

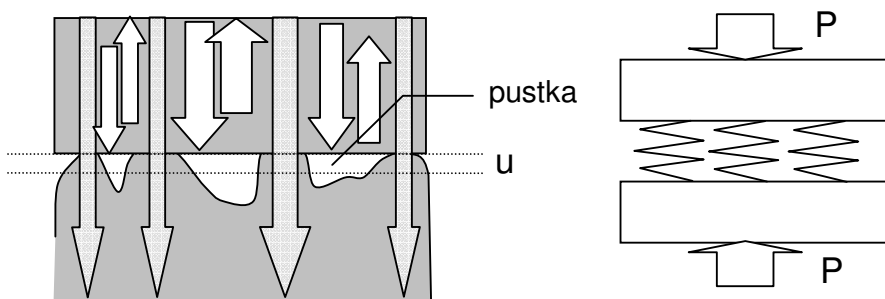
**BADANIA WSPÓŁCZYNNIKA ODBICIA I SZTYWNOŚCI
KONTAKTOWEJ POWIERZCHNI CHROPOWATYCH PRZY
POMOCY FAL ULTRADŹWIĘKOWYCH**

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

1. WPROWADZENIE

Rzeczywiste powierzchnie inżynierskie nie są idealnie gładkie a ich chropowatość zależy od rodzaju obróbki wykończającej. Przy wzajemnym kontakcie takich powierzchni ich styk następuje na wierzchołkach nierówności. Tak więc rzeczywista powierzchnia kontaktu stykających się elementów jest znacząco mniejsza od powierzchni nominalnej a naprężenia występujące w kontaktujących się wierzchołkach są znacznie większe od średnich naprężeń nominalnych. Dla zrozumienia wielu procesów zachodzących na styku dwóch elementów (tarcia, zużycia) niezbędna jest możliwość wyznaczenia lub obliczenia dwóch wielkości opisujących styk powierzchni: rzeczywistej powierzchni styku RCA (*real contact area*) oraz sztywności kontaktowej (*contact stiffness*). Wielkości te zależą zarówno od przyłożonego nacisku jak i od chropowatości powierzchni a ich wyznaczenie nie jest łatwe.

Od wielu lat jedną z licznych prób podejmowanych w celu wyznaczenia wspomnianych wielkości jest zastosowanie fal ultradźwiękowych. Idea pomiaru generalnie jest prosta: gdy fala ultradźwiękowa zostaje skierowana na granicę dwóch kontaktujących się chropowatych powierzchni, część jej energii przejdzie przez granicę do drugiego ośrodka a część zostanie odbita od pustych przestrzeni jak to schematycznie pokazano na rys.1.



Rys 1. Schemat przejścia i odbicia fali ultradźwiękowej i model sztywnościowy

W praktyce, realizacja tej idei napotyka na wiele problemów. Podstawowym z nich jest wzajemna zależność długości fali ultradźwiękowej λ i szerokości pustki w (*ang. gap*, jest to wielkość liczona w kierunku prostopadłym do kierunku propagacji fali), która ma spowodować odbicie fali. Są trzy możliwości:

1. $\lambda \ll w$

Taki przypadek jest niemal idealny do pomiaru rzeczywistej powierzchni styku, gdyż energia sygnału przechodzącego jest proporcjonalna do powierzchni kontaktu, jednak w rzeczywistych warunkach rzadko spotykany. Przeciętna szerokość pustek chropowatych powierzchni wynosi od 5 do 100 μm , co wymagałoby używania fal o długościach mikrometrowych, czyli częstotliwościach rzędu kilkuset MHz. Uzyskanie takich częstotliwości jest możliwe, jednak ze względu na ich bardzo duże tłumienie w typowych materiałach, praktyczne wykorzystanie fal o takich częstotliwościach do pomiarów rzeczywistej powierzchni styku jest niemożliwe.

2. $\lambda \cong w$

Gdy długość fali jest porównywalna z szerokością pustki (w praktyce są to częstotliwości ultradźwiękowe rzędu 10 MHz), występuje zjawisko rozproszenia oraz wzajemnego oddziaływania sąsiadujących pustek. W tym obszarze częstotliwości, na wielkość energii transmitowanej (lub odbitej) wpływa dokładny kształt każdej pustki oraz ich wzajemne usytuowanie. Jest to reżim częstotliwości bardzo trudny do ilościowej interpretacji w kategoriach parametrów powierzchni styku.

3. $\lambda \gg w$

Gdy długość fali wzrasta tak, że jest znacząco większa od wielkości pustki, sygnał przechodzący przestaje zależeć od kształtu i wielkości pojedynczej pustki, a jedynie od uśrednionych własności sprężystych powierzchni kontaktu. W takim przypadku (nazywanym obszarem niskoczęstotliwościowym - *low frequency regime*) można do opisu oddziaływania fali z powierzchnią graniczną zastosować tzw. model sztywnościowy (*spring model*) [1], w którym warstwę graniczną modeluje się za pomocą warstwy równomiernie rozłożonych sprężynek (rys. 1). W ramach tego modelu współczynnik odbicia fali ultradźwiękowej jest bezpośrednio zależny od sztywności kontaktowej (sztywności sprężynek) stykających się powierzchni. Nie ma niestety jednoznacznej zależności między sztywnością kontaktową a rzeczywistą powierzchnią styku. Sztywność kontaktowa zależy bowiem nie tylko od sumarycznej powierzchni styku ale również od liczby, wielkości oraz kształtu wierzchołków nierówności stanowiących punkty styku. Ta sama rzeczywista powierzchnia styku rozłożona na wiele małych punktów kontaktu będzie dawała większą sztywność kontaktową niż rozłożona na mniejszą liczbę dużych punktów styku.

Współczynnik odbicia R_{12} od styku dwóch chropowatych powierzchni można w ramach modelu sztywnościowego opisać następująco [2]:

$$R_{12} = \frac{z_1 - z_2 + i\omega(z_1 z_2 / K)}{z_1 + z_2 + i\omega(z_1 z_2 / K)} \quad (1)$$

gdzie ω jest częstotliwością kątową ($2\pi f$) a z_1 i z_2 impedancjami akustycznymi obu stykających się materiałów.

Gdy oba stykające się elementy wykonane są z tego samego materiału ($z_1 = z_2$) wzór (1) można uprościć do postaci:

$$R_{12} = \frac{1}{\sqrt{1 + (2K / \omega z)^2}} \quad (2)$$

gdzie $|R_{12}|$ jest bezwzględną wartością zespolonego współczynnika odbicia.

Jak widać, w odróżnieniu od odbicia fal od idealnej granicy styku dwóch ciał stałych, wartość współczynnika odbicia we wzorach (1) i (2) jest funkcją zależną od częstotliwości fali f .

