trudniej skorzystać, ponieważ amplituda nie tylko zależy od własności tłumiących poszczególnych tkanek, ale i od kształtu, wielkości i nachylenia ich granic rozdziału względem padającej fali. Wykres zależności wielkości amplitudy echa od kąta nachylenia powierzchni odbijającej jest podany w pozycji [5]. Ząb ze względu na swoją warstwową budowę (szkliwo - zębina - miazga - zębina - szkliwo), wydaje się być odpowiednim obiektem biologicznym do badań za pomocą ultradźwięków. Tym bardziej, że poszczególne rodzaje tkanek zęba mają zróżnicowane własności akustyczne (tabl. 1):

Tablica 1

Parametry akustyczne tkanek zębowych [4]

Tkanka	Gęstość [10^3 kg/m^3]	Prędkość c [m/s]	Impedancja Z [$10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$]	Tłumienie [dB/mm] 18 [MHz]
Woda	1	1500	1,5	0,12
Miazga	1	1500	1,5	2
Zębina	2,05-2,35	4000	8,5	8
Szkliwo	2,89-3,00	4500	13	12
Cement	2,02-2,04	3200	6,5	20

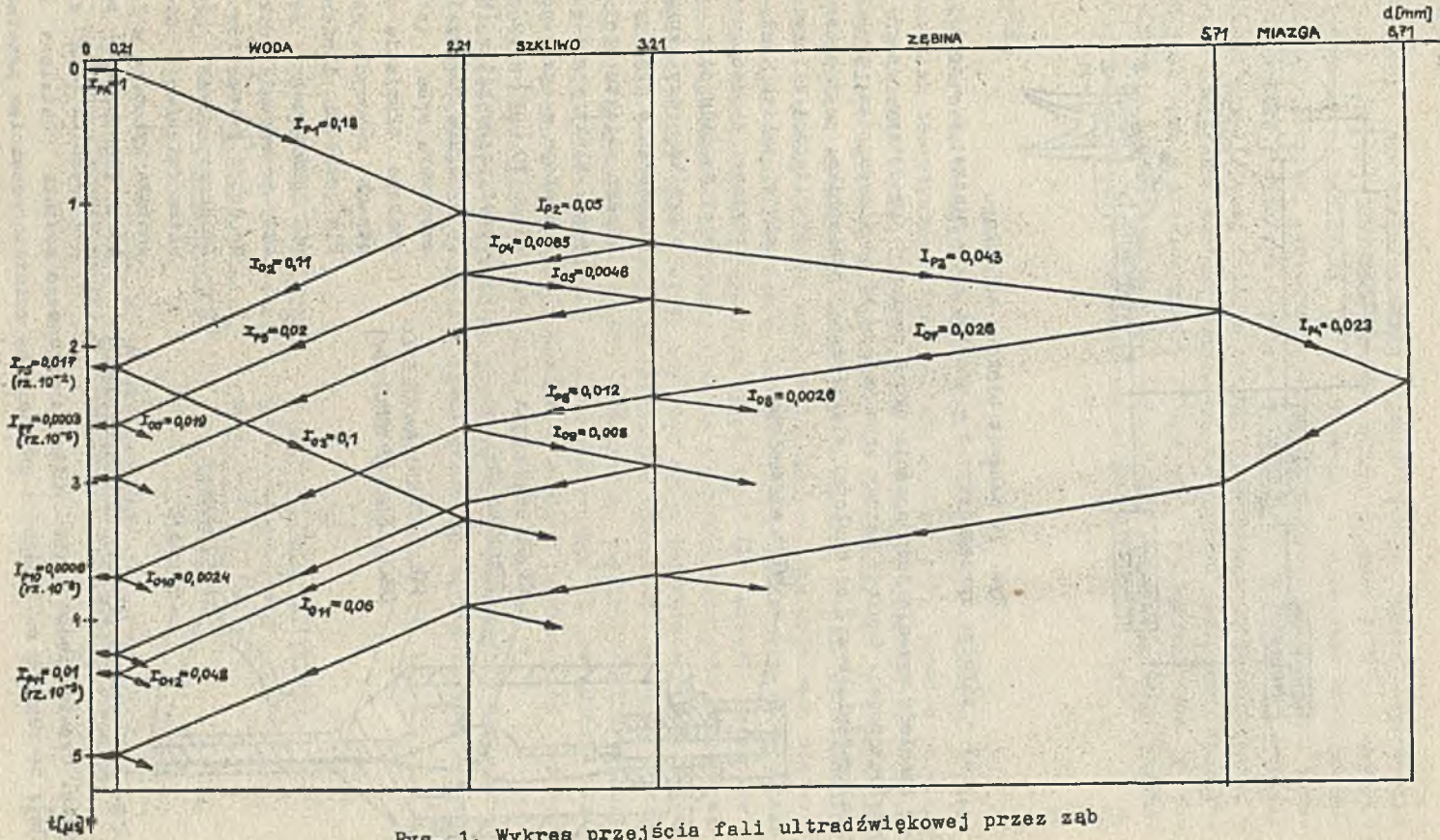
Tablica 1 podaje gęstości, tłumienia, prędkości propagacji i impedancje akustyczne poszczególnych tkanek zębowych. Okazuje się, że wartości te zmieniają się od próbki do próbki i nawet w próbkach wziętych z tego samego obiektu. W 1969 r. F.E. Barber zestawiał [6] wyniki uzyskane przez różnych autorów i pojawiły się rozbieżności rzędu kilkuset [m/s] dla prędkości propagacji i kilku [$10^6 \text{ kg/m}^2\text{s}$] dla impedancji akustycznych. W tej sytuacji skorzystano z doświadczeń innych autorów i nie dokonywano takich pomiarów. Ścisłe ilościowe obliczenia dotyczące odbicia fal ultradźwiękowych od granic różnych ośrodków i tak można przeprowadzić tylko dla regularnych kształtów tych granic. Jednak analiza taka pozwala na oszacowanie rzędu wielkości otrzymywanych praktycznie impulsów, jak i czasowych korelacji między nimi i została przeprowadzona. W tym celu zakłada się, że ząb jest strukturą symetryczną i zajęto się przejściem ultradźwięków przez warstwy: szkliwo - zębina - miazga. Dla obliczenia odstępów czasowych między pojawiają-

