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

**ZASTOSOWANIA POMIARÓW WSPÓLCZYNNIKA ODBICIA FAL
ULTRADŹWIĘKOWYCH OD GRANICY METAL-METAL W
TECHNICE**

Jacek SZELAŹEK
Stanisław MACKIEWICZ
Grzegorz STARZYŃSKI
IPPT PAN Warszawa
jszela@ippt.gov.pl, smackiew@ippt.gov.pl, gstarz@ippt.gov.pl

1. WSTĘP

Motywacje podejmowania badań nad współczynnikiem odbicia fal ultradźwiękowych, podłużnych i poprzecznych, od powierzchni kontaktujących się dwóch ciał stałych były różne. W innych referatach prezentowanych w czasie 26 Seminarium zakopiańskiego przedstawiono zależności współczynnika odbicia od różnych parametrów kontaktujących się powierzchni takich jak własności sprężyste, chropowatość, ciśnienie, a także wykorzystanie ich do obliczania sztywności kontaktowej i oceny rzeczywistych powierzchni styku. Celem tego referatu jest przedstawienie praktycznych zastosowań pomiarów współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych od swobodnych i kontaktujących się ze sobą powierzchni metalowych elementów, na przykład części maszyn. Większość opisanych w literaturze prac to prace laboratoryjne a tylko nieliczne dotyczą zastosowań przemysłowych.

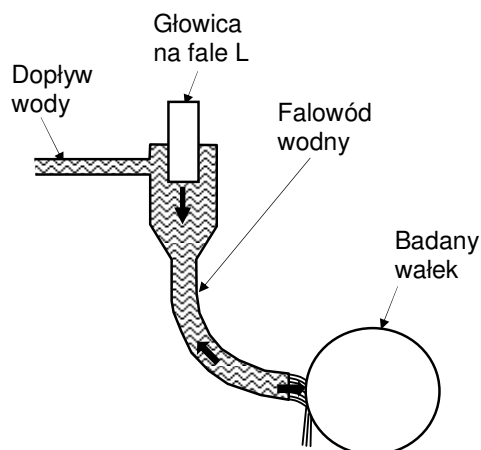
Zależność współczynnika odbicia fal od granicy metal-metal w funkcji nacisku wykorzystuje się do pomiarów ciśnienia lub sił z jakimi oddziałują na siebie części maszyn, do oceny powierzchni styku części i do oceny rozkładów naprężeń na kontaktujących się powierzchniach. W większości opisanych przypadków obie kontaktujące się części wykonane są ze stali czyli z materiałów o praktycznie takiej samej oporności akustycznej. Oznacza to, że odstępstwa wartości współczynnika odbicia od jedności są spowodowane jedynie tym, że kontaktujące się powierzchnie są chropowate lub dodatkowo między nimi znajduje się warstwa rozdzielającego je smaru. Wartość współczynnika odbicia od takiej granicy jest funkcją chropowatości powierzchni, nacisku, zależy od odkształceń stykających się elementów i od ilości powietrza lub smaru uwięzionego między nierównościami.

Innym wykorzystaniem możliwości transmisji fal ultradźwiękowych przez kontaktujące się powierzchni dwóch ciał stałych są metody „suchego” (bez stosowania ośrodka sprężającego) wzbudzania fal ultradźwiękowych.

2. OCENA CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI

Sposób w jaki fala ultradźwiękowa odbija się od granicy ośrodka stałego (na przykład granicy metal-powietrze) zależny jest od chropowatości tej powierzchni a dokładniej od rozkładu nierówności i stosunku wysokości nierówności powierzchni metalu do długości

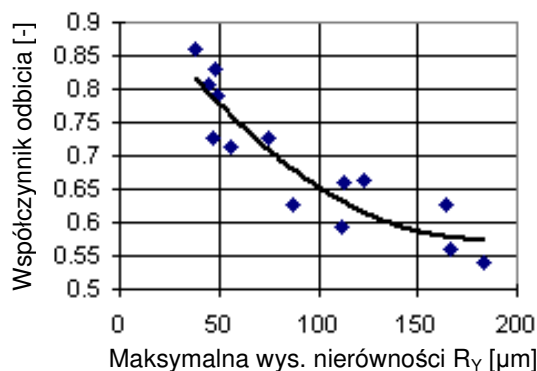
rozchodzącej się w nim fali ultradźwiękowej. Można przyjąć, że wartość współczynnika odbicia od gładkiej, płaskiej powierzchni swobodnej metalowej próbki jest równa 100% (w rzeczywistości dla granicy stal-powietrze wynosi ona około 99,99993%). Natomiast w przypadku powierzchni chropowatej poza odbiciem zwierciadlanym obserwuje się odbicie dyfuzyjne czyli odbicie w kierunkach innych niż kierunek fali odbitej zwierciadlanie. Stąd wniosek, że współczynnik odbicia od swobodnej granicy metalu może być miarą chropowatości tej powierzchni, pod warunkiem, że w badaniach wykorzystana jest fala o odpowiedniej częstotliwości. Koncepty takich pomiarów są opisane w licznych patentach, na przykład w [1]. Zasadę działania tego wynalazku pokazano na rysunku 1. Głowica ultradźwiękowa działająca metodą echa generuje impulsy fal podłużnych w elastycznym falowodzie (rurka z tworzywa sztucznego) wypełnionym przepływającą wodą. Koniec falowodu znajduje się w małej odległości od powierzchni wałka, którego chropowatość jest oceniana. Wyływająca woda zwilża powierzchnię wałka i zapewnia stałe sprzężenie akustyczne. Impuls fali podłużnej po odbiciu od wałka powraca falowodem do głowicy i jest rejestrowany jako echo, którego amplituda jest zależna od chropowatości powierzchni wałka.



Autorzy zastosowali fale o częstotliwości 5 MHz (długość fali w wodzie równa 0,3mm). Stwierdzili, że metoda działa nawet przy elastycznych falowodach o długości do 30 cm. Do ilościowej oceny chropowatości przeprowadzili badania na próbkach o różnych stanach powierzchni i średnicach tworząc krzywe skalujące.

Rys. 1. Schemat badania chropowatości wałka wg patentu z 1988 roku [1].

W pracy [2] dokładniej opisano badania nad współczynnikiem odbicia od płaskiej granicy stal-powietrze dla różnych chropowatości powierzchni. Badania prowadzono falami podłużnymi o częstotliwości 3,5MHz (co daje w stali fale o długości około 1,7mm), padającymi normalnie na swobodną granicę stalowych próbek o różnej chropowatości (obróbka skrawaniem przy różnych parametrach skrawania). Amplitudę echa odbitego od powierzchni chropowatej porównywano z amplitudą echa od powierzchni wzorcowej (gładkiej). Wyniki pomiarów przedstawia rysunek 2. Widać silną zależność współczynnika odbicia od maksymalnej wysokości nierówności R_Y w mikrometrach.



Rys. 2. Zależność współczynnika odbicia od swobodnej granicy próbki stalowej, od chropowatości powierzchni próbki (z pracy [2]).

Uzyskane wyniki pokazują, że w badaniach zjawisk kontaktu metal-metal z wykorzystaniem wartości współczynnika odbicia konieczne jest wzięcie pod uwagę faktu, że bezwzględna wartość współczynnika zależna jest nie tylko od tego z czego wykonane są stykające się elementy, czy i jak silnie są one dociskane ale również od początkowej chropowatości powierzchni odbijającej fale. Oznacza to również, że w czasie dociskania do siebie dwóch elementów i najpierw sprężystego a potem plastycznego odkształcania się szczytów nierówności powierzchni, współczynnik odbicia fal zmienia się nie tylko wskutek przenikania fal do drugiego elementu ale również wskutek zmiany wysokości nierówności powierzchni odbijającej.

