

Wykorzystanie współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych do oceny kontaktu powierzchni chropowatych

WPROWADZENIE

Rzeczywiste powierzchnie inżynierskie nie są idealnie gładkie, a ich chropowatość zależy od rodzaju obróbki wykończeniowej. Przy wzajemnym kontakcie takich powierzchni ich styk następuje na wierzchołkach nierówności, a rzeczywista powierzchnia kontaktu stykających się elementów jest znacząco mniejsza od powierzchni nominalnej, natomiast naprężenia występujące w kontaktujących się wierzchołkach są znacznie większe od średnich naprężeń nominalnych. Dla zrozumienia wielu procesów zachodzących na styku dwóch elementów (tarcia, zużycia) jest niezbędne wyznaczenie lub obliczenie dwóch wielkości opisujących styk powierzchni: rzeczywistej powierzchni styku *RPS* (*real contact area*) oraz sztywności kontaktowej (*contact stiffness*). Od lat jedną z technik stosowanych w badaniach kontaktu jest badanie odbicia fal ultradźwiękowych od kontaktujących się pod obciążeniem powierzchni.

Zjawisko odbicia fal ultradźwiękowych od granicy ośrodków jest wykorzystywane w nieniszczących badaniach materiałów. W wielu przypadkach, jak na przykład przy wykrywaniu wad materiałów ultradźwiękową metodą echa, dokładna znajomość wartości współczynnika odbicia od granicy między materiałem rodzimym i wadą nie jest potrzebna. Istnieją jednak zastosowania badań ultradźwiękowych, w których znajomość wartości współczynnika odbicia od granicy ośrodków odgrywa kluczową rolę. Do takich zastosowań można zaliczyć badania jakości połączeń klejowych [1÷3], różnego typu połączeń skurczowych [4÷9] czy badania kontaktu powierzchni elementów stalowych [10]. W każdym z opisanych w literaturze przypadków bardzo użyteczna jest możliwość teoretycznego obliczania wartości współczynnika odbicia od granicy materiałów w zależności od jej charakterystyk geometrycznych i właściwości mechanicznych, a także w funkcji obciążenia. Wartość współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych w wielu przypadkach można wyznaczyć doświadczalnie. Modele odbicia fal akustycznych pozwalają natomiast przewidywać i analizować związki, jakie zachodzą między mierzoną wartością współczynnika odbicia a cechami stykających się materiałów, charakterystyką ich powierzchni czy jakością połączeń.

Idea wykorzystania pomiaru współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych do badań kontaktu dwóch ciał stałych nie jest złożona: gdy fala ultradźwiękowa pada na granicę kontaktujących się chropowatych powierzchni, część jej energii przechodzi do drugiego ośrodka, a część odbija się. Odbicie może być spowodowane zarówno różnicą impedancji akustycznych stykających się materiałów, jak również obecnością pustych przestrzeni na powierzchni granicznej (rys. 1). Można powiedzieć, że dla elementów wykonanych z tego samego materiału współczynnik odbicia będzie tym większy, im mniejsza jest rzeczywista powierzchnia styku (RPS).

Zjawisko odbicia fal silnie zależy od stosunku długości fali λ do szerokości pustek w mierzonych w kierunku prostopadłym do kierunku propagacji fali. W ogólnym przypadku występują trzy możliwości.

Dla $\lambda \ll w$ fala ultradźwiękowa odbija się od pustek podobnie jak od dużych wad makroskopowych, tj. zgodnie z prawami optyki geometrycznej. W tym przypadku trudno jest mówić o współczynniku odbicia od powierzchni styku ponieważ zjawisko to ma raczej charakter sumy odbić fali od indywidualnych nieciągłości. Ponieważ typowa szerokość pustek dla chropowatych powierzchni wynosi od 5 do 100 μm , a długości fal ultradźwiękowych stosowanych w badaniach materiałów są rzędu 1 mm, nie jest to przypadek występujący w praktyce.

