
**XVI Seminarium
NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW
Zakopane, 9-12 marca 2010**

**WSPÓŁCZYNNIK ODBICIA FAL ULTRADŹWIĘKOWYCH
OD RZECZYWISTYCH POWIERZCHNI STYKU**

Sławomir MACKIEWICZ
Grzegorz SATARZYŃSKI
Jacek SZELAŻEK

IPPT PAN Warszawa

gstarz@ippt.gov.pl, smackiew@ippt.gov.pl, jszela@ippt.gov.pl

1. WSTĘP

Odbicie fal ultradźwiękowych od granicy ośrodków jest jednym z podstawowych zjawisk fizycznych wykorzystywanych w ultradźwiękowych badaniach materiałów. W wielu przypadkach, jak np. przy wykrywaniu wad materiałów techniką echa, dokładna znajomość wartości współczynnika odbicia nie jest potrzebna, wystarcza jakościowa ocena możliwości odbicia fal od określonych rodzajów nieciągłości. Istnieją jednak zastosowania badań ultradźwiękowych, w których dokładna znajomość wartości współczynnika odbicia od granicy ośrodków odgrywa kluczową rolę. Do takich zastosowań można zaliczyć badania zanurzeniowe, badania jakości połączeń klejowych, zgrzewanych i dyfuzyjnych [1-3] a także jakości przylegania stopu łożyskowego. Pomiar współczynnika odbicia próbowano wykorzystywać do oceny połączeń skurczowych elementów maszyn i urządzeń a także do badań powierzchni styku ciał stałych [4-6]. Ocena współczynników odbicia i przenikania na granicy materiałów jest niezbędna w przypadkach stosowania suchego sprzężenia akustycznego kiedy z różnych powodów (np. wysoka temperatura obiektu badania, konieczność zachowania czystości próbek) nie można zastosować standardowego sprzężenia akustycznego w postaci warstwy cieczy lub innego materiału (żel, smar itp.).

W każdym z powyżej opisanych przypadków bardzo użyteczna jest możliwość przewidywania (teoretycznego obliczania) wartości współczynnika odbicia od określonej granicy materiałów w zależności od jej charakterystyk geometrycznych i właściwości mechanicznych a także w funkcji ewentualnego obciążenia. Posiadając odpowiedni model współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych można przewidywać i analizować związki jakie zachodzą między wartością tego łatwo mierzalnego parametru a cechami stykających się materiałów, charakterystyką ich powierzchni oraz jakością połączeń.

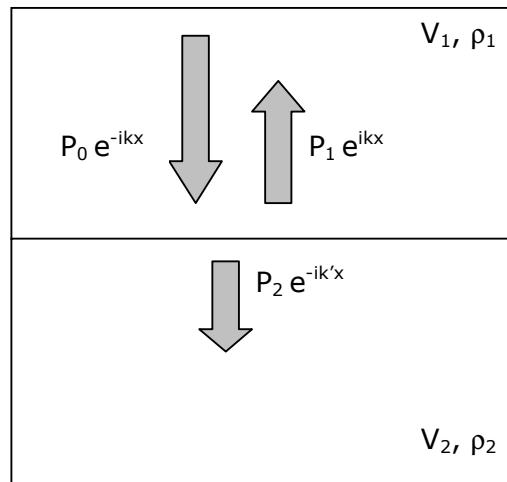
W ogólnym przypadku problem modelowania powierzchni styku materiałów jest bardzo złożony już na etapie obliczeń mechanicznych (obliczanie rzeczywistej powierzchni styku, liczby punktów kontaktu, sztywności kontaktowej itp.). Opisywane w literaturze modele wymagają określenia wielu parametrów rozkładu statystycznego chropowatości stykających się powierzchni a także właściwości sprężystych i plastycznych stykających się materiałów. Generalnie uzyskanie praktycznie użytecznych wzorów na współczynnik odbicia fal

ultradźwiękowych od rzeczywistych powierzchni styku jest dość trudne i możliwe do wykonania jedynie w stosunkowo prostych przypadkach lub w dużym przybliżeniu.

W niniejszej pracy przedstawiono proste modele teoretyczne, które mogą być zastosowane do obliczeń współczynnika odbicia od rzeczywistych powierzchni styku ciał stałych. Rozważania ograniczono do odbicia fal podłużnych od nominalnie płaskiej granicy ośrodków przy założeniu prostopadłego kierunku padaniu fali na powierzchnię graniczną. Wskazano na podstawowe ograniczenia poszczególnych modeli oraz potencjalny zakres ich praktycznych zastosowań. Opisano wyniki pomiarów współczynnika odbicia fal podłużnych od modelowych powierzchni styku próbek stalowych pod obciążeniem. Zestawiono wyniki pomiarów doświadczalnych z wynikami omówionych modeli teoretycznych oceniając uzyskany stopień zgodności oraz analizując przyczyny występujących rozbieżności.

2. ODBICIE OD IDEALNEJ GRANICY OŚRODKÓW

Najprostszym i najbardziej znanym modelem granicy ośrodków stosowanym przy obliczaniu współczynników odbicia i przenikania fal ultradźwiękowych jest model granicy idealnej, w którym zakłada się doskonałe przyleganie i połączenie mechaniczne stykających się ośrodków. Rozpatrywana granica jest idealnie płaska i nie występują na niej jakiegokolwiek pory, szczeliny lub wtrącenia. Dodatkowo istotne jest założenie, że zachodzi na niej ciągłość naprężeń i przemieszczeń, co oznacza, że przylegające ośrodki nie mogą przesuwac się względem siebie lub odrywać się od siebie w trakcie oddziaływania fali ultradźwiękowej. Tak więc w rozpatrywanym modelu graniczące ośrodki muszą nie tylko idealnie przylegać do siebie ale muszą też być „na sztywno” ze sobą połączone. Należy jednak zauważyć, że warunek ciągłości naprężeń i przemieszczeń musi być spełniony jedynie w odniesieniu do (na ogół) niewielkich naprężeń fali ultradźwiękowej i nie oznacza, że przylegające materiały muszą być połączone „na sztywno” w skali makroskopowej. Do zapewnienia ciągłości w zakresie naprężeń fali ultradźwiękowej mogą wystarczyć np. siły kohezji lub adhezji przylegających materiałów lub też niewielki makroskopowy docisk stykających się powierzchni. Schemat odbicia fali ultradźwiękowej od idealnej granicy ośrodków pokazano na rys. 1.