Należy też pamiętać, że w przypadku gładkich powierzchni nawet bardzo cienka warstwa powietrza między stykającymi się stalowymi elementami powoduje silny wzrost współczynnika odbicia. Przykładowo, dla fali podłużnej o częstotliwości 5MHz padającej na granicę stal-stal, warstwa powietrza o grubości jedynie 0,05 μ m powoduje, że współczynnik odbicia od takiej granicy spada do 80%.

2. Połączenia wciskowe

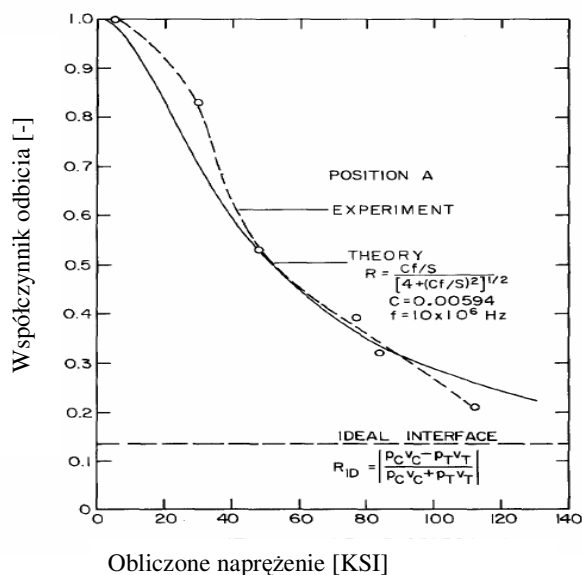
Połączenia wciskowe to połączenia elementów maszyn, w których unieruchomienie części zapewnione jest przez tarcie między nimi. Połączenia takie budowane są najczęściej jako połączenia części osiowosymetrycznych takich jak wały i osadzone na nich pierścienie. Połączenia wciskowe realizowane są jako wtlaczone oraz skurczowe. Pierwsze uzyskuje się przez wtlaczenie do otworu wału, którego średnica jest nieco większa od średnicy otworu. Obydwa łączone elementy mają taką samą temperaturę. W ten sposób osadzane są na przykład na osiach koła kolejowe. Drugi sposób wykorzystuje rozszerzalność cieplną metali. Ogrzanie pierścienia lub zamrożenie wału umożliwia bezsiłowe i precyzyjne osadzenie elementów a po wyrównaniu się temperatur powstaje wcisk.

Różnica średnic wału i pierścienia powoduje, że w połączeniu wciskowym dochodzi do odkształcenia zarówno elementu z otworem jak i wału. Wraz z odkształceniami pojawiają się w materiale naprężenia własne a na granicy elementów powstają naprężenia ściskające. Zdolności połączenia do przenoszenia sił zależna jest od stanu powierzchni otworu i wału, od własności sprężystych łączonych materiałów i od wartości naprężeń własnych na granicy połączenia. O tym, że siły lub momenty przenoszone przez połączenia skurczowe mogą być znaczne świadczy to, że tą metodą składane są wały korbowe silników spalinowych wielkiej mocy lub osadzane na wałach dyski turbin.

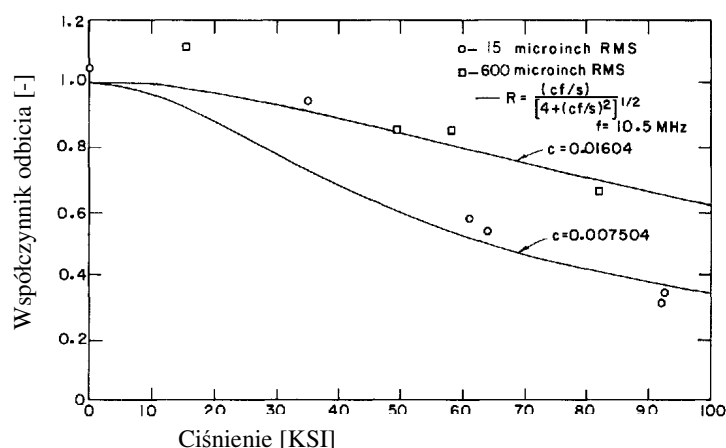
W pracy [3] opisano badania jakości połączenia wciskowego dwóch rurek. Rurka o większej średnicy była wykonana ze stopu niklu i tytanu (stop „z pamięcią kształtu”) a rurka wewnętrzna ze stali nierdzewnej. Do zaciśnięcia się większej rurki wykorzystano efekt „pamięci kształtu” czyli redukcję średnicy większej rurki w wyniku jej podgrzania i przemiany fazowej w materiale. Badania rurek o zewnętrznej średnicy około 3 cm prowadzono falami podłużnymi o częstotliwości 15 MHz mierząc współczynnik odbicia od granicy NiTi - stal nierdzewna (wartość teoretyczna około 14%).

Autorzy zauważyli, że wartość współczynnika odbicia jest zależna nieliniowo od obliczonej wartości naprężenia na granicy materiałów. Zależność tę pokazano na rysunku 3. Badając rurki o dwóch różnych chropowatościach powierzchni zauważyli też, że zmiany współczynnika odbicia od naprężenia na granicy osrodków silnie zależą od chropowatości, co pokazano na rysunku 4. Zgodnie z oczekiwaniem, im mniejsza chropowatość tym współczynnik odbicia wraz ze wzrostem ciśnienia spada do niższej wartości. Uzyskane wyniki oznaczają, że możliwa jest ocena ciśnienia między elementami pod warunkiem, że badane połączenia charakteryzują się powtarzalną chropowatością powierzchni i że badania

przewodzone a falami o tej samej częstotliwości. Do podobnych wniosków doszli autorzy patentu [4] proponujący ultradźwiękowe badania ciśnienia między metalowymi elementami



Rys. 3.
Zależność współczynnika odbicia od granicy NiTi-stal nierdzewna od ciśnienia (1KSI=6,9MPa). Z pracy [3].

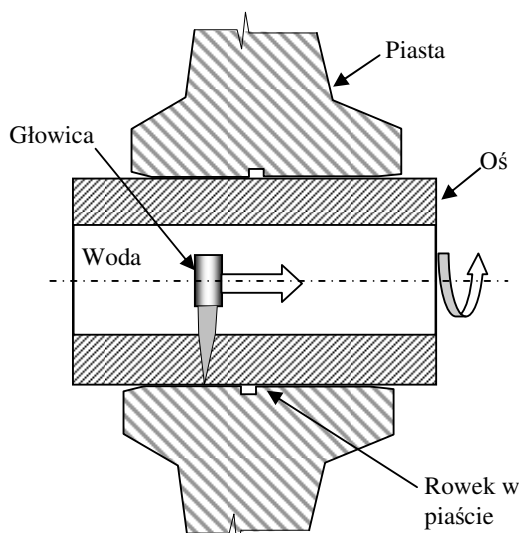


Rys. 4.
Zależność współczynnika odbicia od granicy NiTi-stal nierdzewna od ciśnienia dla dwóch różnych chropowatości powierzchni (1KSI=6,9MPa). Z pracy [3].

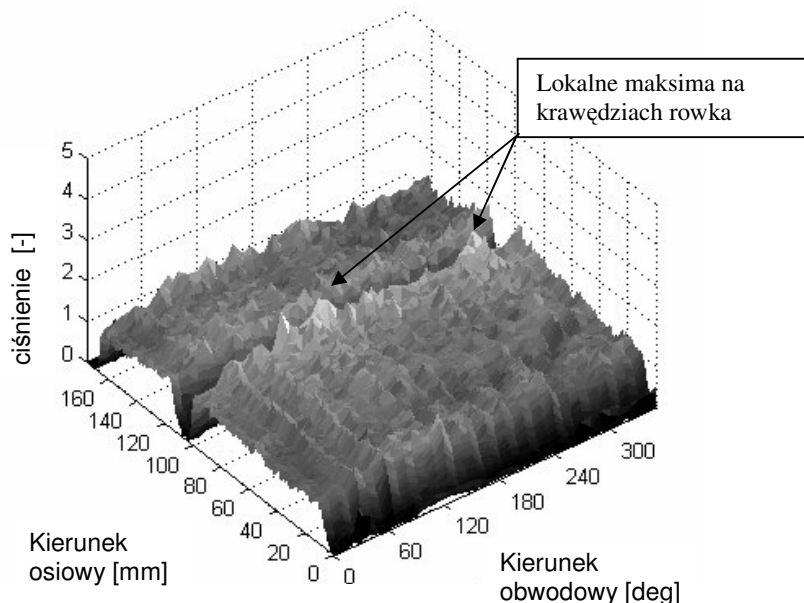
rozdzielonymi warstwą smaru (cieczy). Piszą o konieczności skalowania aparatury, czyli wykonania wzorcowej zależności dla elementów wykonanych z określonych materiałów, o określonej chropowatości i rozdzielonych określonym smarem.