Wielkość K występująca w obu wzorach to wspomniana wcześniej sztywność kontaktowa, która formalnie zdefiniowana jest jako prędkość zmian średniego przyłożonego nacisku P_{nom} w funkcji zbliżenia średnich linii chropowatych powierzchni u :

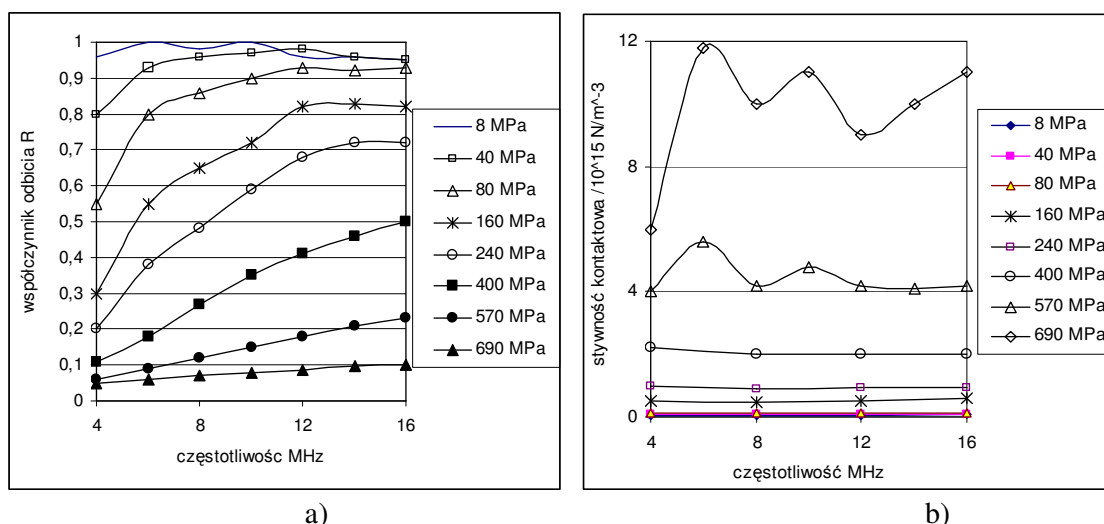
$$K = -\frac{dP_{nom}}{du} \quad (3)$$

Pomiar sztywności kontaktowej metodami mechanicznymi jest bardzo trudny, zwłaszcza dla względnie gładkich powierzchni. Wynika to z faktu, że wielkość u jest często mniejsza od $1\mu\text{m}$ i pomiar jej zmian (rzędu setnych części μm) natrafia na poważne trudności eksperymentalne. Stąd też możliwość wykorzystania do tego celu pomiarów ultradźwiękowych wydaje się być dobrą, praktyczną drogą wyznaczania tej wielkości. Korzystając ze wzorów (1) lub (2) można wyliczać sztywność kontaktową powierzchni styku z pomiarów współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych od tej powierzchni (4).

$$K = \frac{wz}{2} \sqrt{\frac{1}{R_{12}^2} - 1} \quad (4)$$

Dokładność i weryfikację modelu sztywnościowego przedstawili m.in. Dwyer-Joyce i Drinkwater w [5] pokazując na kolejnych wykresach najpierw zależność współczynnika odbicia R od częstotliwości f (rys. 2a) a następnie sztywności kontaktowej (rys. 2b) wyliczonej ze wzoru (4). Jak widać, do obciążenia 400MPa krzywe sztywności kontaktowej są prawie niezależne od częstotliwości. Dla dużych obciążeń zależność ta przestaje być stabilna, ale wynika to z czysto matematycznej relacji między tymi wielkościami

($K : \frac{1}{\sqrt{R^2}}$), która powoduje, że gdy współczynnik odbicia zbliża się do zera jego bardzo niewielkie zmiany (wynikające np. z błędów pomiarowych), powodują znaczące różnice w wartościach obliczanej sztywności. Widać zatem, że aby korzystać z modelu sztywnościowego należy zachować nie tylko reżim niskoczęstotliwościowy, ale także ograniczyć się do średnich obciążeń kontaktowych lub prowadzić bardzo dokładne pomiary w obszarze małego współczynnika odbicia.



Rys. 2 Zależność współczynnika odbicia (a) oraz sztywności kontaktowej (b) od częstotliwości dla powierzchni chropowatych aluminium – stal dla różnych obciążeń całkowitych. [5]

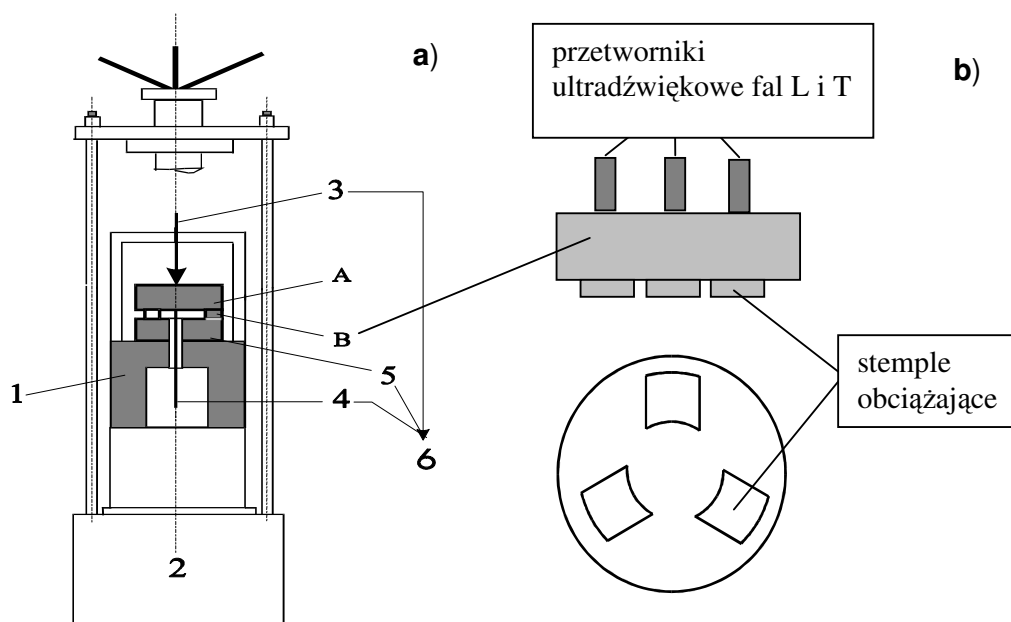
W pracy chcielibyśmy przedstawić układ pomiarowy pozwalający mierzyć współczynnik odbicia fal podłużnych i poprzecznych od powierzchni styku w funkcji przyłożonego nacisku, przedstawić przykładowe wyniki pomiarów oraz zwrócić uwagę na szereg problemów dotyczących interpretacji wyników wykonanych badań przy szacowaniu sztywności kontaktowej oraz rzeczywistej powierzchni styku.

2. EKSPERYMENT

2.1. Stanowisko do jednoczesnego badania współczynnika odbicia i zbliżenia

Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym zbudowanym w IPPT [3], wykorzystującym metodę pomiaru zbliżenia zaproponowaną przez Demkina [4]. Stanowisko umożliwia jednoczesny pomiar zbliżenia u kontaktujących się powierzchni oraz współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych w funkcji zastosowanych nacisków nominalnych P_{nom} , (rys. 3). Styk realizowany jest pomiędzy chropowatą powierzchnią próbki w kształcie walca o wymiarach $\phi 50 \times 30$ mm (rys. 2a) i „idealnie gładką” powierzchnią 3 nóg/stempli przeciwpróbki wykonanej ze stali diamentowej o twardości 68 HRC. Z drugiej strony przeciwpróbki, naprzeciwko stempli, przyklejone zostały trzy identyczne przetworniki ultradźwiękowe (rys. 3b).