cyymi się impulsami, przyjęto przeciętne grubości poszczególnych warstw zęba. Odległości czasowe oblicza się korzystając ze wzoru 5. Czas przejścia fali ultradźwiękowej przez 1 mm warstwę szkliwa wynosi ok. 160 [ns], natomiast echo pojawi się po 320 [ns]. Jeżeli obie powierzchnie szkliwa (ta granicząca z zębina i ta z ośrodkiem sprzęgającym) mają być rozróżnialne, czas trwania impulsu powinien być znacznie krótszy niż 320 [ns]. I tak dla 12 [MHz], długość impulsu ultradźwiękowego zawierającego 3 okresy w.cz. (minimalna ilość) wynosi 250 [ns], ale już impuls o 4 okresach w.cz. trwa dłużej niż 320 [ns] i warstwa szkliwa zostanie zobrazowana tylko jedynym i to zniekształconym impulsem, a nie dwoma. Dla czasu trwania impulsu 250 [ns] jego długość w zębinie wynosi 0,95 [mm], co oznacza, że jeżeli np. w zębinie są jakieś zmiany patologiczne, tworzące warstwę cieńszą niż 0,47 [mm], to zobrazować jej na ekranie echoskopu nie można. Możliwość zaobserwowania takiej zmienionej zębiny (zmienia się jej impedancja akustyczna, co teoretycznie spowoduje powstanie dodatkowego impulsu) miałyby olbrzymie znaczenie przy wykrywaniu wczesnych zmian próchnicowych, po wstających w komorze zamkniętej - pod wypełnieniem.