Próba przemysłowego wykorzystania techniki ultradźwiękowej były opisane w pracy [5] badania rozkładów ciśnienia między piastą koła kolejowego osadzonego wciskowo na pokrytej smarem osi kolejowej. Części pochodziły z pociągu TGV a celem badania było wykrycie koncentracji naprężeń będących przyczyną pęknięć zmęczeniowych osi. Badania współczynnika odbicia na granicy oś-piasta były możliwe dzięki temu, że oś posiadała na całej długości centralny otwór umożliwiający dojście z głowicą „pod piastę”, co pokazano na rysunku 5. Wykorzystano metodę zanurzeniową (otwór osi wypełniony wodą) i fale o częstotliwości 10 MHz generowane i odbierane przez sferyczną głowicę skupiającą z ogniskiem o średnicy 1,8 mm. Rysunek 6 pokazuje rozkład wartości proporcjonalnej do ciśnienia na powierzchni styku oś-piast w rozwinięciu. Widoczne są lokalne ekstrema ciśnienia w pobliżu rowka oraz na krawędziach piasty. Autorzy nie podali bezwzględnych wartości ciśnienia ponieważ nie przeprowadzili odpowiedniej kalibracji. Jednak i bez niej

udowodnili istnienie lokalnych koncentracji naprężeń, szczególnie w okolicach rowka wytoczonego w piaście bez zaokrągleń.



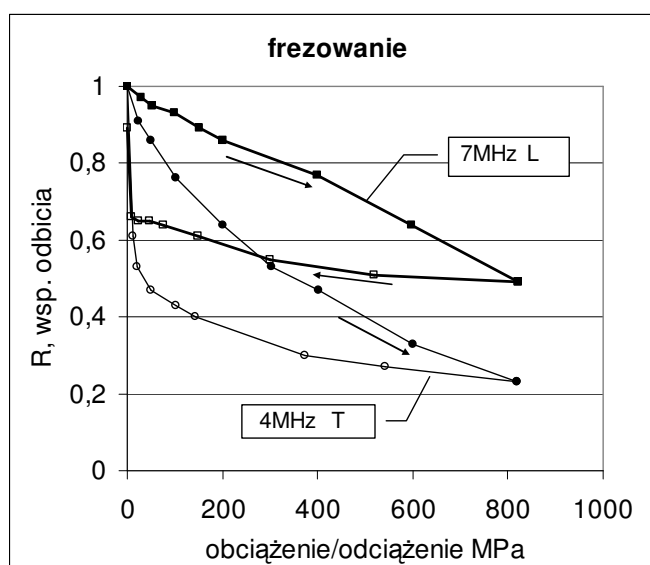
Rys. 5. Schemat badania współczynnika odbicia skupionej wiązki fal od powierzchni piasty koła kolejowego – osi. Badanie zanurzeniowe z otworu w osi. Według pracy [5].



Rys. 6. Rozkład wartości proporcjonalnej do ciśnienia na powierzchni walcowej między piastą a osią w rozwinięciu (z pracy [5]).

Z przedstawionych wyżej przykładów wynika, że wykorzystanie współczynnika odbicia fali podłużnej od granicy metal-metal do ilościowej oceny jakości połączenia (naprężenia) jest możliwe pod warunkiem, że przed oceną przeprowadzona została kalibracja metody (patrz rysunek 3). Natomiast podobne badania mające na celu kontrolę degradacji połączenia wciskowego (wskutek na przykład relaksacji naprężeń własnych) praktycznie nie są możliwe. Wynika to stąd, że przy zmniejszaniu nacisku między plastycznie odkształconymi („dopasowanymi” do siebie) w czasie montażu połączenia powierzchniami, współczynnik odbicia fali podłużnej praktycznie nie zmienia się. Jego wartość rośnie dopiero w momencie, gdy ciśnienie między powierzchniami znacznie spada czyli w momencie, gdy połączenie traci już zdolność do przenoszenia obciążeń. Własne badania pokazały, że nieco bardziej czuła na spadek ciśnienia między elementami jest fala poprzeczna. Na rysunku 7 pokazano zależność współczynnika odbicia fali podłużnej i poprzecznej od granicy kontaktujących się próbek w

funkcji nacisku. Pokazano zmiany w czasie ściskania i odciążania. Odciążanie symuluje w tym przypadku na przykład degradację jakości połączenia skurczowego wskutek relaksacji naprężeń. Eksperyment [6] wykonano na próbkach, z których jedna była gładka (polerowana) a druga obrobiona (dokładne frezowanie). Monitorowano zmiany współczynnika odbicia fali rozchodzącej się w „gładkiej” próbce. Widoczny jest monotoniczny spadek współczynnika odbicia w czasie ściskania zarówno dla fali podłużnej jak i poprzecznej. Natomiast w czasie odciążania wartość współczynnika odbicia fali podłużnej zmienia się jedynie o 13% i rośnie dopiero przy całkowitym odciążeniu.



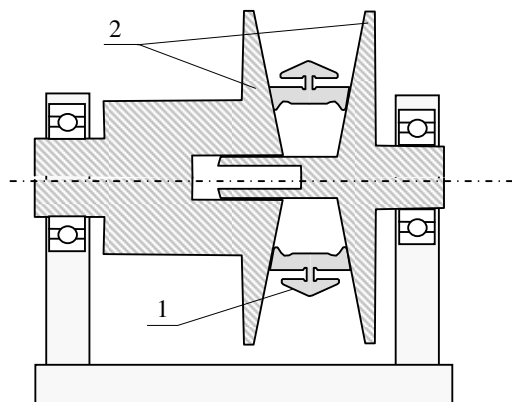
Rys. 7. Zależność współczynnika odbicia fal podłużnej i poprzecznej od granicy dwóch próbek stalowych (gładka i frezowana) w funkcji obciążania i odciążania. T – fala poprzeczna, L – fala podłużna (z pracy [6]).

Wyraźniejsze zmiany w czasie odciążania, choć nadal znikome, obserwowane są dla fali poprzecznej. Dla spadku ciśnienia między elementami równego 90% maksymalnego, wartość współczynnika odbicia fali poprzecznej rośnie o blisko 20%. Niestety praktyczna realizacja pomiaru falą poprzeczną jest w warunkach przemysłowych trudniejsza ponieważ wymaga stosowania specjalnych środków sprzęgających.