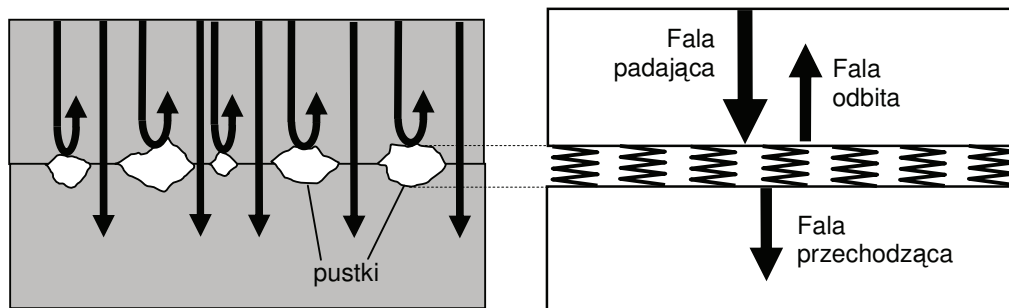
Dla $\lambda \approx w$, co w praktyce zachodzi dla częstotliwości fal ultradźwiękowych rzędu kilkunastu do kilkudziesięciu MHz, występuje zjawisko rozpraszania fal na pojedynczych pustkach, przy którym sumaryczna amplituda fali odbitej zależy od wielkości, kształtu, orientacji oraz wzajemnego usytuowania poszczególnych pustek. Jest to zakres częstotliwości bardzo trudny do precyzyjnego teoretycznego opisu i ilościowej interpretacji w kategoriach parametrów powierzchni styku. Można jednak wprowadzić w tym obszarze przybliżony model odbicia opierający się na założeniu, że każda pustka na powierzchni styku stanowi cząstkowe źródło fali odbitej o początkowej amplitudzie ciśnienia akustycznego równej amplitudzie fali padającej. W dalszej odległości od powierzchni styku amplitudy fal cząstkowych pochodzących od poszczególnych pustek sumują się, dając w wyniku falę odbitą. Ponieważ sumowanie fal cząstkowych o amplitudach równych amplitudzie fali padającej odbywa się wyłącznie po powierzchni pustek (powierzchnie styków nie dają żadnego wkładu) wynikowa amplituda fali odbitej jest w przybliżeniu równa amplitudzie fali padającej pomnożonej przez iloraz powierzchni pustek do nominalnej powierzchni styku. Oznacza to, że współczynnik odbicia fali ultradźwiękowej od powierzchni styku dwóch jednakowych materiałów można opisać następującymi przybliżonymi zależnościami:

$$R = \frac{A_{\text{pust}}}{A_{\text{nom}}} = \frac{(A_{\text{pust}} + A_{\text{styk}}) - A_{\text{styk}}}{A_{\text{nom}}} = 1 - RPS \quad (1)$$

gdzie: R – współczynnik odbicia fali ultradźwiękowej od powierzchni styku jednakowych materiałów, A_{pust} – sumaryczna powierzchnia pustek rzutowana na płaszczyznę styku, A_{styk} – sumaryczna powierzchnia styków rzutowana na płaszczyznę styku, $A_{\text{nom}} = A_{\text{pust}} + A_{\text{styk}}$ – nominalna powierzchnia styku, $RPS = A_{\text{styk}}/A_{\text{nom}}$ – rzeczywista powierzchnia styku zdefiniowana jako iloraz powierzchni styków do całkowitej powierzchni nominalnej. Doświadczalna weryfikacja przedstawionego modelu jest jednym z celów niniejszej pracy.

Dla $\lambda \gg w$ sygnał odbity od granicy przestaje zależeć od kształtu i wielkości pojedynczych pustek, a staje się funkcją uśrednionych własności sprężystych strefy kontaktu. W takim przypadku, nazywanym obszarem niskoczęstotliwościowym (*low frequency regime*), do opisu oddziaływania fali z powierzchnią graniczną stosuje się tzw. model sztywnościowy (*spring model*) [7].

Strefa kontaktu między chropowatymi powierzchniami stykających się elementów jest modelowana za pomocą warstwy idealnych sprężyn, które charakteryzują się taką samą sztywnością na jednostkę powierzchni jak rzeczywista warstwa kontaktowa (rys. 1).



Rys. 1. Schemat przejścia i odbicia fali ultradźwiękowej od powierzchni styku dwóch ciał stałych oraz idea modelu sztywności kontaktowej – zastąpienie rzeczywistej warstwy kontaktowej idealnymi sprężynkami o takiej samej sztywności

Fig. 1. Schema of ultrasonic waves transition and reflection on the contact surface of two solids and the idea of the contact spring model replacing real contact layer with ideal springs of the same stiffness

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 obecnością warstwy kontaktowej i 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 modelowanego za pomocą warstwy sprężynek o odpowiednio dobranej sztywności.

W ramach tego modelu współczynnik odbicia fali ultradźwiękowej bezpośrednio zależy od sztywności kontaktowej (sztywności sprężynek) stykających się powierzchni. Model pozwala na znalezienie tych zależności zarówno dla fali podłużnej (L), jak i fali poprzecznej (T) padającej na kontaktujące się powierzchnie.

Przemieszczenia cząstek ośrodka w fali podłużnej są równoległe do kierunku propagacji fali. Fala ta, padając normalnie na granicę przeciwróbki i próbki, jest czuła na sztywność „normalną” charakteryzującą własności sprężyste styku w kierunku prostopadłym do granicy (tak jak ustawione są sprężynki modelu na rysunku 1). Natomiast fala poprzeczna, w której cząstki ośrodka wykonują drgania w kierunku prostopadłym do kierunku propagacji fali, jest czuła na sztywność „styczną” charakteryzującą własności sprężyste styku w kierunku równoległym do granicy.