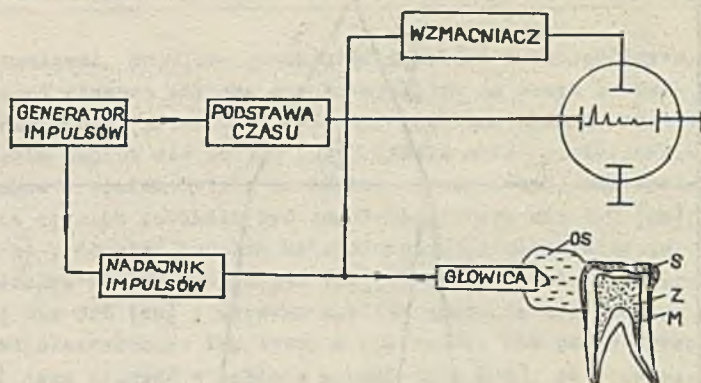
Grubość 2-milimetrowej warstwy wody, jako ośrodka sprzęgającego, jest konieczna ze względu na strefę martwą echoskopu. Rys. 1 w sposób poglądowy przedstawia przejścia i odbicia fal ultradźwiękowych w zębie. Przy założeniu, że natężenie fali padającej $I_{pa} = 1$, znajomość współczynników odbicia k_{In} i przejścia q_{In} (wzory 2,3) pozwoliła obliczyć wartości I_{pn} i I_{on} ($n = 1...10$), w poszczególnych warstwach. Przy znanych czasach przejścia ultradźwięków i grubościach poszczególnych warstw, można było to przejście przedstawić w układzie współrzędnych czas-odległość. Echa znaczące to I_{p5} , I_{p7} , I_{p10} ; pozostałe są odbiciami wielokrotnymi, które mogą być przyczyną fałszywych hipotez. Może się zdarzyć, że odbicia wielokrotne mają większe amplitudy niż impulsy znaczące (wystarczy odpowiednio nachylenie pow. rozdziału) lub czasowo inaczej docierają do przetwornika, niż to wynika z analizy teoretycznej. Dlatego zawsze należy ustalić, które sygnały są odbiciami wielokrotnymi. W nawiasach podano rzędy stosunku natężenia danego echa do natężenia fali padającej po uwzględnieniu tłumienia.

3. Opis zastosowanej aparatury

W badaniach posługiwano się echoskopem typu DI-22 INCO. Rys. 2 przedstawia schemat blokowy zastosowanego echoskopu. Sterowany przez generator impulsów nadajnik wzbudza głowicę, która wysyła impulsy ultradźwiękowe do badanego obiektu. Odbite impulsy wracają do głowicy, która w tym momencie pracuje jako odbiornik i przetwarza je ponownie na sygnały elektryczne. Sygnały te wzmacniona, zdemodulowane i doprowadzone do płytek odchylenia pionowego oscyloskopu, dają odpowiednie impulsy na jego ekranie. Genera-



Rys. 1. Wykres przejścia fali ultradźwiękowej przez ząb



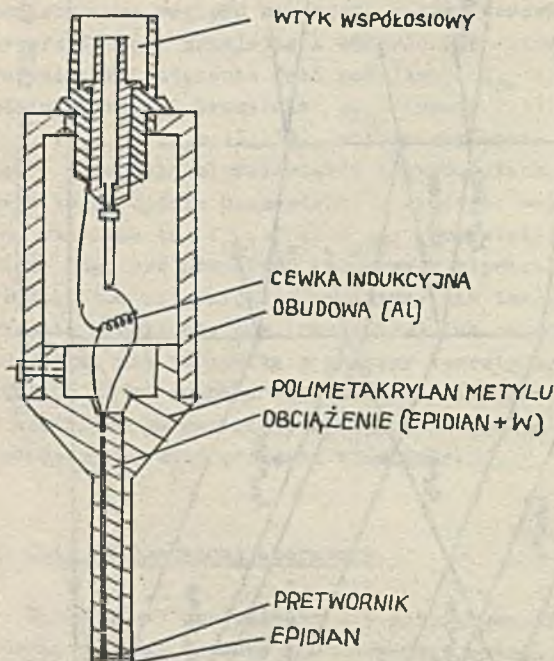
Rys. 2. Schemat blokowy echoskopu

OS - ośrodek sprzęgający; S - szkliwo; M - miażga; Z - zębina

tor impulsów wyzwała jednocześnie układ poziomej podstawy czasu lampy oscyloskopowej. Czułość metody echa zależy od mocy nadajnika, typu głowicy ultradźwiękowej, od czułości elektrycznej odbiornika, zastosowanej czę-

stotliwości i innych czynników, takich jak: elektryczne dopasowanie głowicy do nadajnika i odbiornika, czy akustyczne dopasowanie głowicy do badanego obiektu biologicznego. Elektryczna czułość echoskopu w praktyce osiąga $10 [\mu V]$ przy szerokości pasma kilka $[MHz]$.