3. BADANIA KONTAKTU METALOWEGO ŁAŃCUCHA KLINOWEGO Z KOŁEM PRZEKŁADNI

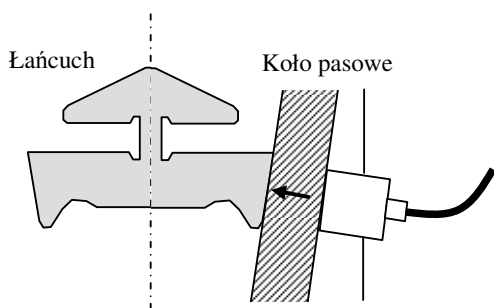
W niektórych maszynach do przenoszenia napędu stosowane są pasy (łańcuchy) klinowe zbudowane z połączonych ze sobą cienkich, płaskich metalowych elementów współpracujących z metalowymi kołami pasowymi. Badania takiego łańcucha opisane są w pracy [7] a schematyczny przekrój przekładni, z regulowanym przełożeniem, pokazano na rysunku 8. Element łańcucha posiada płaską, rowkowaną powierzchnię i kontaktuje się ze stożkowymi, gładkimi powierzchniami kół pasowych. Oznacza to, że oba elementy stykają się teoretycznie jedynie wzdłuż linii leżącej na tworzącej stożka. Wskutek odkształceń sprężystych zarówno elementu łańcucha jak i koła, rzeczywista powierzchnia kontaktu jest większa. Cała przekładnia pracuje ze smarowaniem olejowym. Do badania współczynnika odbicia od powierzchni styku łańcucha z kołem zastosowano głowicę na fale podłużne o częstotliwości 5 MHz i przetworniku o średnicy 6 mm. Grubość elementu łańcucha wynosi 1,5 mm co oznacza, że amplituda fali odbitej od granicy koło-łańcuch informuje o warunkach kontaktu koła z łańcuchem uśrednionych dla 4 elementów łańcucha. W przypadku kontaktu płaskich, chropowatych powierzchni obecność cieczy (w tym przypadku oleju) między stykającymi się elementami powoduje, że w miarę narastania siły ściskającej współczynnik

odbicia fali od granicy przestaje się zmieniać już przy osiągnięciu stosunkowo małego ciśnienia. Dzieje się tak dlatego, że ciecz uwięziona między nierównościami powierzchni hamuje wzrost rzeczywistej powierzchni kontaktu metal-metal.

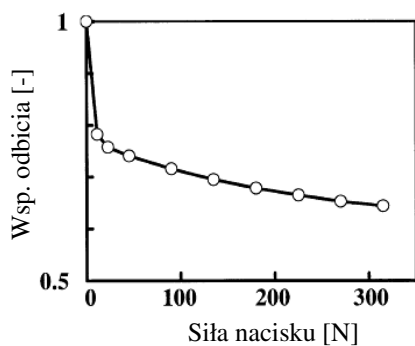


Rys.8. Przekrój przekładni z paskiem klinowym w postaci łańcucha metalowego.
1 – element łańcucha, 2 - koła pasowe.
(z pracy [7]).

W przypadku opisywanych łańcuchów składających się z cienkich elementów z owkowanymi powierzchniami niebezpieczeństwa takiego nie ma ponieważ olej może swobodnie wypływać z obszarów kontaktu i nie bierze udziału w przenoszeniu obciążenia między elementem łańcucha a kołem pasowym. Schemat badania pokazano na rysunku 9. Pracująca głowica ultradźwiękowa osadzona jest na zewnętrznej powierzchni koła pasowego, fala podłużna pada prostopadle na granicę styku elementów. Przewód obracającej się wraz z kołem głowicy wyprowadzony jest przez wydrążoną oś przekładni do obrotowego konektora. Układ pomiarowy wyskalowano na specjalnie wykonanym stanowisku pozwalającym na kontrolowane dociskanie elementów łańcucha do kół przekładni. Uzyskano pokazaną na rysunku 10 zależność między amplitudą echa fali odbitej od granicy od siły docisku działającej na jednostkę długości łańcucha.

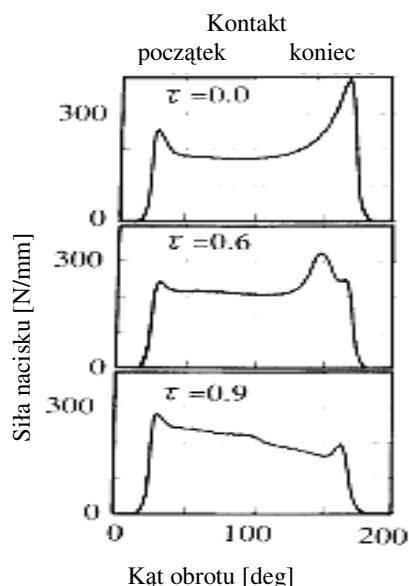


Rys. 9. Schemat badania kontaktu elementy łańcucha – koło pasowe głowicą normalną na fale podłużne (z pracy [7]).



Rys. 10. Zależność współczynnika odbicia fali od granicy koło – elementy łańcucha od jednostkowej siły nacisku [N/mm] (z pracy [7]).

Rysunek 11 pokazuje wyniki badania zmian współczynnik odbicia w czasie pracy przekładni. Wykresy pokazują zależność jednostkowej siły nacisku łańcucha na koło od kąta obrotu koła



Rys. 11. Czasowe przebiegi współczynnika odbicia na granicy koło pasowe – element łańcucha dla różnych momentów obrotowych przekazywanych przez przekładnię, τ - wartość momentu przekazywanego przez przekładnię odniesiona do wartości maksymalnej (z pracy [7]).

pasowego z głowicą dla trzech różnych momentów obrotowych przekazywanych przez przekładnię. Pomiary wykonano przy prędkości obrotowej koła równej 300 obr/min. Dla kątów około 0 – 25 deg siła nacisku jest równa zero (współczynnik odbicia ma wartość 1). Odpowiada to obrotowi koła do momentu wejścia w styk z łańcuchem. Przy dalszym obrocie siła gwałtownie narasta, następnie utrzymuje pewien poziom, po czym spada w momencie, gdy ogniwa łańcucha tracą kontakt z kołem. Widoczne są różne przebiegi sił w zależności od siły rozciągającej w łańcuchu (czyli od przekazywanego momenty).

Badania wykazały, że maksymalne naciski elementów łańcucha na koło, prowadzące do szybkiego zużycia elementów, występują dla najniższych obciążeń przekładni, w końcowym momencie pracy elementu łańcucha.

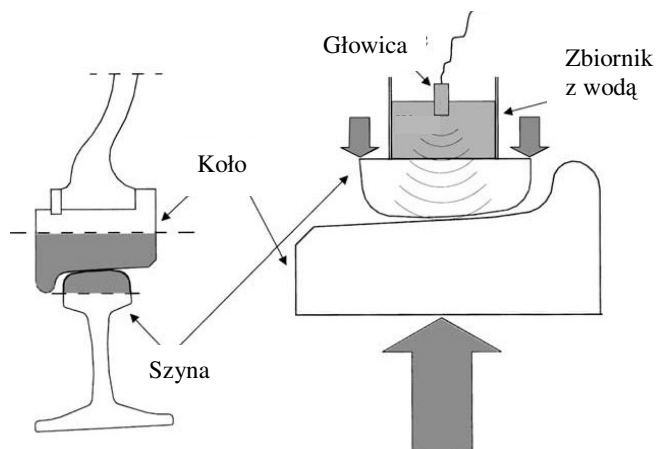
4. OCENA RZECZYWISTEJ POWIERZCHNI KONTAKTU SZYNA-KOŁO KOLEJOWE

Ważnym zagadnieniem z punktu widzenia trwałości torów i taboru kolejowego jest rozkład naprężeń kontaktowych między szyną a kołem kolejowym. W pracy [8] opisano badania rozkładu naprężeń na powierzchni kontaktu szyny (60kg/m) i koła kolejowego (średnica 260mm). Pomiary, zgodnie ze schematem pokazanym na rysunku 12, przeprowadzono na wycinku koła i próbce wyciętej z szyny. Elementy te ściskano siłami od 0 do 10^3 N. Do badania rozkładu współczynnika odbicia fali podłużnej od granicy kontaktujących się elementów wykorzystano głowicę ogniskującą o częstotliwości 10 MHz. Ognisko znajdowało się na powierzchni odbijającej a obszar skanowania wynosił 8 x 8 mm.