Rys. 1. Schemat odbicia fali ultradźwiękowej od idealnej granicy ośrodków.

Dla opisanego modelu granicy ośrodków obliczenie współczynnika odbicia jest proste i wynika z rozwiązania równań na ciągłość przemieszczeń i naprężeń fal ultradźwiękowych (tj.

fali padającej, odbitej i przechodzącej) na granicy ośrodków [7]. W rezultacie uzyskuje się powszechnie znany wzór na współczynnik odbicia fali ultradźwiękowej:

$$R = \frac{P_1}{P_0} = \frac{z_2 - z_1}{z_2 + z_1} \quad (1)$$

gdzie: R – ciśnieniowy współczynnik odbicia,
 P_0 – amplituda ciśnienia fali padającej,
 P_1 – amplituda ciśnienia fali odbitej,
 $z_1 = V_1\rho_1$ – impedancja akustyczna pierwszego ośrodka,
 $z_2 = V_2\rho_2$ – impedancja akustyczna drugiego ośrodka

Należy zauważyć, że powyższy wzór określa tzw. ciśnieniowy współczynnik odbicia czyli stosunek amplitudy ciśnienia fali odbitej do amplitudy ciśnienia fali padającej. Ponieważ wysokość wskazań impulsów rejestrowanych przez aparaty ultradźwiękowe jest wprost proporcjonalna do amplitudy ciśnienia impulsów ultradźwiękowych wzór ten określa również stosunki wysokości wskazań impulsów obserwowanych na ekranie defektoskopu.

Współczynnik odbicia obliczany ze wzoru (1) może przybierać wartości dodatnie lub ujemne w zależności od relacji impedancji akustycznych przylegających ośrodków. W przypadku gdy impedancja ośrodka, do którego wchodzi fala ultradźwiękowa jest mniejsza od impedancji ośrodka, w którym propaguje się fala padająca ($z_2 < z_1$) otrzymujemy ujemną wartość współczynnika odbicia. Ujemna wartość współczynnika odbicia oznacza zmianę fazy ciśnienia fali odbitej w stosunku do fali padającej o 180° . Fizycznie oznacza to, że podczas odbicia fali podłużnej, impulsy naprężeń rozciągających zmieniają się w impulsy naprężeń ściskających i odwrotnie. Efekty zmiany fazy impulsów obitych można obserwować na ekranie zwykłego defektoskopu w zobrazowaniu bez detekcji.

W ultradźwiękowych badaniach nieniszczących wykorzystywany jest najczęściej ciśnieniowy współczynnik odbicia jednak w niektórych innych zastosowaniach ultradźwięków przydatny bywa również tzw. energetyczny współczynnik odbicia zdefiniowany jak stosunek energii fali odbitej do energii fali padającej. Ponieważ energia niesiona przez falę ultradźwiękową jest proporcjonalna do kwadratu amplitudy ciśnienia akustycznego energetyczny współczynnik odbicia jest równy kwadratowi współczynnika ciśnieniowego:

$$R_E = \frac{E_1}{E_0} = \frac{P_1^2}{P_0^2} = R^2 = \frac{(z_2 - z_1)^2}{(z_2 + z_1)^2} \quad (2)$$

gdzie: E_0, E_1 – energia niesiona odpowiednio przez falę padającą i odbitą

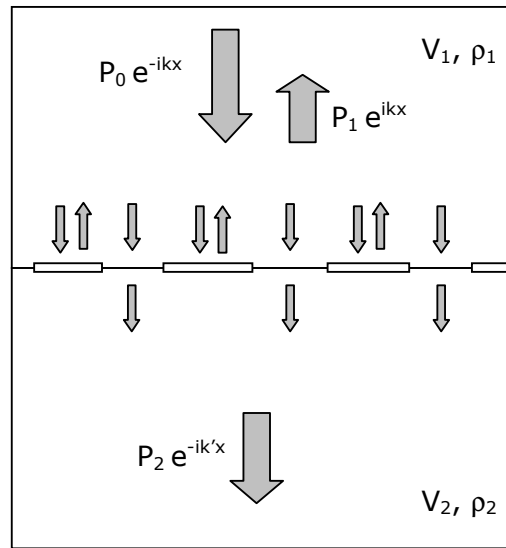
Współczynnik odbicia obliczany w ramach modelu idealnego połączenia ośrodków daje dobre przybliżenie rzeczywistego współczynnika odbicia jedynie w niektórych zastosowaniach badań ultradźwiękowych. Zgodność taka występuje na przykład w badaniach zanurzeniowych gdzie wzór (1) może być skutecznie wykorzystany do obliczenia współczynnika odbicia na granicy woda-badany materiał. W przypadku rzeczywistych połączeń klejonych, zgrzewanych czy dyfuzyjnych wzór (1) może służyć do obliczania współczynników odbicia dla przypadków granicznych tj. połączenia prawie idealnego i

całkowitego braku połączenia nie dając jednak możliwości ilościowego charakteryzowania przypadków pośrednich (np. rzeczywistej powierzchni styku, wytrzymałości połączenia na ścinanie lub rozciąganie itp.).

W przypadku prowadzenia badań ultradźwiękowych z wykorzystaniem suchego sprzężenia akustycznego model idealnej granicy materiałów nie jest przydatny gdyż nie pozwala odpowiedzieć na pytanie jaka musi być gładkość i docisk stykających się powierzchni głowic, falowodów i próbek aby zapewnić odpowiednią transmisję fali ultradźwiękowej do badanego materiału.