Próbka i przeciwpróbka umieszczone są w specjalnie skonstruowanym urządzeniu - 1, które zamontowane jest wewnątrz laboratoryjnej prasy hydraulicznej - 2 umożliwiającej zadawanie nacisków normalnych w zakresie od 0 do 1000 MPa. Zadawane naciski mierzone są za pomocą mostka tensometrycznego - 3 zaś zbliżenie próbek za pomocą czujnika indukcyjnego - 4. Wyniki pomiarów w postaci wykresów zbliżenia próbek oraz współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych w funkcji nacisku nominalnego, tworzone są na bieżąco na ekranie komputera - 5 i zapisywane w postaci cyfrowej do dalszych analiz.



Rys. 3 Schemat stanowiska do pomiarów odkształceń kontaktowych
a) – stanowisko, b) – kształt przeciwpróbki i rozmieszczenie przetworników

W układzie zamontować można dwie różne przeciwpróbki: jedna przeznaczona do pomiarów współczynnika odbicia fal podłużnych (L), druga fal poprzecznych (T). W przeciwpróbce do pomiarów fal podłużnych zastosowano trzy jednakowe przetworniki o

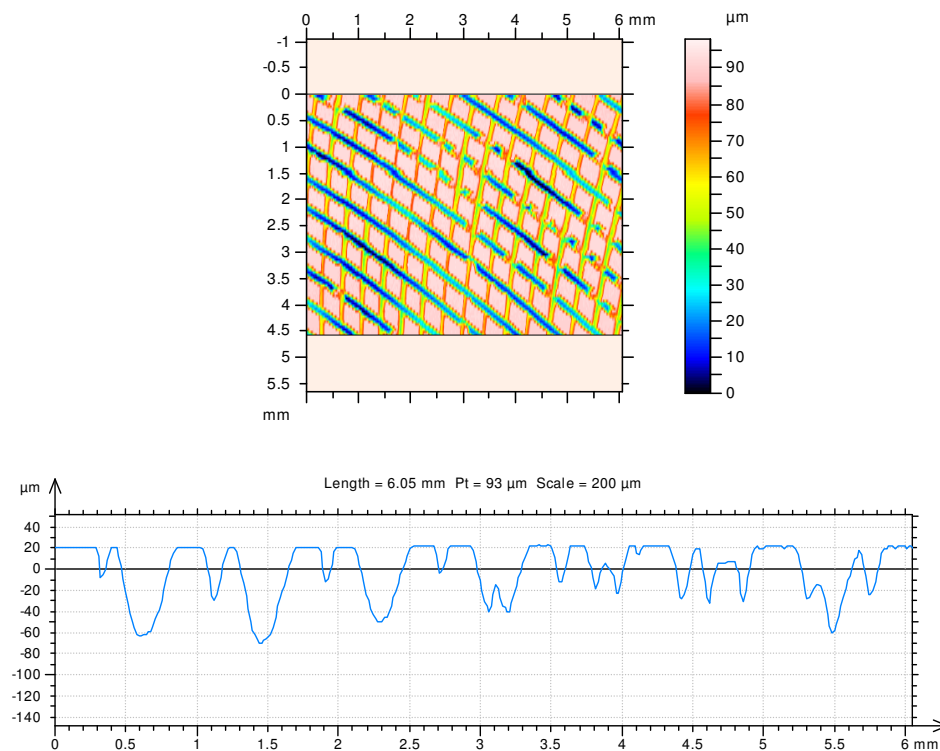
częstotliwości podstawowej ok. 7 MHz, natomiast w przeciwpróbce do pomiarów fal poprzecznych przetworniki o częstotliwości ok. 4 MHz. Częstotliwości przetworników zostały dobrane tak, aby długości wytwarzanych przez nie fal były w stali w przybliżeniu jednakowe ($\lambda = 0,8$ mm). Zastosowanie w każdej z przeciwpróbek 3 jednakowych przetworników pozwoliło zwiększyć dokładność pomiarów poprzez uśrednienie wartości współczynników odbicia uzyskiwanych od powierzchni czołowych 3 stempli.

Cały cykl pomiarowy sterowany jest programem komputerowym, który w sposób ciągły monitoruje wartość przyłożonego do próbki nacisku i po uzyskaniu założonej wartości odczytuje wartość przemieszczenia próbki oraz amplitudy impulsów ultradźwiękowych odbitych od powierzchni stempli. Pomiar amplitud realizowany jest za pomocą jednokanałowego defektoskopu cyfrowego Epoch 4 poprzez sukcesywne przełączanie sygnału wejścia/wyjścia defektoskopu do kolejnych przetworników.

Pomiar może odbywać się zarówno w sposób ciągły, przy stopniowo zmieniającym się nacisku prasy, bądź też w sposób stacjonarny przy ustalonej wartości nacisku. W przypadku pomiarów stacjonarnych oprócz pomiaru amplitudy impulsu możliwa jest pełna rejestracja jego przebiegu czasowego (sygnału RF) oraz dalsza obróbka cyfrowa przy wykorzystaniu transformaty Fouriera.

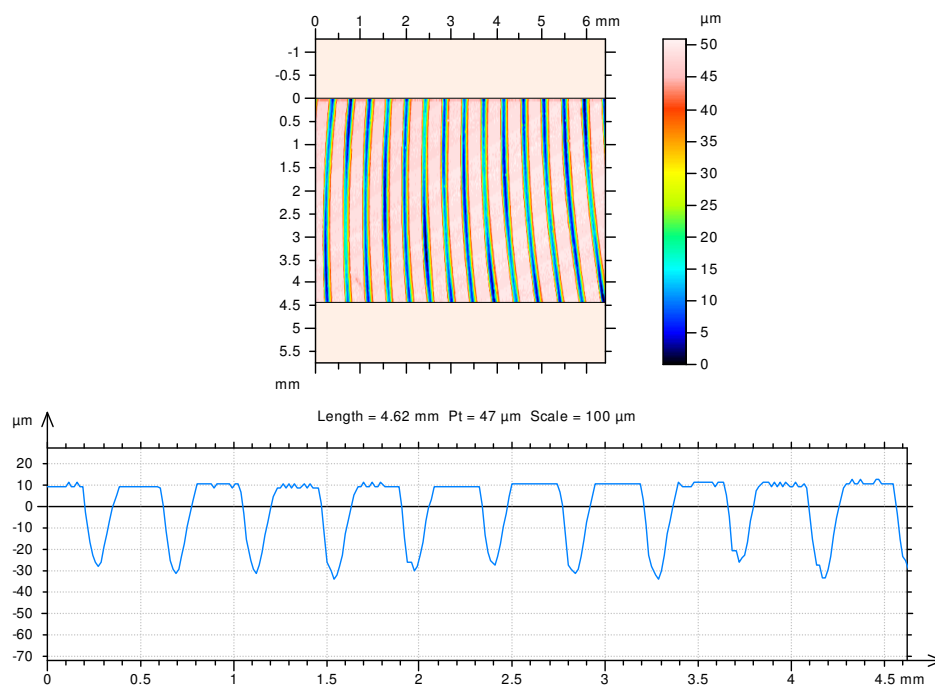
2.2 Pomiary rzeczywistej powierzchni styku (RCA) na powierzchniach modelowych

Dla sprawdzenia dokładności pomiarów ultradźwiękowych RCA przeprowadzono porównanie wyników otrzymanych z badań ultradźwiękowych z pomiarami geometrycznymi na próbkach modelowych. Próbki toczone i dłutowane czołowo były następnie szlifowane i polerowane tak aby otrzymać powierzchnie o różnych stosunkach pustek do wypełnienia materiałowego, czyli o różnej powierzchni styku. Dla takich próbek względnie łatwo jest ocenić profilometrycznie rzeczywistą powierzchnię styku.