Współczynnik odbicia R_{12} od styku dwóch różnych materiałów o impedancjach akustycznych z_1 i z_2 można w ramach modelu sztywnościowego opisać wzorem [8]:

$$R_{12} = \frac{z_1 - z_2 + i\omega(z_1 z_2 / K)}{z_1 + z_2 + i\omega(z_1 z_2 / K)} \quad (2)$$

Ze wzoru (2) wynika, że wartość współczynnika odbicia jest funkcją sztywności kontaktowej styku, impedancji akustycznych przylegających materiałów oraz częstotliwości fali.

Związek między współczynnikiem odbicia fal od granicy dwóch jednakowych materiałów a sztywnością kontaktową K jest opisany zależnością (3).

$$R = \frac{1}{\sqrt{1 + (2K / \omega z)^2}} \quad (3)$$

gdzie $\omega = 2\pi f$ – częstość kołowa fali padającej o częstotliwości f , z – impedancja akustyczna stykających się materiałów ($z = \rho c$, ρ – gęstość materiału, c – prędkość fali w materiale), R – współczynnik odbicia fali ultradźwiękowej od powierzchni kontaktu.

Ze wzoru (3) można wyliczyć zależność między sztywnością kontaktową normalną K_N i styczną K_T oraz współczynnikami odbicia dla obu rodzajów fal.

$$K_N = \frac{\rho c_L \omega}{2} \sqrt{\frac{1}{R_L^2} - 1} \quad K_T = \frac{\rho c_T \omega}{2} \sqrt{\frac{1}{R_T^2} - 1} \quad (4)$$

gdzie c_L oraz c_T – prędkości odpowiednio fali podłużnej (L) i poprzecznej (T) w materiale, a R_L oraz R_T to współczynniki odbicia fali podłużnej i poprzecznej od powierzchni kontaktu.

Nie ma niestety jednoznacznej zależności między sztywnością kontaktową a rzeczywistą powierzchnią styku RPS. Sztywność kontaktowa zależy bowiem nie tylko od sumarycznej powierzchni styku, ale również od liczby, wielkości oraz kształtu wierzchołków nierówności stanowiących punkty styku.

Sztywność kontaktowa normalna K_N występująca we wzorze (4) może być z pewnymi zastrzeżeniami utożsamiana ze sztywnością kontaktową rozpatrywaną w badaniach mechanicznych. Wielkość ta jest definiowana jako szybkość zmian średniego przyłożonego nacisku P_{nom} w funkcji zbliżenia linii średnich powierzchni chropowatych u :

$$K = -\frac{dP_{nom}}{du} \quad (5)$$

Należy zauważyć, że sztywność mechaniczna odnosi się do procesów kwazistatycznych (zmiany wartości nacisku zachodzą w czasie rzędu sekund), natomiast sztywność kontaktowa rozpatrywana w badaniach ultradźwiękowych opisuje zjawiska sprężyste zachodzące w czasie odpowiadającym okresowi fali ultradźwiękowej, który dla stosowanych częstotliwości jest rzędu 10^{-7} sekundy. Ponadto bezwzględne wartości obciążeń styku występujące podczas pomiarów mechanicznych są o kilka rzędów wielkości większe od obciążeń generowanych przez propagujące się fale ultradźwiękowe.

Pomiar sztywności kontaktowej metodami mechanicznymi jest trudny, zwłaszcza dla względnie gładkich powierzchni. Wynika to z tego, że wielkość u jest często mniejsza od $1 \mu\text{m}$ i pomiar jej zmian (rzędu setnych części μm) natrafia na poważne trudności eksperymentalne. Możliwość wykorzystania do tego celu metody ultradźwiękowej wydaje się interesującą alternatywną metodą określania tej wielkości.

Weryfikację modelu sztywnościowego przedstawili m.in. Dwyer-Joyce i Drinkwater w pracy [6], podając zależność współczynnika odbicia R i sztywności kontaktowej K od częstotliwości fali f . Wyniki pokazują, że dla próbek stalowych do obciążenia 400 MPa krzywe sztywności kontaktowej są prawie niezależne od częstotliwości stosowanych fal. Dla dużych obciążeń zależność ta przestaje być stabilna, co jednak w dużej mierze wynika z matematycznej postaci zależności między wartościami sztywności kontaktowej i współczynnika odbicia (4), z której wynika, że gdy współczynnik odbicia zbliża się do zera jego niewielkie zmiany (na skutek np. z błędów pomiarowych) powodują duże różnice w obliczanych wartościach sztywności. Oznacza to, że stosowanie

metody ultradźwiękowej do wyznaczania sztywności kontaktowej może być ograniczone do zakresu obciążeń, przy których współczynnik odbicia od powierzchni styku nie spada poniżej pewnej określonej wartości (np. $R > 0,1$).