3. MODEL RZECZYWISTEJ POWIERZCHNI STYKU

Pierwszym, narzucającym się udoskonaleniem modelu połączenia idealnego jest model granicy, na której, w sposób statystyczny występują obszary połączenia idealnego oraz obszary całkowitego braku połączenia. Model taki zilustrowano na rys. 2.



Rys. 2. Schemat odbicia fali ultradźwiękowej od rzeczywistej powierzchni styku na granicy ośrodków.

Przy obliczaniu współczynnika odbicia od tak zamodelowanej powierzchni granicznej zakłada się, że w miejscach styku następuje odbicie padających na nie fragmentów fali ultradźwiękowej zgodne z modelem połączenia idealnego, natomiast w miejscach braku połączenia współczynnik odbicia wynosi 1. Z teorii propagacji fal ultradźwiękowych wynika, że założenie takie jest w pełni poprawne jedynie w przypadku gdy długość fali jest dużo mniejsza od rozmiarów poprzecznych obszarów styków i nieciągłości na granicy ośrodków.

W skali makroskopowej obserwujemy falę odbitą w postaci uśrednionej sumy odbić cząstkowych, które w pewnej odległości od granicy sumują się w jedną falę płaską o określonej amplitudzie. Amplitudę tą można obliczyć z prawa zachowania energii sumując i uśredniając energie wszystkich odbitych fal cząstkowych:

$$E_1 = \sum_i A_i R_{12}^2 E_0 + \sum_k B_k 1 E_0 \quad (3)$$

gdzie: E_1 – uśredniona energia wypadkowej fali odbitej
 E_0 – energia fali padającej
 A_i – powierzchnie poszczególnych obszarów styku
 B_i – powierzchnie poszczególnych obszarów nieciągłości
 R_{12} – współczynnik odbicia obliczony dla granicy idealnej

Biorąc pod uwagę, że suma powierzchni nieciągłości na jednostkowej powierzchni granicznej jest równa różnicy powierzchni jednostkowej i sumy powierzchni styków wzór (3) można przekształcić do postaci:

$$E_1 = \left(\sum_i A_i \right) R^2 E_0 + \left(1 - \sum_i A_i \right) E_0 \quad (4)$$

Suma wszystkich powierzchni styku dzielona przez jednostkę nominalnej powierzchni granicy określa tzw. współczynnik rzeczywistej powierzchni styku - RPS, który jest parametrem makroskopowym często stosowanym do charakteryzowania granicy styku materiałów [8, 9].

$$RPS = \left(\sum_i A_i \right) / 1 \quad (5)$$

Wprowadzając do wzoru (4) współczynnik RPS otrzymujemy ostatecznie:

$$E_1 = E_0 \left[1 - (1 - R_{12}^2) RPS \right] \quad (6)$$

Mając energię wypadkowej fali odbitej można obliczyć energetyczny współczynnik odbicia:

$$R_E = \frac{E_1}{E_0} = 1 - (1 - R_{12}^2) RPS = 1 - \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2} RPS \quad (7)$$

a następnie ciśnieniowy współczynnik odbicia, który zgodnie ze wzorem (2) jest równy pierwiastkowi kwadratowemu ze współczynnika energetycznego:

$$R = \sqrt{R_E} = \sqrt{1 - \frac{4z_1 z_2}{(z_1 + z_2)^2} RPS} \quad (8)$$

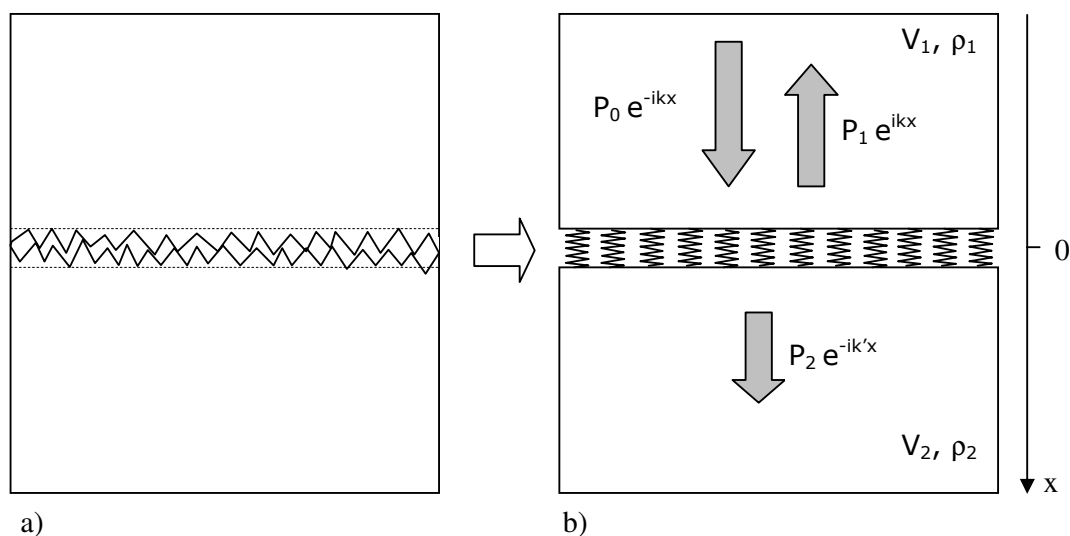
Wyprowadzony wzór uzależnia wartość współczynnika odbicia nie tylko od impedancji akustycznych stykających się ośrodków ale od właściwości samego połączenia, które jest w tym przypadku scharakteryzowane przez współczynnik rzeczywistej powierzchni styku - RPS. Omówiony model daje więc potencjalną możliwość ilościowej oceny połączeń, w których rzeczywista powierzchnia styku może być miarą jakości połączenia.