Wymagana rozdzielczość, struktura zęba (a więc znaczne tężnienia w warstwach zębowych, niewielkie grubości i nierówności powierzchni zębów), były to czynniki dyktujące dobór parametrów elektroakustycznych głowicy ultradźwiękowej. Głowica została wykonana w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki PAN w War-



Rys. 3. Przekrój głowicy ultradźwiękowej

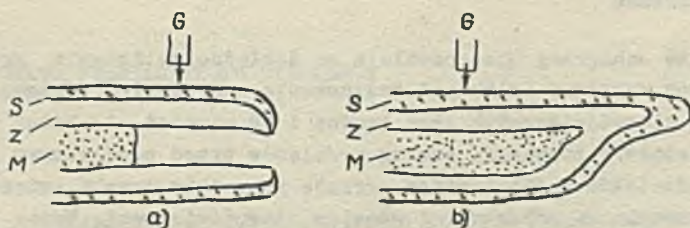
szawie. Częstotliwość przetwornika ceramicznego została ustalona na $12 [MHz]$; ze względu na trudności związane ze zminiaturyzowaniem przetwornika

ka (teoretycznie jego średnica miała wynosić 1 [mm]), udało się wyciąć krążek o $d = 2,5$ [mm]. Przekrój głowicy podano na rys. 3. W celu uzyskania małej dobroci mechanicznej Q , co zapewnia przenoszenie krótkich impulsów ultradźwiękowych, zastosowano obciążenie tylnej powierzchni przetwornika kształtką z epidianu z proszkiem wolframu. Napięcie doprowadza się za pomocą przyklejonej folii miedzianej. Powierzchnia przetwornika, w celu ochrony powleczone została bardzo cienką warstwą epidianu. Kształtkę obciążającą wraz z przetwornikiem zalano masą polimetakrylową a całość po dobraniu i wmontowaniu cewki indukcyjnej (poprawiającej parametry impulsu) umieszczono w obudowie aluminiowej.

4. Opis prób

Była to pierwsza w kraju próba takiego zastosowania echoskopu i pierwszy sprawdzian teoretycznych przewidywań, dlatego też, poświęcono wiele uwagi przygotowaniu zębów. Używano zębów ludzkich po ekstrakcji, trzymany w soli fizjologicznej lub 5% roztworze formaliny, co nie pozwoliło im na wyschnięcie. Materiał badawczy został zebrany w Klinice Stomatologicznej przy Śląskiej Akademii Medycznej w Zabrze. Nie zajmowano się ustaleniem patologii usuniętych zębów, ponieważ eksperyment potraktowano jako fazę wstępną ewentualnych przyszłych badań. Chodziło przede wszystkim o określenie przydatności wykonanej głowicy ultradźwiękowej, do prostej wizualizacji struktury zęba. Zajęto się więc próbą interpretacji otrzymywanych na ekranie echoskopu impulsów. Szklivo zębów przed badaniem ultradźwiękami było w niewielkim stopniu wyrównywane poprzez zeszlifowywanie, w celu zapewnienia równoległości powierzchni badanej i powierzchni przetwornika. Po badaniu zęby przepiklowywano i robiono rysunki ich przekrojów. Ośrodkiem sprzęgającym była woda.

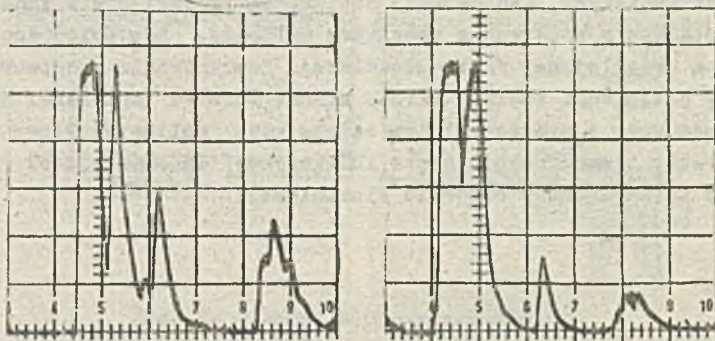
Rys. 4a przedstawia przykładowo przekrój zęba odpowiednio spreparowanego, w którym warstwa wody między dwoma warstwami zębiny imitowała zdro-



Rys. 4. Przekroje zębów

G - głowica ultradźwiękowa; S - szkliwo; M - miazga; Z - zębina;

wą miazgę (woda i miazga mają podobne własności akustyczne). Chodziło o sprawdzenie czy jest możliwe uzyskanie echa z tylnej powierzchni kanału zębowego. Wynik (rys. 5a) jest pozytywny. Pierwszy znaczący impuls (na



Rys. 5. Echogramy zębów 4a i 4b

poziomie 4,5) ma wyraźną tendencję do rozdzielania się. Jest to impuls z przejścia: woda-szkliwo i szkliwo-zębina. Ze względu na małą grubość szkliwa i nieostrą granicę: szkliwo-zębina, jest on zniekształcony. Drugi impuls (od 5,3) charakteryzuje powierzchnię rozdziału: zębina-woda, a trzeci (od 6,2) - woda-zębina. Wsuwana blaszka miedziana potwierdziła to przypuszczenie. Ostatni, zniekształcony impuls (od 8,4) jest wtórnym odbiciem impulsów scharakteryzowanych powyżej (por. rys. 1 - sygnał I_{p11}). Łatwo to można było sprawdzić, poprzez oddalenie głowicy od zęba.