Rys. 4a Próbka dłutowana i polerowana, RCA ok. 37%

Do oceny struktury geometrycznej powierzchni wykorzystano profilometr skaningowy zbudowany w oparciu o profilometr konwencjonalny TALYSURF 5M. Tak przygotowana powierzchnia w niewielkim stopniu zmieniać się powinna z obciążeniem. Zatem wynik otrzymany z pomiarów ultradźwiękowych powinien w krótkim czasie po rozpoczęciu obciążenia osiągnąć stałą wartość i utrzymać się na niej przez dalszą część obciążania. Efekt tego zabiegu pokazano przykładowo na rysunkach poniżej (rys. 4a,b).



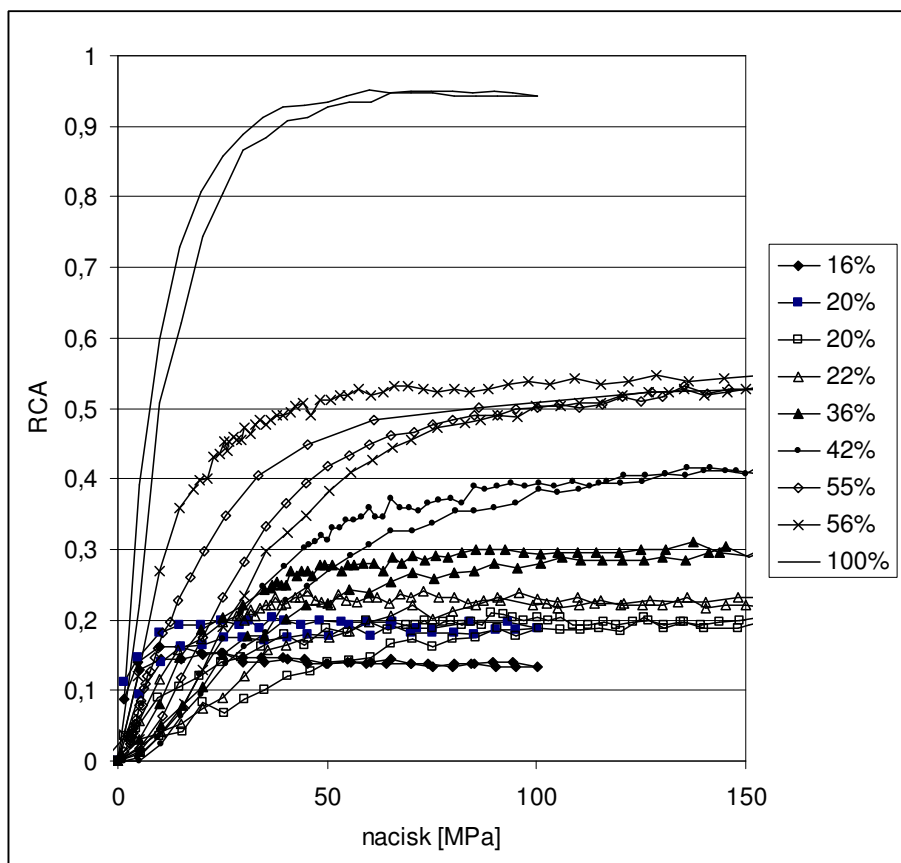
Rys. 4b Próbka dławowana i polerowana, RCA ok. 56%

Przedstawione są na nich, dla próbek dławowanych, mapa warstwicowa oraz przykładowy profil. Z krzywej nośności, posiadając się rozkładem rzędnych można ocenić rzeczywistą powierzchnię styku po polerowaniu próbki (RCA = 37% dla przypadku *a* i RCA = 56% dla przypadku *b*). Dodatkowo można ją porównać z płaskimi częściami profilu, a biorąc pod uwagę, że próbki były dławowane, czyli profile są bardzo do siebie podobne, jest to posunięcie poprawne.

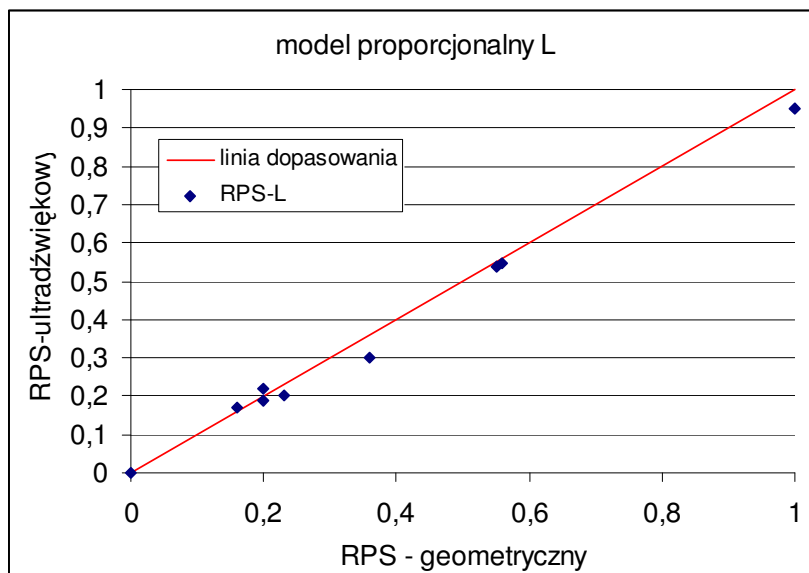
Przygotowane w opisany sposób próbki były obciążane do różnych wartości. Z wyników przedstawionych na rys. 5 widać, że obciążenie do 100MPa było wystarczające i obliczona ze współczynnika odbicia zależność RCA od badanych powierzchni była taka, jak została przewidziana wcześniej. Występuje w niej asymptota na poziomie bardzo zbliżonym do obliczonego z wyników pomiarów stereometrycznych powierzchni. Rysunek 6 zestawia otrzymane wyniki, które jak widać dobrze odpowiadają powierzchniom geometrycznym.

Z tak przeprowadzonych pomiarów wynika możliwość wykorzystania fal ultradźwiękowych do bezpośredniego pomiaru RCA dla powierzchni przygotowanych w opisany wyżej sposób. Ponieważ szerokość pustek jest bardzo duża w stosunku do długości fali, sytuacja ta podlega pod opisany wcześniej we wstępie punkt 1 gdy $\lambda \ll w$, mimo stosowania fali o częstotliwości kilku MHz. Dokładność i odpowiedniość pomiaru jest, jak widać z rysunku 6, bardzo dobra.