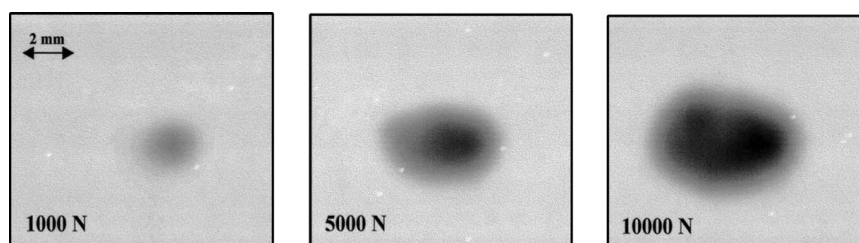
Rysunek 13 pokazuje wyniki badania dla trzech różnych sił dociskających elementy. W miarę narastania siły widoczny jest rozwój eliptycznego pola kontaktu, którego wymiary dla siły 10^3 N wynoszą 2,85*1,7mm.

Aby uzyskać bezwzględne wartości naprężeń na granicy koło-szyna autorzy przeprowadzili skalowanie układu pomiarowego wykorzystując styk sfery z płaską powierzchnią, dla którego rozkłady ciśnienia mogą być dokładnie obliczone. Wykorzystując skalowanie obliczyli wartości naprężeń kontaktowych między kołem i szyną a przykład ich rozkładu pokazano na rysunku 14. Widoczny jest nierównomierny rozkład naprężeń z dwoma ekstremami będący wynikiem zużycia powierzchni koła, z którego wycięto próbkę.

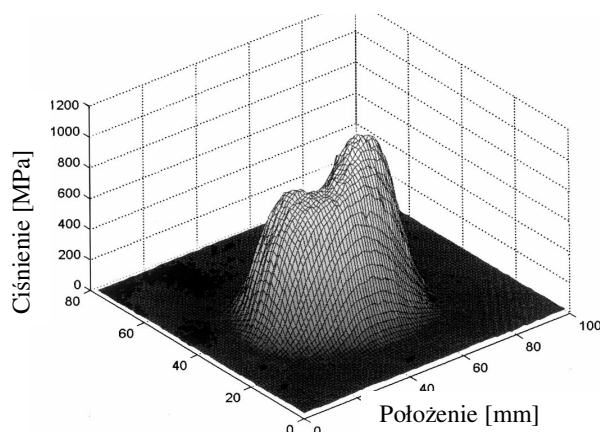
Kontynuacją opisanych wyżej badań było wyznaczenie rzeczywistej powierzchni kontaktu koło-szyna (RCA) opisane w [9]. Tym razem pomiary przeprowadzono na kole o średnicy 860mm a celem badań było określenie zależności RCA od uśrednionej chropowatości



Rys. 12. Schemat badania współczynnika odbicia fal podłużnych od granicy szyna-koło kolejowe (z pracy [8]).



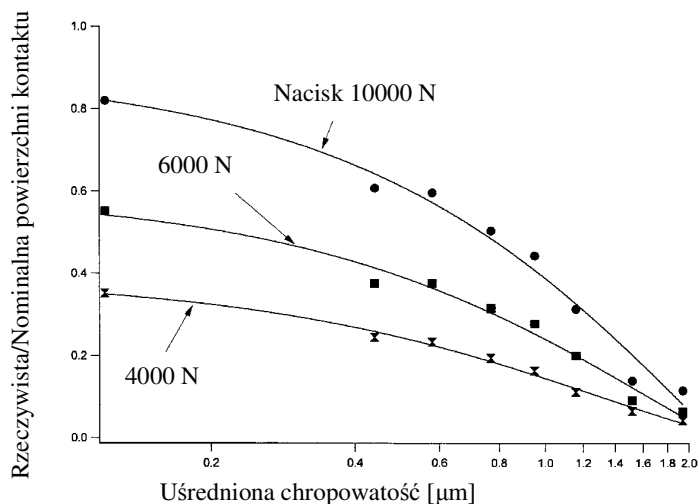
Rys. 13. Zmiany pola kontaktu koło-szyna ze wzrostem siły dociskającej (z pracy [8]).



Rys. 14. Rozkład ciśnienie między kołem i szyną (z pracy [8]).

powierzchni koła i szyny oraz od siły nacisku. W badaniach autor wykorzystał nieogniskujące głowice o częstotliwościach 5, 10 i 15MHz, o średnicach wiązek zbliżonych do powierzchni styku koło-szyna. Powierzchnie badanych próbek przygotowano papierami ściernymi o óżnych gradacjach uzyskując średnie chropowatości o wysokościach od 0,12 do 1,94 μm . Wyniki pomiarów obrazujące zależność stosunku nominalnej do rzeczywistej powierzchni kontaktu, w zależności od chropowatości i siły przenoszonej przez połączenie pokazano na

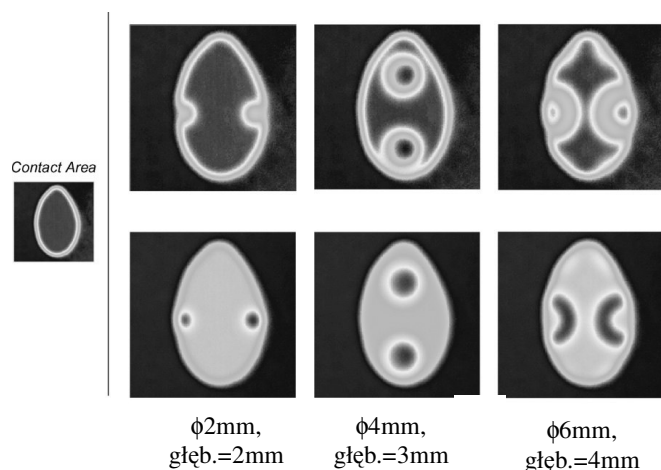
rysunku 15. Badania prowadzono pod naciskami prowadzącymi do powstania maksymalnego ciśnienia sięgającego 700 MPa.



Rys. 15. Zależność stosunku rzeczywistej do nominalnej powierzchni kontaktu koło szyna dla trzech różnych obciążeń od średniej chropowatości powierzchni (z pracy [9]).

Możliwość badania rozkładów ciśnienia na powierzchni styku koło-szyna zaowocowały pracami nad wykrywaniem powierzchniowych i wewnętrznych, ukrytych pod powierzchnią toczną koła, wad we wieńcach kół kolejowych [10]. Obecność wady i wywołana nią lokalna utrata sztywności materiału koła mają swoje odbicie w rozkładzie ciśnienia i współczynnika odbicia. Teoretycznie, prowadząc szybkie badania od strony szyny, na podstawie rozkładu ciśnienia na powierzchni styku, możliwa jest ocena jakości stanu powierzchni tocznej koła i wykrywanie wad leżących płytko pod tą powierzchnią.

Rysunek 16 pokazuje rozkłady ciśnienia uzyskane głowicą ogniskującą o częstotliwości 10 MHz od strony szyny, dla próbki koła z wadami w postaci płaskodennych otworów, których czoła leżały w odległościach od 2 do 4 mm od powierzchni kontaktu z szyną. Po lewej stronie pokazano rozkład ciśnienia dla koła bez wad. Po prawej stronie, na których widoczne są zaburzenia rozkładu spowodowane istnieniem w wieńcu koła wad sztucznych położonych blisko powierzchni tocznej.



Rys. 16. Rozkłady ciśnienia na powierzchni kontaktu szyna-koło z wadami sztucznymi, dla nacisków 20kN (u góry) i 40kN (u dołu). Z lewej strony obraz dla koła bez wad (z pracy [10]).

Ciekawym wnioskiem z pracy jest możliwość wykorzystania niskiego współczynnika odbicia na granicy szyna-koła (gładkie powierzchni, silny docisk) jako skutecznego „suchego”

sprężenia akustycznego, do klasycznego wykrywania metodą echa wad w kołach przejeżdżających ponad miejscem zamontowanej w szynie głowicy lub zespołu głowic.