Rys. 4b przedstawia analogiczną sytuację, z tym, że miazga wypełnia ząb w sposób naturalny. Impuls pochodzący od wtórnego odbicia zaczyna się od 7,8. Również i w tym przypadku nie udało się uwidocznic warstwy szkliwa, ze względu na zbyt małą rozdzielczość aparatury i zbyt szeroki impuls fali ultradźwiękowej.

5. Uwagi końcowe

Otrzymane echogramy nie pozwalają na dokładne wyliczenie grubości poszczególnych warstw a tylko ich oszacowanie. Kryterium diagnostyczne w technikach ultradźwiękowych jest trudne i tu również - do badań w stomatologii, należałoby rozwiązać szereg problemów przed powszechnym zastosowaniem ultradźwięków w diagnostyce. Przede wszystkim trzeba zwiększyć wymagania w stosunku do echoskopu i głowicy ultradźwiękowej. Można by:

- zastosować wzmacniacz o skali logarytmicznej, przez co uwidoczniłyby się odbicia z dalszych warstw,
- zwiększyć rozdzielczość aparatu a więc skrócić przede wszystkim do minimum czas trwania impulsu,

- dążyć do zmniejszenia strefy martwej echoskopu, co nie musi być konieczne, gdy znajdzie się odpowiedni ośrodek o większej niż woda impedancji akustycznej i przylepności,
- spróbować połączyć przetwornik z soczewką akustyczną ograniczającą wiązkę.

Poza tym należałoby bezwzględnie wykluczyć wstępne przygotowania (szlifowanie). Wykluczenie to jest możliwe tylko przy maksymalnym zmniejszeniu przekroju wiązki do 1 [mm²], a nawet mniej. Wiąże się to ze zminiaturyzowaniem przetwornika lub odpowiednim skupieniem wiązki.

Technika ultradźwiękowa daje duże szanse rozwoju diagnostyce stomatologicznej. W Instytucie Aparatury i Automatyki Medycznej przewidziana jest kontynuacja tych badań, mogąca przynieść duże korzyści. W prowadzeniu ich zainteresowana jest Klinika Stomatologiczna przy Śląskiej Akademii Medycznej, która zapewnia swoją pomoc i współpracę.

LITERATURA

- [1] Matauszek J.: Technika ultradźwięków, Warszawa, 1961, WNT.
- [2] Lees S., Barber F.E.: Looking into the tooth and its surfaces with ultrasonics. Ultrasonics, April 1971, 95-100.
- [3] Lees S., Barber F.E.: Looking into teeth with ultrasound. Science, 161, 1968, 477-478.
- [4] Kossoff G., Sharpe C.J.: Examination of the Contents of the pulp cavity in teeth. Ultrasonics, 4, April 1966, 77-83.
- [5] Kossoff G., Sharpe C.: Ultrasonic Examination of pulp Cavity in Teeth. Proceedings of the Workshops of the 9-th International Conference on Medical and Biological Engineering, Workshop No 6, Melbourne, Australia 1971.
- [6] Barber F.E., Lees S., Lobene R.R.: Ultrasonic Pulse-echo measurements in teeth, Archives of Oral Biology, 14, 1969, 745-760.

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ОТРАЖЕНИЯ В СТОМАТОЛОГИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ

Р е з ю м е

В статье представлен ультразвук как новый источник диагностической информации в стоматологии. Обсуждено вопрос прохождения ультразвука через зуб и определены электроакустические параметры шупа.

Даются результаты предварительных исследований подповерхностной структуры зуба.

THE APPLICATION OF THE ULTRASONIC PULSE-ECHO FOR THE PURPOSE
OF DENTAL DIAGNOSIS

S u m m a r y

The article concerns the use of ultrasonic equipment as a new source of diagnostic information in dentistry.

It contains a discussion concerning the penetration of ultrasonic waves through the teeth and describes the applied ultrasonic transducer.

It also presents the results of preliminary research work concerning the internal structure of the teeth.