W rzeczywistości, takie sytuacje zdarzają się bardzo rzadko, a powierzchnie chropowate po obróbkach technologicznych, są opisane rozkładem statystycznym wielkości (szerokości) pustek, który najczęściej nie spełnia warunków reżimu $\lambda \ll w$.



Rys. 5 Zależność RCA od nacisku nominalnego dla próbek modelowych o różnym stopniu powierzchni potencjalnego kontaktu



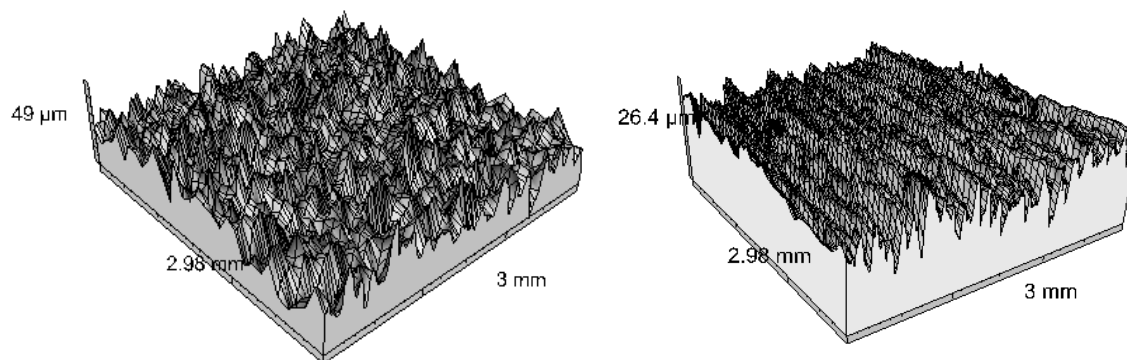
Rys.6. Zestawienie wyników ustalonych wartości RCA z pomiarów ultradźwiękowych (kropki) z odpowiadającymi im wartościami obliczonymi geometrycznie dla próbek modelowych.

Problem niespełnienia relacji między λ i w ze względu na rozkład statystyczny pustek, występuje również w przypadku małych chropowatości, czyli pustek rzędu kilkunastu czy kilkudziesięciu μm , których pomiar podlegałby pod warunek 3 czyli gdy $\lambda \gg w$. W praktyce pewna część pustek będzie poza tym warunkiem, a jaka to będzie część można oszacować z pomiarów profilometrycznych.

2.3 Pomiary współczynnika odbicia dla próbek rzeczywistych, o powierzchniach po różnych obróbkach technologicznych

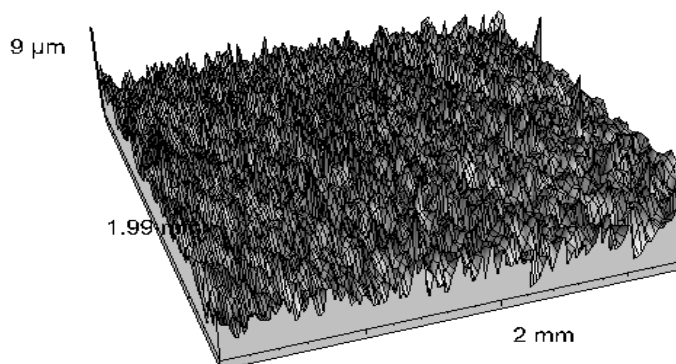
Wyniki pomiarów współczynnika odbicia fali ultradźwiękowej przedstawione poniżej dotyczą trzech wybranych typów powierzchni chropowatych (rys.7). W opisie chropowatości powierzchni podano wartość średniego odchylenia standardowego S_a , oraz drugiego istotnego w tym przypadku parametru - średniej odległości między wierzchołkami chropowatości liczonej na poziomie płaszczyzny średniej S_m . Badaniami objęto następujące rodzaje powierzchni:

- **kulowana** na stali nierdzewnej, powierzchnia bardzo chropowata ($S_a=5,2\mu\text{m}$) silnie umocniona w wyniku obróbki, izotropowa, $S_m=220\mu\text{m}$,
- **frezowana**, na stali węglowej, średnio chropowata ($S_a=2,6\mu\text{m}$), o wyraźnym ukierunkowaniu tekstury, o powtarzających się grzbietach nierówności $S_{m\perp}=95\mu\text{m}$, $S_{m\parallel}=280\mu\text{m}$,
- **piaskowana**, na stali węglowej, o małej chropowatości ($S_a=0,65\mu\text{m}$), izotropowa, $S_m=70\mu\text{m}$.



kulowanie $S_a=5,2\mu\text{m}$, $S_m=220\mu\text{m}$

frezowanie $S_a=2,6\mu\text{m}$, $S_{m\perp}=95\mu\text{m}$, $S_{m\parallel}=280\mu\text{m}$



piaskowanie $S_a=0,65\mu\text{m}$,
 $S_m=70\mu\text{m}$

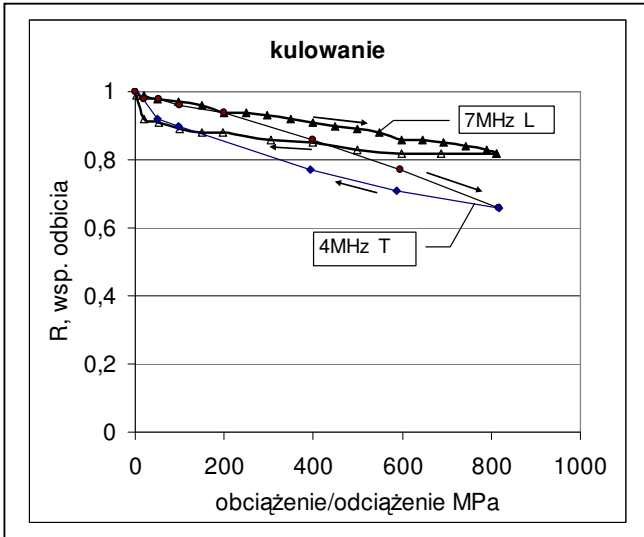
Rys. 7 Widok powierzchni badanych próbek

Badania współczynnika odbicia fali ultradźwiękowej prowadzone były na przedstawionych wyżej próbkach chropowatych obciążanych przez sztywną, bardzo gładką powierzchnię stempla na stanowisku opisanym w rozdziale 2.1. Pomiary dla fali poprzecznej i podłużnej prowadzone były na tych samych próbkach, ale w innych miejscach. Obciążenie nominalne powierzchni styku (liczone dla sumarycznej powierzchni stempli) zadawane było w granicach od 0 do 800 MPa.