Wydaje się, że model ten można skutecznie zastosować do oceny niektórych rodzajów połączeń klejonych, zgrzewanych lub dyfuzyjnych, w których typowe wady mają postać płaskich porów zlokalizowanych na granicy połączenia. Współczynnik odbicia fali ultradźwiękowej od takiego połączenia może być interpretowany jako miara rzeczywistej

powierzchni połączenia lub też procentowego udziału porów w nominalnej powierzchni styku. Należy jednak pamiętać, że podany wzór na współczynnik odbicia wyprowadzony został w ramach przybliżenia krótkofalowego czyli przy założeniu małej długości fali w stosunku do rozmiarów poprzecznych nieciągłości na granicy materiałów. W praktyce długości stosowanych fal ultradźwiękowych są rzędu milimetra i zazwyczaj nie spełniają tego warunku w zestawieniu z typowymi rozmiarami porowatości badanych połączeń. Niezależnie od tego wzór (8) może dawać rozsądne przybliżenie związku jaki zachodzi między współczynnikiem odbicia fal ultradźwiękowych a współczynnikiem RPS powierzchni styku nawet przy niespełnieniu tego warunku. Niestety, stopień dokładności tego przybliżenia jest trudny do teoretycznego oszacowania i w praktyce wymaga przeprowadzenia pomiarów testowych na badanych typach połączeń. Wyniki przykładowych pomiarów na modelowej serii próbek zostaną przedstawione w dalszej części pracy.

3. MODEL RZECZYWISTEJ POWIERZCHNI STYKU

Model rzeczywistej powierzchni styku wyprowadzono przy założeniu małej długości fali w stosunku do rozmiarów nieciągłości na granicy ośrodków. Okazuje się, że przy założeniu warunku przeciwnego można sformułować komplementarny model długofalowy. Podstawową ideę tego modelu przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Idea modelu sztywności kontaktowej – zastąpienie rzeczywistej warstwy kontaktowej warstwą idealnych sprężynek o takiej samej sztywności.

Strefa kontaktu między chropowatymi powierzchniami stykających się elementów zostaje tutaj zamodelowana za pomocą warstwy idealnych sprężynek, które charakteryzują się taką samą sztywnością na jednostkę powierzchni jak rzeczywista warstwa kontaktowa. Należy to rozumieć w ten sposób, że zmiany długości sprężynek pod wpływem działających naprężeń są dokładnie takie same jak dodatkowe przemieszczenia obu przylegających ośrodków powodowane przez obecność warstwy kontaktowej obserwowane w dalszej odległości od powierzchni styku. Oznacza to, że z makroskopowego punktu widzenia (a więc również dla fali ultradźwiękowej o odpowiednio dużej długości) właściwości sprężyste połączenia rzeczywistego są takie same jak połączenia zamodelowanego za pomocą warstwy sprężynek o odpowiednio dobranej sztywności.

Podjęcie takie jest uzasadnione dla fali ultradźwiękowej o dużej długości, która „nie czuje” szczegółów warstwy granicznej widząc ją jako ogólne obniżenie sprężystości ośrodka w pobliżu granicy materiałów. W przypadku odbicia fali poprzecznej model ten należy nieco zmodyfikować zastępując klasyczne sprężynki elementami sprężystymi o odpowiednio dobranej sztywności poprzecznej.

Sposób obliczania zastępczej sztywności kontaktowej dla rzeczywistych granic materiałów może być dość skomplikowany ale obliczenia takie można przeprowadzić w ramach teorii sprężystości dla różnych modeli mikroskopowych strefy kontaktu. Załóżmy obecnie, że sztywność kontaktowa została w jakiś sposób obliczona lub zmierzona i rozpatrzmy współczynnik odbicia podłużnej fali ultradźwiękowej od opisanego modelu granicy ośrodków.

W celu obliczenia współczynnika odbicia należy sformułować warunki brzegowe dla przemieszczeń i naprężeń fal ultradźwiękowych propagujących się w obu ośrodkach na modelowej powierzchni granicznej (patrz rys. 3b).

Ponieważ warstwa idealnych sprężynek przenosi naprężenia natychmiastowo i bez strat suma naprężeń fali padającej i odbitej na granicy ośrodka 1 musi równać się naprężeniu fali przechodzącej na granicy ośrodka 2:

$$P_0 + P_1 = P_2 \quad (9)$$

Naprężenie przenoszone jest przez sprężynki, które wskutek tego wydłużają się lub skracają zgodnie z prawem Hooke'a:

$$\Delta l = \frac{P_2}{K} \quad (10)$$

gdzie: Δl – przyrost długości sprężynek wskutek przenoszonych naprężeń

K – sztywność sprężynek przypadająca na jednostkę powierzchni granicznej

Z drugiej strony zmiana długości sprężynek musi być równa różnicy przemieszczeń granic przylegających ośrodków tj.:

$$\Delta l = u_2 - (u_0 + u_1) \quad (11)$$

Między przemieszczeniem u a naprężeniem P płaskiej fali ultradźwiękowej zachodzi znany związek:

$$u = \frac{P}{\pm i \omega z} \quad (12)$$

gdzie: $\omega = 2\pi f$ – częstość kątowna,

z – impedancja akustyczna ośrodka propagacji

Znak (-) we wzorze (12) dotyczy fali rozchodzącej się w kierunku dodatnim, znak (+) fali rozchodzącej się w kierunku ujemnym osi współrzędnych. Liczba i w mianowniku wzoru (12) oznacza w notacji zespolonej, że przemieszczenia i naprężenia fali ultradźwiękowej są przesunięte w fazie o 90° .