5. „SUCHE” SPRĘŻENIE AKUSTYCZNE

Osiągnięcie wysokiej rzeczywistej powierzchni kontaktu między ciałami o podobnych opornościach akustycznych umożliwia transmisję fal ultradźwiękowych z jednego ciała do drugiego. Umożliwia więc „suche”, bez potrzeby stosowania cieczy, sprężenie akustyczne. Badania temperaturowych zależności prędkości propagacji fal podłużnych i poprzecznych, z takim suchym sprężeniem były opisane w [11]. Przedstawiono tam możliwość sprzężenia przetwornika piezoelektrycznego pokrytego srebrną (miękką) elektrodą z płaską powierzchnią metalowej próbki obrobionej mechanicznie (frezowanie) i wygładzonej ręcznie drobnym papierem ściernym. Badania prowadzono falami o częstotliwości 4 MHz a do uzyskania poprawnego sprężenia akustycznego wystarczało ciśnienie oszacowane na jedynie 20 MPa. Efekt sprężenia osiągnięto dzięki temu, że plastyczna warstwa srebra stosunkowo łatwo odkształcała się i dopasowywała do nierówności powierzchni próbki aluminiowej. Badania wykazały, że łatwiej uzyskuje się suche sprężenie dla fal poprzecznych niż dla fal podłużnych. Jest to potwierdzeniem obserwacji innych, mówiących o tym, że głowice normalne na fale poprzeczne „potrafią pracować na sucho, po silnym dociśnięciu” (co praktycznie nie jest osiągalne głowicami normalnymi na fale podłużne o megahercowych częstotliwościach).

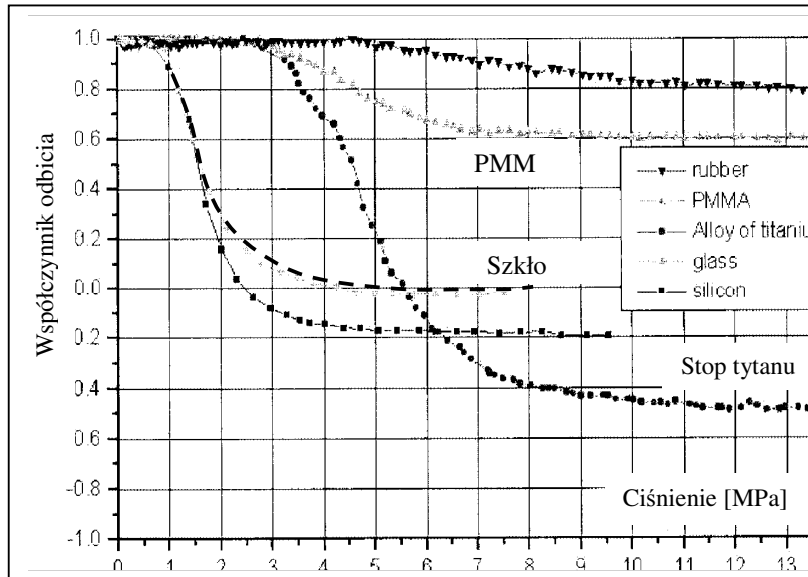
Do badań prowadzonych przy suchym sprężeniu falami o wyższych częstotliwościach, na twardych, trudno odkształcających się próbkach, konieczne jest zastosowanie bardzo gładkich powierzchni kontaktu. W pracy [12] opisano głowicę ultradźwiękową ze sztywną, szklaną linią opóźniającą o gładkim, wypolerowanym do optycznej gładkości zakończeniu (nierówności poniżej 5 nm), którym dociskana jest do również gładkiej powierzchni próbki. Przed pomiarami powierzchnie próbek były starannie czyszczone. Opisana metoda umożliwia pomiary współczynnika odbicia od granicy szkło–próbka w zakresie częstotliwości od 10 do 120 MHz dla fal podłużnych i 5 MHz dla fal poprzecznych (innych częstotliwości fal poprzecznych autorzy nie stosowali). Na rysunku 17 pokazano zależności współczynnika odbicia od ciśnienia na granicy szklana linia opóźniająca – próbka, dla różnych materiałów próbek. Ciśnieniowy współczynnik odbicia, w zależności od oporności akustycznych materiałów, może przyjmować wartości dodatnie, ujemne lub zero jeśli kontaktujące się próbki są wykonane z materiałów o takich samych opornościach falowych. Rysunek pokazuje takie trzy przypadki. Dla szklanego falowodu dociskanego do szklanej próbki, po osiągnięciu odpowiedniego ciśnienia, współczynnik odbicia zbliża się zgodnie z oczekiwaniem do zera. Dla próbki w PMM, o oporności falowej niższej niż oporność szklanego falowodu, współczynnik odbicia jest w całym zakresie ciśnień dodatni. Dla próbki ze stopu tytanu, o oporności falowej wyższej niż dla szkła, współczynnik odbicia początkowo maleje, osiąga zero i dla większych ciśnień osiąga wartości ujemne. Oznacza to, że amplituda echa od granicy szklany falowód – tytan maleje, osiąga zero po czym rośnie ale faza impulsu jest zmieniona o 180° . Oznacza to również, że teoretyczna wartość ciśnieniowego współczynnika odbicia, zgodna ze wzorem pokazanym niżej, odpowiada jedynie idealnym warunkom połączenia obu ośrodków. Natomiast dla powierzchni chropowatych, stykających się jedynie wierzchołkami nierówności różni się od niej zarówno wartością jak i fazą.

Autorzy opisywanej pracy stwierdzili, że w ich pomiarach (gładkie, czyste powierzchnie, silny docisk) różnica między wartością współczynnika odbicia liczoną dla idealnych warunków kontaktu a wynikami uzyskanymi dla ciśnień powyżej 10 MPa wynosi nie więcej niż 2%. Pozwoliło to na wykorzystanie opisywanej głowicy do obliczania gęstości badanych próbek na podstawie zmierzonego współczynnika odbicia fal ze wzoru:

$$\rho = \frac{Z_1}{V_{\text{próbk}}}\left(\frac{1-R}{1+R}\right)$$

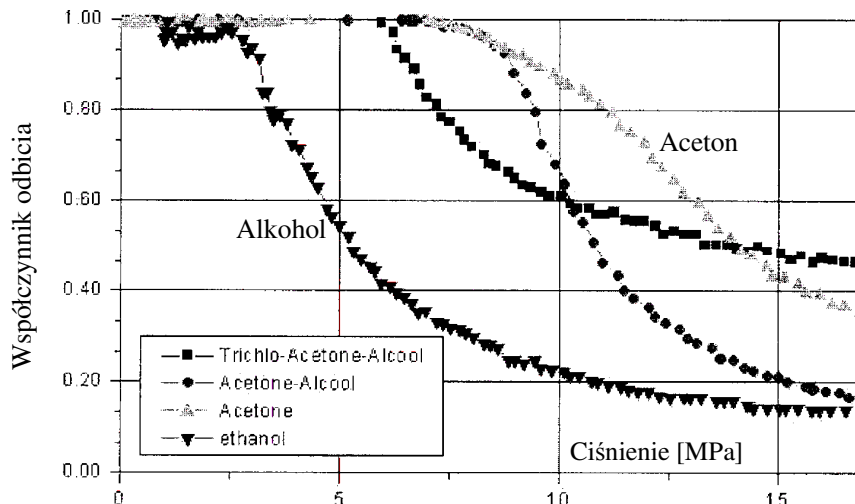
gdzie: Z_1 – oporność falowa linii opóźniającej, $V_{\text{próbk}}$ – prędkość fal w próbce,
 R – współczynnik odbicia od granicy szkło-próbka ze wzoru $R = (Z_1 - Z_2)/(Z_1 + Z_2)$.