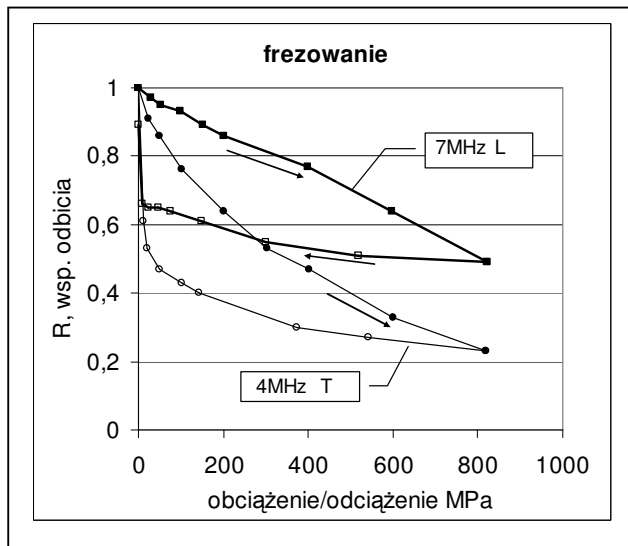
Poniżej, (rys. 8-10) przedstawiono wykresy zależności współczynników odbicia dla fal podłużnych L oraz poprzecznych T w funkcji nominalnego obciążenia styku dla trzech typów badanych chropowatości.

Z przeprowadzonych badań wynika szereg obserwacji i wniosków:

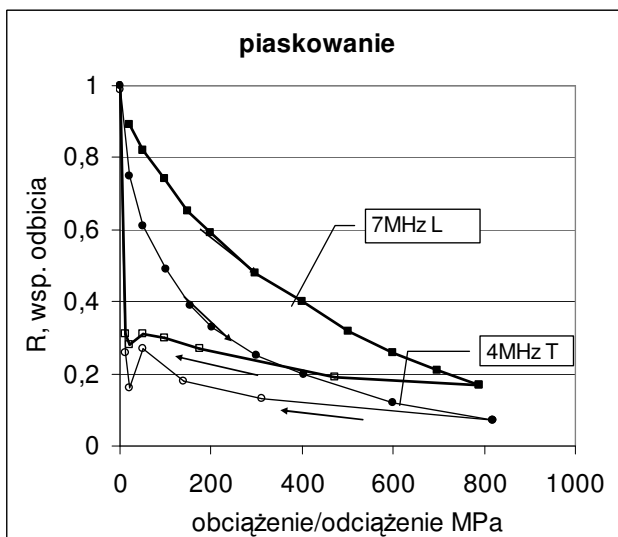
- Współczynniki odbicia maleją monotonicznie w funkcji wzrastającego obciążenia powierzchni styku. Jest to oczywiście związane ze wzrastającą w miarę wzrostu obciążenia rzeczywistą powierzchnią styku.
- Wartości obu współczynników odbicia (L i T) spadają (w funkcji obciążenia) najszybciej dla powierzchni najmniej chropowatej (piaskowanej) a najwolniej dla powierzchni o najwyższej chropowatości (kulowanej), przy czym zawsze wartość współczynnika odbicia fali poprzecznej jest mniejsza od współczynnika odbicia fali podłużnej, dla tego samego obciążenia.
- Spadki (szybkość zmiany) współczynników odbicia fal poprzecznych są (dla wszystkich rodzajów powierzchni) znacząco większe od spadków współczynników odbicia fal podłużnych. Oznacza to, że przy tym samym obciążeniu powierzchni styku i tej samej długości fali fale poprzeczne lepiej przenikają przez powierzchnię styku niż fale podłużne.
- Przy dużych obciążeniach (przewyższających granice plastyczności materiału próbek) występuje wyraźna histereza (różnica przebiegu zależności współczynnika odbicia w czasie obciążania i odciążania) przy odciążaniu. Zgodnie z oczekiwaniami histereza jest najmniejsza dla próbki kulowanej ze stali nierdzewnej, która została silnie umocniona podczas tego rodzaju obróbki powierzchniowej.
- W czasie odciążania wartość współczynnika odbicia fali podłużnej zmienia się jedynie o kilkanaście procent i rośnie dopiero przy całkowitym odciążeniu. Wyraźniejsze zmiany w czasie odciążania, choć nadal znikome, obserwowane są dla fali poprzecznej. Oznacza to, że rzeczywisty kontakt powierzchni zmienia się znacząco praktycznie dopiero po usunięciu dociążenia. Problem możliwości ewentualnego wykorzystania tego zjawiska został przedstawiony w pracy [6].



Rys 8. Wyniki pomiarów współczynnika odbicia R w funkcji obciążenia i odciążania dla fali poprzecznej T i podłużnej L dla powierzchni kulowanej ($S_a=5,2\mu\text{m}$)



Rys 9. Wyniki pomiarów współczynnika odbicia R w funkcji obciążenia i odciążania dla fali poprzecznej T i podłużnej L dla powierzchni frezowanej ($S_a=2,6\mu\text{m}$)

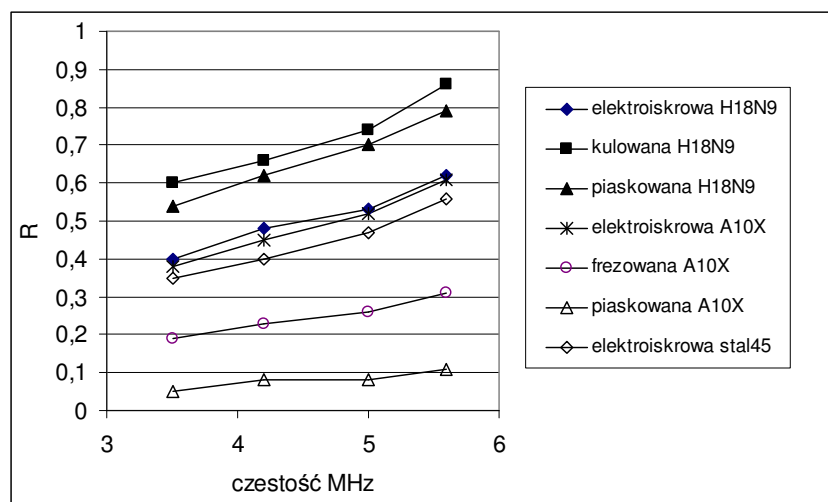


Rys 10. Wyniki pomiarów współczynnika odbicia R w funkcji obciążenia i odciążania powierzchni styku dla fali poprzecznej T i podłużnej L dla powierzchni piaskowanej ($S_a=0,65\mu\text{m}$)

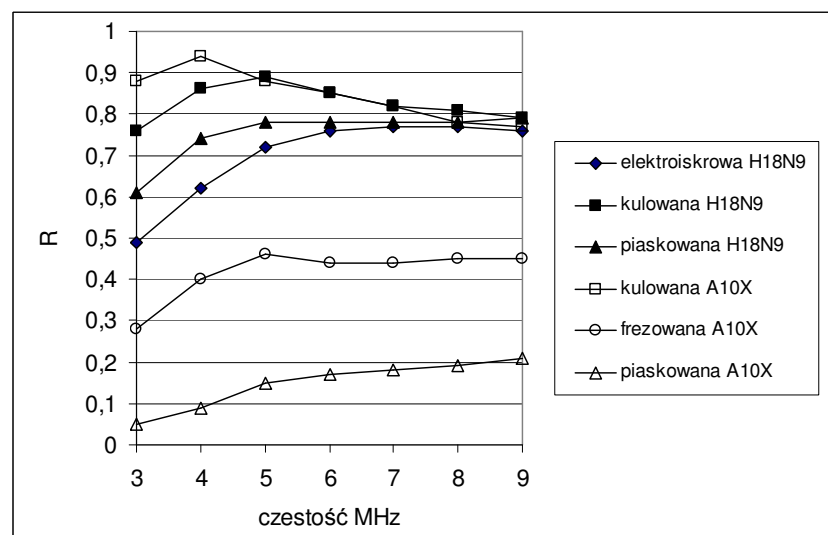
2.4 Analiza widmowa współczynnika odbicia

Na podstawie porównania amplitud widm impulsów odbitych od obciążonych oraz nieobciążonych powierzchni, program komputerowy realizujący pomiar i zapis danych pozwala też obliczyć częstotliwościowe charakterystyki współczynników odbicia. Wyliczane są widma współczynników odbicia dla poszczególnych stempli oraz ich wartość średnia odpowiadająca całej powierzchni styku obciążonej do zadanego nacisku.