Podstawiając wzór (12) do warunku brzegowego (11) oraz wykorzystując związek (10) otrzymujemy drugie równanie wiążące amplitudy naprężeń fal ultradźwiękowych:

$$\frac{P_2}{K} = \frac{-P_2}{i\omega z_2} + \frac{P_0}{i\omega z_1} - \frac{P_1}{i\omega z_1} \quad (13)$$

Podstawiając do równania (13) P_2 wyliczone z równania (10) otrzymujemy następujące równanie wiążące amplitudy ciśnienia fali padającej i odbitej:

$$\frac{P_0 + P_1}{K} = \frac{-K(P_0 + P_1)}{i\omega z_2} + \frac{K P_0}{i\omega z_1} - \frac{K P_1}{i\omega z_1} \quad (14)$$

Z równania tego możemy obliczyć stosunek ciśnienia fali odbitej do ciśnienia fali padającej czyli poszukiwany współczynnik odbicia:

$$R = \frac{P_1}{P_0} = \frac{z_2 - z_1 - i\omega \frac{z_1 z_2}{K}}{z_2 + z_1 + i\omega \frac{z_1 z_2}{K}} \quad (15)$$

W niektórych źródłach literaturowych można spotkać analogiczny wzór na współczynnik odbicia różniący się jedynie znakiem. Wynika to z faktu, że czasem podawane są wzory na współczynnik odbicia bez wyraźnego określenia jakiej wielkości wzór dotyczy. Wzór z przeciwnym znakiem odnosi się do prędkości cząstkowej fali ultradźwiękowej natomiast wzór w postaci (15) do jej ciśnienia akustycznego. W badaniach ultradźwiękowych bardziej przydatne jest operowanie ciśnieniowym współczynnikiem odbicia ponieważ prawidłowo opisuje on zmiany fazy wskazań impulsów obserwowanych na ekranie aparatu ultradźwiękowego.

Współczynnik odbicia określony wzorem (15) ma wartość zespoloną co oznacza, że fala odbita ma w ogólności nie tylko mniejszą amplitudę ale również inną fazę niż fala padająca. Ponadto, w odróżnieniu od modelu połączenia idealnego oraz modelu rzeczywistej powierzchni styku, wartość współczynnika odbicia jest tu zależna od częstotliwości fali padającej. Jeśli we wzorze (15) założymy wartość sztywności kontaktowej K dążącą do zera (bardzo słabe sprężynki) to otrzymamy współczynnik odbicia równy -1 czyli taki jak dla swobodnej granicy ośrodka. Jeśli założymy K dążące do nieskończoności (bardzo sztywne sprężynki) wzór (15) przekształca się we wzór (1) opisujący odbicie od idealnej granicy ośrodków. Jak więc widać wzór (15) dobrze opisuje przypadki graniczne odpowiadające znanym, prostym rozwiązaniom.

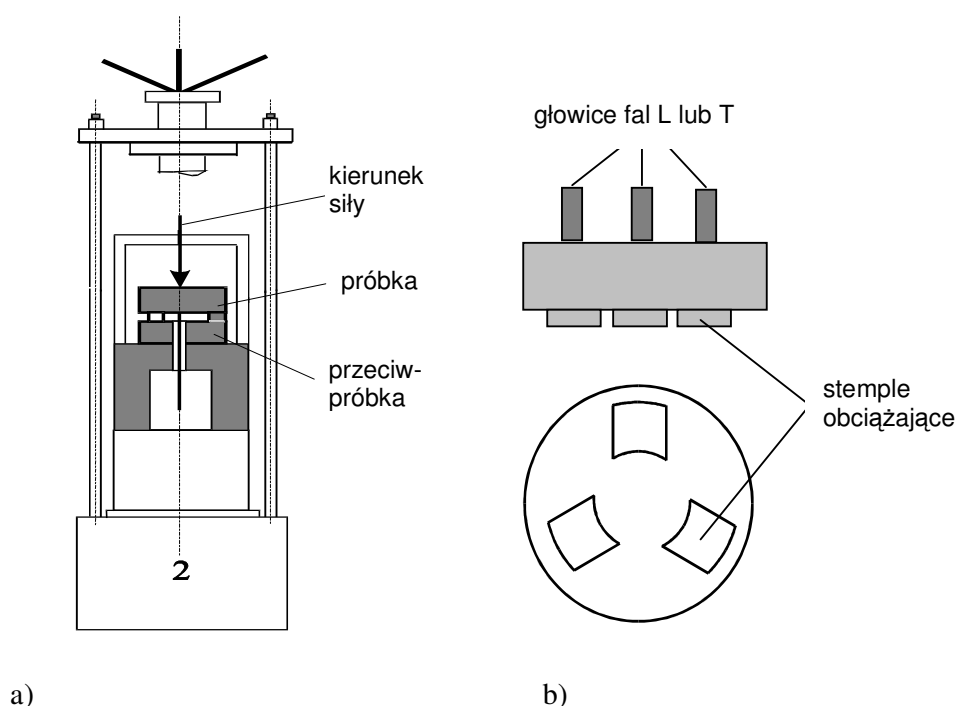
Model sztywności kontaktowej jest często stosowany w literaturze naukowej i technicznej dotyczącej badań obszaru styku ciał stałych, w tym również badań ultradźwiękowych [3,4,9,10]. Jego podstawowe założenie, że długość fali jest dużo większa od rozmiarów nieciągłości na granicy ośrodków jest dość dobrze spełnione w wielu praktycznych zastosowaniach badań ultradźwiękowych. Model ten może być skutecznie zastosowany np. do optymalizacji suchego sprzężenia akustycznego między głowicami, falowodami i badanymi elementami. Chropowatości stykających się powierzchni są tam

zwykle rzędu mikrometrów natomiast stosowane fale ultradźwiękowe mają długości milimetrowe, tak więc warunek długofalowy jest dobrze spełniony.