Jednym z celów prowadzonych badań była ocena degradacji powierzchni szkła stosowanego w pojemnikach do składowania odpadów radioaktywnych. Autorzy zauważyli, że



Rys. 17.
 Zależności współczynnika odbicia od granicy szklana linia opóźniająca – próbka od ciśnienia, dla różnych materiałów próbek (z pracy [12]).

uzyskiwane wyniki silnie zależą od nawet drobnych zanieczyszczeń powierzchni próbki. Na rysunku 18 pokazano zależność współczynnika odbicia od granicy szklana linia opóźniająca-szklana próbka od ciśnienia, dla próbek oczyszczanych przed pomiarem różnymi rozpuszczalnikami. Okazało się, że dla powierzchni oczyszczonej acetonem współczynnik odbicia zmienia się znacznie wolniej niż oczyszczonej alkoholem. Autorzy uznali, że stosowana przez nich metoda może być również przydatna w ocenie stopnia oczyszczenia powierzchni.

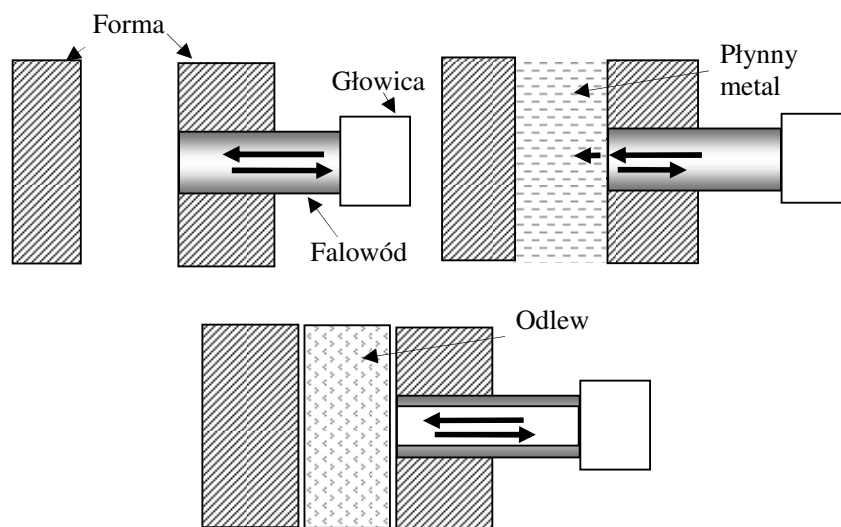


Rys. 18.
 Zależność współczynnika odbicia od gładkiej granicy szkło-szkło od stopnia oczyszczenia powierzchni (z pracy [12]).

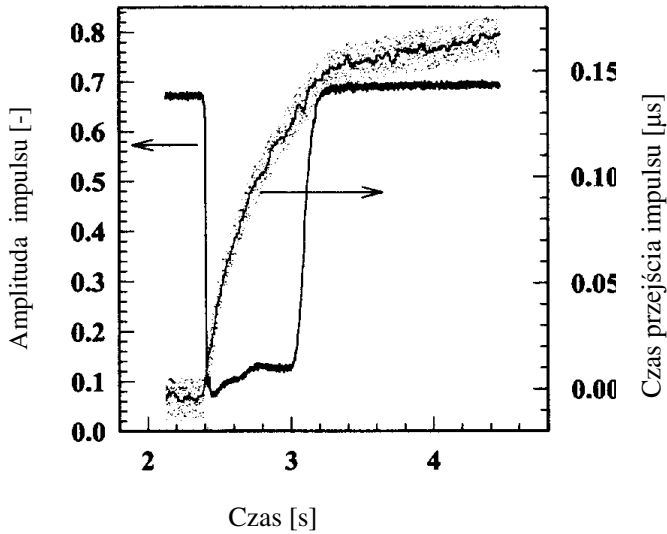
6. BADANIA STOPNIA PRZYLEGANIA ODLEWU CIŚNIENIOWEGO DO FORMY

Odbicie fal ultradźwiękowych od granicy metalowa forma-wypraska z tworzywa sztucznego były wykorzystywane do badania przebiegu procesu wytwarzania wyrobów z tworzyw sztucznych już w latach 90-tych [13]. W pracy [14] opisano podobne wykorzystanie pomiarów współczynnika odbicia ale w zastosowaniu do ciśnieniowych odlewów aluminiowych. Różnice między produkcją wyprasek z tworzywa sztucznego a odlewu metalowego to inne temperatury formy oraz inne prędkość napełniania formy (w przypadku ciśnieniowego odlewu aluminiowego jej napełnianie trwa jedynie 40ms). Do kontroli przebiegu procesu odlewania wykorzystano fale podłużne o częstotliwości 5 MHz generowane i odbierane przez głowicę wyposażoną w stalowy falowód. Schemat badania pokazano na rysunku 19. W celu wyeliminowania odbić w chłodzonych wodą, długich i wąskich falowodach zastosowano falowody z rdzeniem cyrkonowym i płaszczem zewnętrznym ze stali nierdzewnej. Trzy falowody osadzono w ściankach formy odlewniczej tak, że ich płaskie końce tworzą fragment wewnętrznej ścianę formy i kontaktują się z płynnym metalem. W czasie procesu odlewania ciśnieniowego ważne jest kiedy płynny metal, utrzymywany pod ciśnieniem po wypełnieniu formy, zastyga w kanałach doprowadzających i nadlewach. Podczas krzepnięcia metal kurczy się i między nim a formą, również i czołem falowodu, dochodzi do powstania szczeliny, która utrudnia odprowadzania ciepła z odlewu do formy.

Przed zalaniem formy wartość współczynnika odbicia fal od końca falowodu jest nieco niższa niż 100%. Wynika to stąd, że po każdym cyklu wewnątrz formy jest pokrywane warstwą rozdzielającą, która nieznacznie wpływa na wartość współczynnika odbicia. W czasie zalewania formy płynnym metalem, w momencie zwilżenia czoła falowody wartość współczynnika odbicia spada. Podczas krzepnięcia metalu wartość współczynnika odbicia zmienia się nieznacznie w wyniku zmian własności odlewu i temperaturowych zmian własności falowodu, po czym gwałtownie rośnie w momencie powstania szczeliny między odlewem a formą. Na rysunku 20 pokazano przykładowe wyniki pomiarów. Wykres przedstawia zmiany współczynnika odbicia w funkcji czasu. Widoczny jest moment zalania formy, nieznaczne zmiany jego wartości podczas krzepnięcia metalu i wzrost w czasie powstawania szczeliny między odlewem a formą. Dodatkowo na wykresie pokazano zmiany czasu przejścia impulsu w falowodzie wynikające ze zmian jego temperatury. Po zalaniu formy temperatura falowodu rośnie, prędkość fali podłużnej w jego rdzeniu spada co powoduje wzrost czasu przejścia impulsu w falowodzie. Opisane badania pozwoliły na monitorowanie procesu zalewania formy, krzepnięcia metalu i jego skurczu w kilku miejscach formy, praktycznie bez ingerencji w proces odlewania.



Rys. 19. Schemat badania procesu odlewania ciśnieniowego. Pokazana pusta forma, forma wypełniona płynnym metalem i forma z zakrzepniętym, skurczonym odlewem (z pracy [14]).

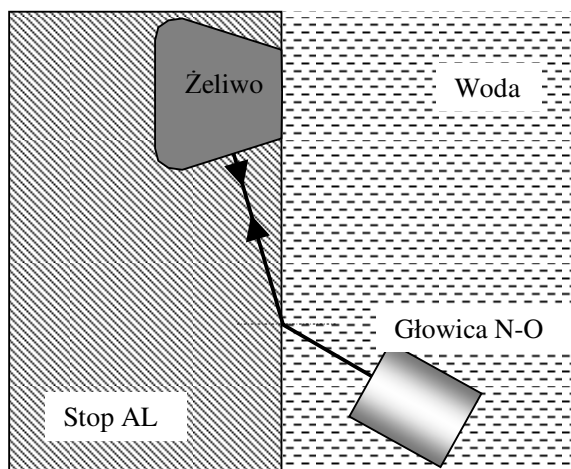


Rys. 18.
Zmiany wartości współczynnika odbicia i czasu przejścia impulsu w czasie cyklu odlewania elementu ze stopu lekkiego (z pracy [14]).