Wartości współczynników odbicia obliczane z wykorzystaniem analizy widmowej impulsów są dobrze zdefiniowane dla określonych częstotliwości fali i nie są obciążone (jak ma to miejsce w przypadku pomiarów bazujących na zwykłym porównywaniu amplitudy impulsów) błędami wynikającymi ze zmian kształtu impulsu ultradźwiękowego zachodzącymi w trakcie obciążania styku.



Rys 11. Zależność współczynnika odbicia R od częstotliwości dla fali poprzecznej T przy obciążeniu 800MPa dla próbek wykonanych z różnych stali, o różnych stanach powierzchni



Rys 12. Zależność współczynnika odbicia R od częstotliwości dla fali podłużnej L przy obciążeniu 800MPa dla próbek wykonanych z różnych stali, o różnych stanach powierzchni

Drugim korzystnym efektem wykorzystania analizy widmowej jest możliwość wyznaczenia częstotliwościowej charakterystyki współczynnika odbicia w pewnym zakresie częstotliwości fali odpowiadającym w przybliżeniu szerokości pasma częstotliwości stosowanej głowicy ultradźwiękowej. Przykład wyniku takiej charakterystyki przedstawiono na rys. 11 i 12.

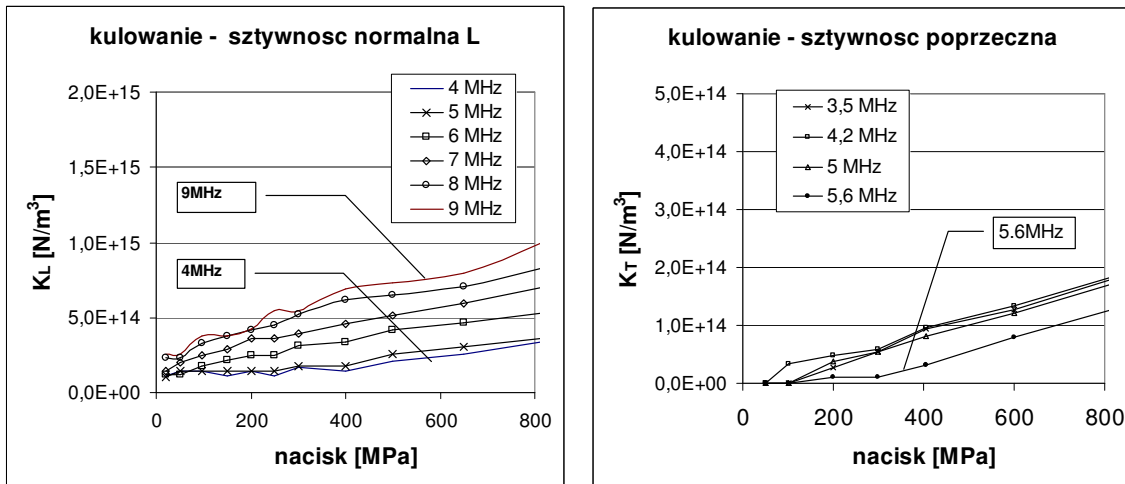
Efekt, jaki daje się zauważyć na wykresach, jest dość zaskakujący. Charakter przebiegu charakterystyki częstotliwościowej dla fali poprzecznej (rys. 11) zmienia się konsekwentnie i monotonicznie – w miarę wzrostu częstotliwości rośnie współczynnik odbicia. Jest on również wrażliwy na zmianę rodzaju powierzchni na różnych podłożach (stal nierdzewna, stal A10X i stal 45). Przeprowadzone pomiary dla tych samych próbek z wykorzystaniem fali podłużnej przedstawione są na kolejnym rysunku (rys.12). W początkowej fazie częstotliwości charakterystyka jest podobna (monotonicznie rośnie), jednak dalej, w miarę wzrostu częstotliwości, różnice między charakterystykami dla różnych powierzchni nikną i próbki o generalnie wyższym początkowym współczynniku odbicia oraz umocnione w trakcie obróbki powierzchniowej, przestają być rozróżniane dla częstotliwości powyżej 8 MHz. Poza tym obszarem pozostają jedynie powierzchnie bardzo drobno piaskowane i frezowane, które przy dużych naciskach podlegają znacznie większym odkształceniom plastycznym niż powierzchnie wcześniej umocnione. Jest to kolejny powód dla którego użycie analizy Fouriera jest pożyteczne i wręcz niezbędne.

3. SZTYWNOŚĆ KONTAKTOWA

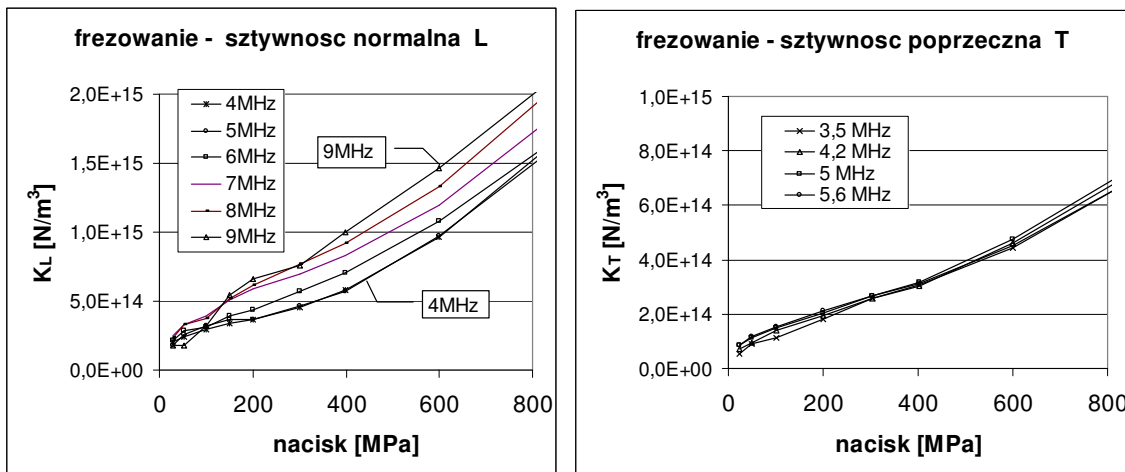
Szywność kontaktowa została wyznaczona ze wzoru (4) ze zmierzonych widm współczynnika odbicia dla kilku różnych częstotliwości. Gdyby model sztywnościowy w sposób całkowicie ścisły opisywał odbicie fal ultradźwiękowych od powierzchni styku wartości sztywności kontaktowych obliczane dla różnych częstotliwości musiałyby być jednakowe. Kolejne rysunki (rys. 13-15) pokazują, że kryterium to faktycznie jest spełnione dla powierzchni piaskowanej oraz częściowo (dla fali typu T) dla powierzchni frezowanej. Dla powierzchni kulowanej obserwuje się znaczącą zależność sztywności kontaktowej od częstotliwości (szczególnie dla fali podłużnej), co oznacza, że model sztywnościowy nie opisuje prawidłowo tego przypadku. Wynikać to może z faktu, że dla próbki kulowanej znajdujemy się blisko granicy reżimu niskoczęstotliwościowego, gdyż średnie odległości między wierzchołkami chropowatości (S_m) są tego samego rzędu co długość fali.