Podstawową trudnością w praktycznym stosowaniu modelu sztywności kontaktowej jest obliczanie wartości tej sztywności w zależności od właściwości geometrycznych oraz mechanicznych stykających się powierzchni. Modele mikromechaniczne stosowane w tym celu są dość skomplikowane matematycznie i wymagają wprowadzenia wielu trudnych do uzyskania parametrów profilu chropowatości. Przykładowe rozwiązanie takiego problemu dla prostego profilu chropowatości podano w następnym rozdziale.

5. DOŚWIADCZALNA WERYFIKACJA MODELI TEORETYCZNYCH

W celu doświadczalnej weryfikacji przedstawionych modeli teoretycznych przeprowadzono serię pomiarów współczynnika odbicia od powierzchni styku próbek stalowych o prostej i regularnej geometrii chropowatości. Pomiary przeprowadzono na stanowisku badawczym zbudowanym w IPPT PAN pokazanym na rys. 4.



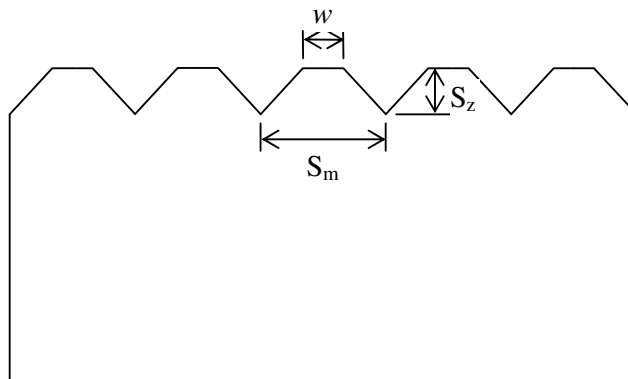
Rys. 4. Stanowisko do pomiarów współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych od powierzchni styku ciał stałych pod obciążeniem, a) schemat ogólny, b) schemat przeciwpówki ze stemplami i głowicami ultradźwiękowymi.

Przedstawiony układ umożliwi zautomatyzowany pomiar współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych od powierzchni styku stempli i badanej próbki w funkcji nominalnego naprężenia obciążającego. Stemple mają bardzo gładkie, polerowane powierzchnie czołowe i są wykonane ze stali o dużej twardości. Badane próbki mają kształt walców o wymiarach $\varnothing 50 \times 30$ z odpowiednio przygotowaną chropowatością powierzchni czołowej. W eksperymencie mierzone są współczynniki odbicia od powierzchni styku próbki i 3 stempli dzięki czemu uzyskiwany wynik jest wartością średnią z trzech równolegle prowadzonych pomiarów. Obciążenia powierzchni styku zadawane są w sposób ciągły przez zwiększanie

siły nacisku prasy hydraulicznej przy jednoczesnej automatycznej rejestracji przyłożonej siły oraz współczynników odbicia fal ultradźwiękowych od powierzchni styku stempli i próbki.

W badaniach stosowano głowice ultradźwiękowe typu L o częstotliwości 7 MHz. wytwarzające w stali fale ultradźwiękowe o długości $\lambda_L = 0,85$ mm.

Pomiary mające na celu weryfikację modeli teoretycznych przeprowadzono na próbkach stalowych o specjalnie zamodelowanej powierzchni utworzonej przez wstępne frezowanie lub dłutowanie z następującym po tym kontrolowanym szlifowaniem. W efekcie uzyskiwano profil chropowatości w postaci regularnych bruzd o przekroju pokazanym na rys. 5. Zastosowany sposób przygotowania próbek pozwalał na łatwe uzyskiwanie założonych wielkości rzeczywistej powierzchni styku na płaskich i gładkich wierzchołkach nierówności.



Rys. 5. Typowy profil chropowatości badanych próbek modelowych z oznaczeniem podstawowych parametrów geometrii.

Przez odpowiedni dobór parametrów obróbki mechanicznej utworzono powierzchnie próbek odpowiadające różnym wartościom rzeczywistej powierzchni styku $RPS = w/S_m$ oraz różnym grubościom warstwy kontaktowej S_z .

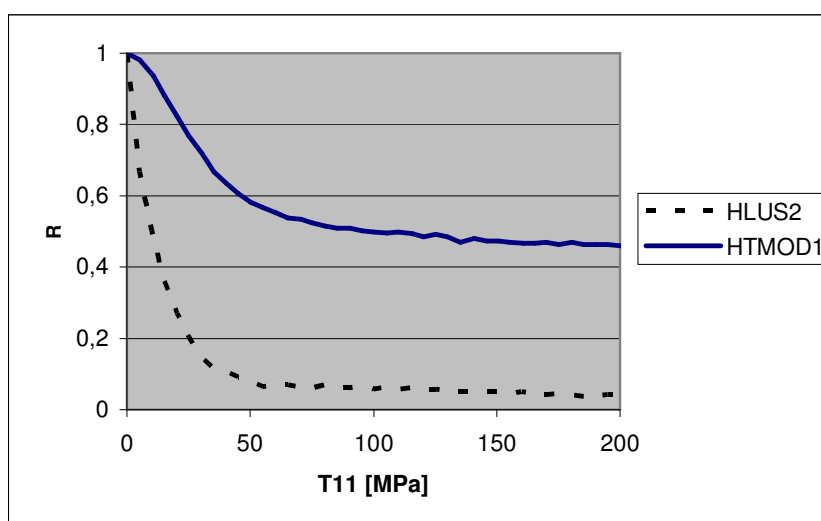
Parametry powierzchni przygotowanych próbek zestawiono w Tabeli 1. Próbką, oznaczona jako HLU2, miała płaską, wypolerowaną powierzchnię czołową i stanowiła próbkę dodatkową mającą reprezentować przypadek połączenia idealnego.

Nr próbki	S_z [μm]	S_m [μm]	$RPS = w / S_m$
HLUS2	-	-	1,00
HTMOD15	17	250	0,64
HD2	52	510	0,59
HTMOD22	77	250	0,41
HTMOD42	95	250	0,24
HD3	81	360	0,23
HTMOD32	148	250	0,15

Tab. 1. Parametry modelowej chropowatości utworzonej na powierzchniach czołowych próbek przez kontrolowaną obróbkę mechaniczną.