Metoda ultradźwiękowa okazała się skuteczniejsza niż monitorowanie procesu za pomocą termopar zatopionych w formie.

7. BADANIA STOPNIA PRZYLEGANIA ŻELIWNEJ WKŁADKI PODPIERŚCIENIOWEJ DO ODLEWU TŁOKA ZE STOPU LEKKIEGO

Innym zastosowaniem zależności współczynnik odbicia od jakości połączenia w odlewnictwie jest ocena stanu połączenia żeliwnej wkładki z odlewem ze stopu lekkiego [15]. Schemat zanurzeniowego badania przylegania wkładki do otaczającego ją stopu pokazano na rysunku 19. Dla idealnego połączenia materiałów współczynnik odbicia fali podłużnej na granicy lekki stop-żeliwo wynosi 40%. Dla „przyklejenia” wzrasta do 100%. W badaniach wykorzystano głowicę o częstotliwości 4 MHz ustawioną tak, że fala podłużna po załamaniu na granicy stop lekki – woda trafiała prostopadle na powierzchnię wkładki. Okazało się, że różnica amplitud między poprawnym połączeniem a miejscami z brakiem połączenia wynosiła 8-9dB. Wady sztuczne wykonano jako nacięcia w gotowych tłokach oraz przez pokrycie fragmentów wkładki specjalną warstwą rozdzielającą przed zalaniem formy. Długości tych ostatnich mierzone po obwodzie tłoka okazały się dwukrotnie większe niż planowane w wyniku „rozpływania się” substancji rozdzielającej w czasie zalewania formy płynnym metalem.



Rys. 19.
Schemat badania stopnia przylegania żeliwnej wkładki podpierścieniowej do materiały tłoka ze stopu lekkiego (pracy [15]).

8. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyżej sposoby wykorzystanie współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych od powierzchni kontaktu dwóch ciał stałych to w większości badania laboratoryjne choć nakierowane na zastosowania praktyczne. W odróżnieniu od wielu prac teoretyczno-doświadczalnych opisujących odbicie fal od powierzchni kontaktu metal-metal, w pracach tych nie wykorzystuje się zależności współczynnika odbicia od częstotliwości fal. Zamiast tego, do oceny ciśnienia między elementami korzysta się z krzywych skalujących. Takie badania są proste, możliwe do wykonania typowymi głowicami normalnymi i aparaturą ultradźwiękową. Należy jednak pamiętać, że krzywe skalujące odnoszą się jedynie do powtarzalnych warunków badania (częstotliwość fal, chropowatość, substancja rozdzielająca).

Dowodem na to, że monitorowanie zmian współczynnika odbicia od granicy części maszyn może dostarczyć ważnych informacji o pracy urządzenia są prace [7] opisująca badania przekładni klinowej z metalowym łańcuchem oraz praca [14] przedstawiająca proces odlewania ciśnieniowego elementu ze stopu lekkiego.

Wszystkie publikacje poświęcone połączeniom skurczowym opisują stan połączenia nowego. Nie ma prac opisujących zmiany współczynnika odbicia fal w wyniku degradacji jakości połączenia wywołanej relaksacją naprężeń. Wynika to zapewne stąd, że zmiany współczynnika odbicia w czasie zmniejszania ciśnienia są znikome i nie niosą informacji o aktualnym stanie połączenia. Nieliczne tylko prace opisują zależności współczynnika odbicia fal poprzecznych od jakości połączenia co jest zapewne wynikiem mniejszej praktycznej przydatności pomiarów głowicami normalnymi na fale poprzeczne.

W polskiej literaturze z ostatnich lat brak jest prac opisujących wykorzystanie współczynnika odbicia do oceny jakości połączeń skurczowych. Na przykład w pracy [16] przedstawiającej ultradźwiękowe badania naprężeń w połączeniach skurczowych modeli czopa i korby wały korbowego, autor pracy nie podjął próby oceny jakości styku czop-korba z wykorzystaniem odbicia fali od granicy połączenia. Nie wspominał też w opisie stanu zagadnienia, że badania takie były prowadzone w wielu ośrodkach na świecie.

LITERATURA

1. Blessing et al., USA Patent 4,738,139, 1988, Ultrasonic Real-time monitoring device for part surface topography and tool condition in situ
2. A. M. Abdelhay, and I. M. I. Mubark, Ultrasonic evaluation of surface roughness using normal incidence pulse - echo technique, NDT.net • April 2004 • Vol. 9 No.04
3. D. K. Rehbein, B. J. Skillings, J. F. Smith and D. O. Thompson, Ultrasonic Reflection from a Stressed Interface, Journal of Nondestructive Evaluation, Vol.4, Number 1 / March, 1984, pp 3-12
4. Ultrasonic method for measuring internal contact pressure between mating solid parts separated by a liquid film, United States Patent 4870866
5. M.B.Marchall, R. Lewis, R.S. Dwyer-Joyce, D. Demilly, Y. Flamenst, Ultrasonic characterization of Wheel Hub/Axle Interference Fir Pressure, White Rose Cons. ePrints Respository: <http://eprints.whiterose.ac.uk/archive/00000779/>
6. G. Starzyński, S. Mackiewicz, J. Szelązek, Pomiar współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych od styku powierzchni chropowatych pod obciążeniem normalnym, Seria „Fizyczne metody ta zasobu kontroluj srodowiszcz, materialik ta wyrobiv” Nr 13, Lwów 2008, Wyd. Narodowa Akademia Nauk Ukrainy, 144-151
7. Toru Ide, Hirokazu Uchiyama, Takeshi Yoneda, Hirohisa Tanaka, Measurement of contact force between pulley sheave and metal pushing V-belt by means of ultrasonic waves, JSAE Rewie, 22 (2001) 163-167

-
8. M. Pau, F. Aymerich, F. Ginesu, Distribution of contact pressure in wheel-rail contact area, *Wear* 253 (2002) 265-274
 9. M. Pau, Estimation of real contact area in a wheel-rail system by means of ultrasonic waves, *Tribology International* 36 (2003) 687-690.
 10. Pau M., Leban B., Baldi A., Simultaneous subsurface defect detection and contact parameter assessment in a wheel-rail system, *Wear*, Vol. 265, 2008, pp 1837-1847
 11. J. Szelażek, S. Mackiewicz, Pomiary prędkości fal w podwyższonych wysokich temperaturach. *Mat. 37 Krajowej Konferencji Badań Nieniszczących*, Sobieszewo, 21-23 października 2008, Wyd. PTBN-SIMP, str.7-16
 12. Duwattes J., Augereau F., Caplain E., Saurel J-M, Dry coupling ultrasonic high frequency (10-100MHz) sensor for detection of surface and tribological properties at a submicron scale, *Journal of Nondestructive Evaluation*, Vol. 22, No 3, 2003, pp 7992
 13. C.L. Thomas, Sensor concept for polymer injection molding, Ph.D. Thesis, Dept. of Mechanical Engineering, Drexel University, 1993
 14. C.K. Jen, B. Cao, K.T. Nguyen, C.A. Loong, J.G. Legoux, On-line ultrasonic monitoring of a die-casting process using buffer rods, *Ultrasonics*, Vol. 35, 1997, pp.335-344
 15. Szelażek J., Ultradźwiękowe badania połączenia żeliwnej wkładki podpierścieniowej z materiałem tłoka silnika wysokoprężnego. *Silniki Spalinowe*, No 3, 1983, str. 16
 16. Z. Siemiątkowski, Badania technologiczne połączeń skurczowych składanych wałów korbowych, Praca doktorska, Politechnika Radomska, 1999.