Generalnie sztywność kontaktowa rośnie z obciążeniem i osiąga najwyższe wartości (rzędu $6 \cdot 10^{15} \text{ N/m}^3$) dla najmniej chropowatej powierzchni piaskowanej. Dla najbardziej chropowatej powierzchni kulowanej sztywność kontaktowa jest najmniejsza. Wynika to z faktu, że jest ona chropowata i bardzo silnie umocniona co powoduje, że nie może być przy obciążaniu deformowana i doprowadzana, poprzez rozplaszczanie wierzchołków chropowatości, do poprawy kontaktu. Pośrednim przypadkiem jest próbka frezowana, która pomimo stosunkowo dużej chropowatości wykazuje znaczny wzrost sztywności kontaktowej wskutek obciążenia. Jest to efekt deformacji plastycznej i rozplaszczania wierzchołków chropowatości co pozwala uzyskiwać istotną poprawę kontaktu.

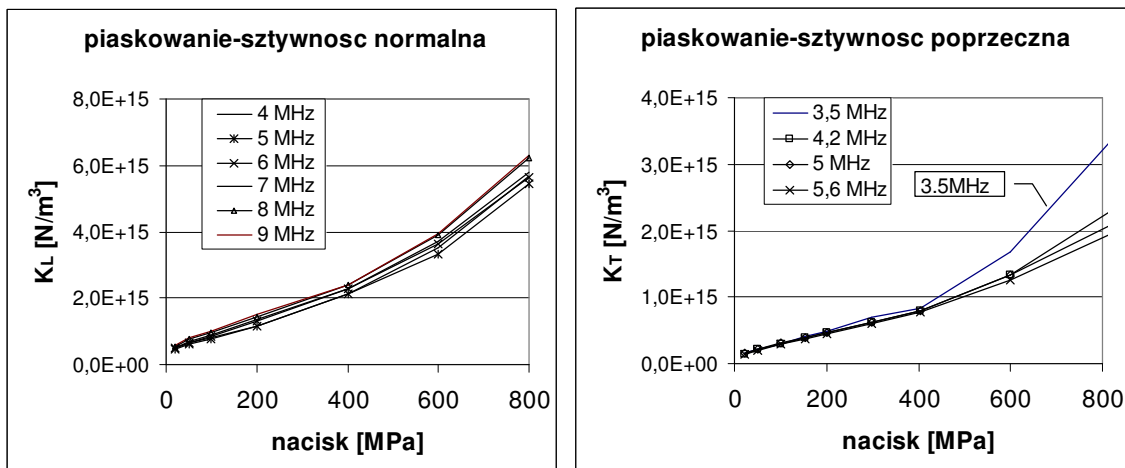
Warto jeszcze zwrócić uwagę na wzajemne relacje sztywności kontaktowych poszczególnych próbek. Są one odwrotnie proporcjonalne do chropowatości – im większa chropowatość tym mniejsza sztywność. Różnice są duże, sztywność zarówno normalna (oceniana z odbicia fali L) jak i poprzeczna (oceniana z odbicia fali T) powierzchni piaskowanej obciążonej do 800MPa jest 3 razy większa od powierzchni frezowanej i ponad 10 razy większa od powierzchni kulowanej.



Rys 13. Sztywność kontaktowa normalna K_L i poprzeczna K_T w funkcji obciążenia dla różnych częstotliwości fali odbitej od powierzchni kulowanej ($S_a=5,2\mu\text{m}$)



Rys 14. Sztywność kontaktowa normalna K_L i poprzeczna K_T w funkcji obciążenia dla różnych częstotliwości fali odbitej od powierzchni frezowanej ($S_a=2,6\mu\text{m}$)



Rys 15. Sztywność kontaktowa normalna K_L i poprzeczna K_T w funkcji obciążenia dla różnych częstotliwości fali odbitej od powierzchni piaskowanej ($S_a=0,65\mu\text{m}$)

4. WNIOSKI

Badanie współczynnika odbicia fali ultradźwiękowej od styku powierzchni chropowatej dostarcza szeregu informacji o kontakcie tych powierzchni nie dających się uzyskać innymi metodami. Wyniki są powtarzalne i dokładne, jednak ich pełna interpretacja jest stosunkowo trudna.

Z przeprowadzonych badań wynika szereg uwag generalnych.

- Potwierdzają one teoretyczny model, według którego amplituda fali ultradźwiękowej odbijającej się od powierzchni chropowatej w najczęściej spotykanych zakresach chropowatości zależna jest nie od powierzchni styku a od sztywności kontaktowej obszaru kontaktu.
- Ponieważ sztywność kontaktowa poprzeczna jest mniejsza od normalnej, współczynnik odbicia fali poprzecznej jest relatywnie większa (w odniesieniu do sztywności stykających się materiałów) od sztywności kontaktowej normalnej.
- Przy dużych obciążeniach styku znacząco przewyższających granice plastyczności występuje wyraźna histereza (różnica przebiegu zależności współczynnika odbicia w czasie obciążania i odciążania). Jest to wynik uplastycznienia materiału. Histereza jest znacznie mniejsza dla próbki kulowanej ze stali nierdzewnej, która została silnie umocniona podczas obróbki powierzchniowej (rys.11), i trudno poddawała się dalszemu zgniataniu plastycznemu niż w przypadku próbki frezowanej (rys.12) ze stali 45, dla której uplastycznienie warstwy styku mogło być dużo silniejsze.

Literatura

- [1] Baik, J., Thompson, R.B., "Ultrasonic scattering from imperfect interfaces: A Quasi Static Model", J.Nondestruct.Eval., 4,No ¾,pp.177-196, (1984)
- [2] Tattersall, H.G., The ultrasonic pulse echo technique as applied to adhesion testing, J.Appl.Phys., D6, pp.819-832, (1973)
- [3] Polijaniuk A. New approach to the problem of bearing for rough surfaces under quasi-static load, Wear, Vol 184, pp. 55-60, (1995)
- [4] Demkin N.B., A device for measuring the deformation at the point of contact of two surfaces under compression, Byull. Izobretenii, Vol.19, pp.15-19, (1959)
- [5] Dwyer Joyce R.S., Drinkwater D.W., Quinn A.M., The use of ultrasound in the Investigation of Rough surface interfaces, J.of Trib., vol. 123, 2001.
- [6] Szelażek J., Mackiewicz S., Starzyński G., Zastosowania pomiarów współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych od granicy metal-metal w technice, XVI Seminarium NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW, Zakopane, 9 - 12 marca 2010