Jak wynika z tabeli 1 modelowe chropowatości próbek odpowiadały rzeczywistym powierzchniom styku RPS w zakresie od 15% do 64% oraz grubościom warstwy kontaktowej w zakresie od 17 do 148 μm .

Na rys. 6 pokazano typową zależność współczynnika odbicia fali podłużnej od obciążenia nominalnego powierzchni styku stempli i modelowej próbki. Dla porównania na tym samym wykresie pokazano analogiczną zależność uzyskaną dla próbki HLUS2 o bardzo gładkiej wypolerowanej powierzchni. Widoczne jest, że pod wpływem obciążenia współczynnik odbicia początkowo szybko maleje dochodząc do pewnej ustalonej wartości zależnej od parametrów powierzchni próbki. W przypadku próbki HTMOD2 jest to wartość ok. 0,5 natomiast dla próbki polerowanej HLUS2 wynosi ona ok. 0,08. Dalszy wzrost obciążenia styku powoduje już tylko nieznaczny spadek współczynnika odbicia. Początkowy szybki spadek współczynnika odbicia należy tłumaczyć stosunkowo łatwym ustalaniem się kontaktu mechanicznego między powierzchnią stempla a płaskimi wierzchołkami nierówności próbki (patrz rys. 5). Gdy kontakt na płaskich wierzchołkach został osiągnięty dalsze zwiększanie rzeczywistej powierzchni styku jest możliwe jedynie przez odkształcenie plastyczne wierzchołków nierówności co jest dużo trudniejsze i wymaga znacznie większych przyrostów obciążeń.



Rys. 6. Typowe przebiegi zależności współczynnika odbicia fali podłużnej od obciążenia styku uzyskiwane dla próbek o modelowej geometrii chropowatości.

Na podstawie analizy podobnych wykresów dla wszystkich badanych próbek przyjęto, że wartość współczynnika odbicia mierzona przy nominalnym obciążeniu powierzchni styku wynoszącym 100 MPa dobrze reprezentuje modelowy przypadek, w którym styk na wierzchołkach nierówności jest prawie całkowity natomiast nie zaszły jeszcze istotne odkształcenia plastyczne zmieniające kształt pierwotnej chropowatości. Założenie to zostało dodatkowo potwierdzone przez wizualną ocenę odcisków stempli pozostawionych na powierzchniach badanych próbek po ich obciążeniu do 100 MPa.

W tabeli 2 zestawiono średnie wartości współczynników odbicia fali podłużnej od powierzchni styku stempli i próbek wyznaczone przy obciążeniu 100 MPa. Błąd pomiaru wynikający głównie z rozrzutu wartości mierzonych na poszczególnych stemplach a także w różnych miejscach na powierzchni tej samej próbki oszacowano na $\pm 0,05$. Błąd ten jest spowodowany nie tyle niedokładnością aparatury pomiarowej co raczej rozrzutem parametrów modelowej chropowatości wytworzonej na powierzchniach próbek przez niedoskonałą obróbkę mechaniczną.

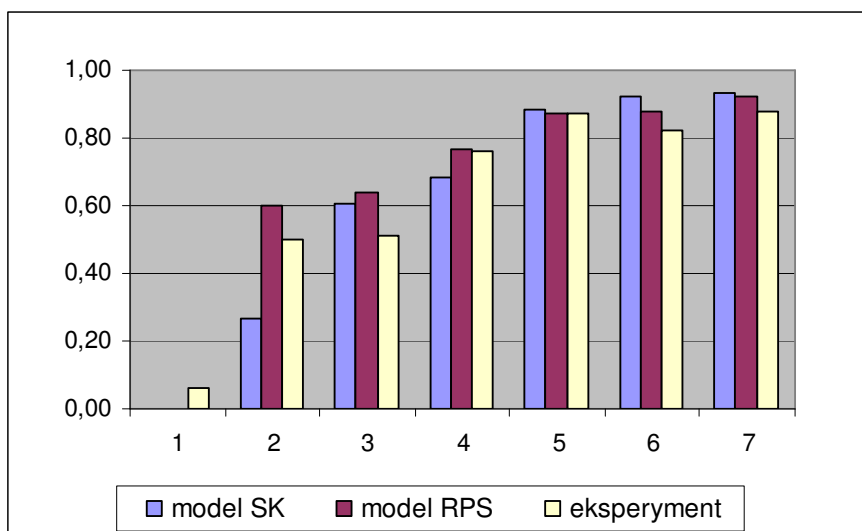
Dla porównania w tabeli 2 podano także współczynniki odbicia obliczone teoretycznie na podstawie modelu rzeczywistej powierzchni styku (wzór 8) oraz modelu sztywności

kontaktowej (wzór 15). Sztywność kontaktową dla modelowanych powierzchni styku (rys. 5) obliczono na podstawie rozwiązania Baika-Thompsona [10] odnoszącego się do płaskich szczelin z dodatkową poprawką uwzględniającą skończoną wysokość S_z modelowanych nieciągłości.

L.p.	Nr próbki	R_{eksp}	K [GPa/ μm]	R_{sk}	R_{rps}
1	HLUS1	0,06	∞	0,00	0,00
2	HTMOD15	0,50	3,656	0,268	0,640
3	HD2	0,51	1,337	0,606	0,766
4	HTMOD22	0,76	1,092	0,682	0,869
5	HTMOD42	0,87	0,544	0,882	0,880
6	HD3	0,82	0,421	0,924	0,920
7	HTMOD32	0,88	0,395	0,932	0,640

Tab. 2. Współczynniki odbicia fal podłużnych od powierzchni styku stempli i próbek modelowych wyznaczone doświadczalnie – R_{eksp} oraz obliczone teoretycznie na podstawie modelu sztywności kontaktowej – R_{sk} oraz modelu rzeczywistej powierzchni styku – R_{rps} .

Dla lepszego ukazania stopnia zgodności danych doświadczalnych z obliczeniami teoretycznymi wyniki z tab. 2 zobrazowano graficznie wykresie na rys. 7.



Rys. 7. Graficzne zobrazowanie zgodności obliczeń teoretycznych z wynikami doświadczalnych pomiarów współczynnika odbicia od modelowych powierzchni styku.

Biorąc pod uwagę statystyczny charakter pomiarów współczynnika odbicia od styku powierzchni chropowatych a także pomiarów parametrów chropowatości na próbkach modelowych można uznać, że uzyskana korelacja jest stosunkowo dobra chociaż ma raczej charakter jakościowy. Stopień zgodności wyników doświadczalnych o obydwoima rozpatrywanymi modelami teoretycznymi jest podobny pomimo tego, że model rzeczywistej

powierzchni styku - RPS nie spełnia warunku krótkofalowego w odniesieniu do wielkości nieciągłości badanych powierzchni (szerokość bruzd 0,25 – 0,50 mm, długość fali 0,85 mm).

Dobra korelacja prostego modelu RPS z wynikami doświadczalnymi w szerokim zakresie falowych rozmiarów nieciągłości jest ważnym wnioskiem dla wielu praktycznych zastosowań pomiarów współczynnika odbicia. Oznacza ona, że współczynnik odbicia fali ultradźwiękowej od połączenia klejonego, zgrzewanego czy dyfuzyjnego można na podstawie wzoru (8) interpretować w kategoriach rzeczywistej powierzchni styku przylegających elementów. Oczywiście to, czy styk odczuwany przez falę ultradźwiękową przekłada się na wytrzymałość badanego połączenia jest osobną kwestią zależną od technologii wykonania danego połączenia. Z rys. 6 widać na przykład, że odpowiedni docisk dobrze wypolerowanych powierzchni może wytworzyć niemal pełny styk ultradźwiękowy pomimo tego, że przylegające powierzchnie nie są ze sobą połączone w sposób umożliwiający przenoszenie naprężeń rozciągających. Niezależnie od tych zastrzeżeń, ilościowa informacja o rzeczywistej powierzchni styku jest ważną charakterystyką każdego połączenia pozwalającą ocenić nasilenie najbardziej oczywistych wad typu rozwarstwień, pęknięć czy porowatości.

5. PODSUMOWANIE

W pracy, w sposób pogłębiony, omówiono problematykę współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych. Wychodząc od znanych zależności dotyczących odbicia od idealnej granicy ośrodków zaprezentowano bardziej zaawansowane modele teoretyczne pozwalające na obliczanie współczynnika odbicia od rzeczywistych granic materiałów lub powierzchni styku elementów. Omówiono podstawowe założenia, ograniczenia oraz zastosowania modelu rzeczywistej powierzchni styku oraz modelu sztywności kontaktowej. W obu przypadkach wyprowadzono i omówiono podstawowe formuły matematyczne pozwalające na obliczanie wartości współczynnika odbicia w zależności od podstawowych parametrów obu modeli.

W drugiej części pracy przedstawiono wyniki doświadczalnych pomiarów współczynnika odbicia od powierzchni styku płaskich stempli i próbek modelowych o zadanej geometrii chropowatości. Wyniki pomiarów zestawiono z wynikami obliczeń teoretycznych przeprowadzonych na podstawie obu omawianych modeli uzyskując zadowalającą korelację wyników doświadczalnych z przewidywaniami teoretycznymi.

Rozpatrując zakres potencjalnych zastosowań pomiarów współczynnika odbicia do badania jakości połączeń klejonych, zgrzewanych, lutowanych czy dyfuzyjnych stwierdzono, że prosty w interpretacji model rzeczywistej powierzchni styku RPS może być skutecznie wykorzystany przy ilościowej ocenie i analizie wyników tego typu badań.

LITERATURA

1. X.M. Jian, N. Guo, M.X. Li and H.L. Zhang, Characterization of Bonding Quality in a Multilayer Structure Using Segment Adaptive Filtering., *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 21, 2002, pp 55-65
2. C.J. Brotherhood, B.W. Drinkwater, S. Dixon, The detectability of kissing bonds in adhesive joints using ultrasonic techniques., *Ultrasonics* 41, 2003, pp 521-529
3. D.D. Palmer, D.K. Rehbein, J.F. Smith, O. Buck, Nondestructive Characterization of the Mechanical Strength of Diffusion Bonds. II. Application of a Quasi-Static Spring Model., *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 7, 1988, pp 167-174
4. A.M. Quin, B.W. Drinkwater, R.S. Dwyer-Joyce, The measurement of contact pressure in machine elements using ultrasound., *Ultrasonics* 39, 2002, pp 459-502

5. J. Królikowski, J. Szczepiek, Prediction of contact parameters using ultrasonic method., *Wear*, 184, 1991, pp 181-195
6. R.S. Dwyer-Joyce, B.W. Drinkwater, A.M. Quin, The use of Ultrasound in the Investigation of Rough Surface Interfaces, *Transactions of the ASME*, Vol. 123, January 2001, pp 8-16
7. J. Obraz, *Ultradźwięki w technice pomiarowej.*, WNT, Warszawa 1983
8. M. Pau, F. Aymerich, F. Ginesu, Measurements of nominal contact area in metallic interfaces: a comparison between an ultrasonic method and a pressure-sensitive film., *Wear*, 249, 2001, pp 533-535
9. M. Pau, Estimation of real contact area in wheel-rail system by means of ultrasonic waves., *Tribology International*, 36, 2003, pp 687-690
10. J.M. Baik, R.B. Thompson, Ultrasonic Scattering from Imperfect Interfaces: A Quasi-Static Model., *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 4, 1984, pp 177-196