W pracy przedstawiono układ pomiarowy pozwalający wyznaczać współczynnik odbicia fal podłużnych i poprzecznych od powierzchni styku ciał stałych poddawanych kontrolowanym obciążeniom. Przedstawiono wyniki pomiarów współczynników odbicia dla dwóch serii próbek stalowych poddanych różnym rodzajom obróbki powierzchni. Uzyskane wyniki pomiarów przeanalizowano w kontekście opisanych modeli odbicia fali ultradźwiękowej od powierzchni kontaktu. Szczególną uwagę zwrócono na problemy związane z interpretacją wyników badań w kategoriach sztywności kontaktowej oraz rzeczywistej powierzchni styku.

STANOWISKO DO JEDNOCZESNEGO POMIARU WSPÓŁCZYNNIKA ODBICIA I ZBLIŻENIA

Badania przeprowadzono na stanowisku pomiarowym zbudowanym w Instytucie Podstawowych Problemów Techniki [10]. Stanowisko umożliwia jednoczesny pomiar zbliżenia a kontaktujących się powierzchni oraz współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych R w funkcji zastosowanych nacisków nominalnych P^{nom} (rys. 2).

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

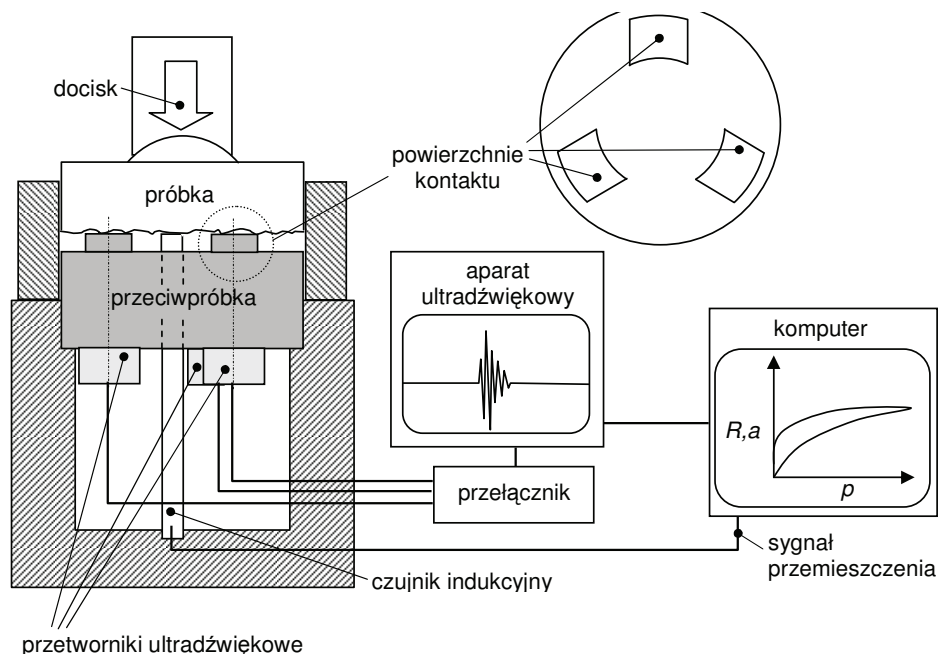
Styk jest realizowany pomiędzy chropowatą powierzchnią próbki w kształcie walca o wymiarach $\phi 50 \times 30$ mm i „idealnie gładką” powierzchnią trzech nóg/stempli przeciwpróbki wykonanej ze stali diamentowej o twardości 68 HRC. Z drugiej strony przeciwpróbki, naprzeciwko stempli, przyklejono trzy identyczne przetworniki ultradźwiękowe.

W układzie można zamontować dwie różne przeciwpróbki: jedna jest przeznaczona do pomiarów współczynnika odbicia fal

podłużnych (L), druga dla fal poprzecznych (T). W przeciwpróbce do pomiarów za pomocą fal podłużnych zastosowano trzy jednakowe przetworniki o częstotliwości podstawowej ok. 7 MHz, natomiast w przeciwpróbce do pomiarów z wykorzystaniem fal poprzecznych przetworniki o częstotliwości ok. 4 MHz. Częstotliwości przetworników zostały dobrane tak, aby długości wytwarzanych przez nie fal były w przybliżeniu jednakowe (np. w stali $\lambda = 0,8$ mm). Zastosowanie w każdej z przeciwpróbek trzech jednakowych przetworników pozwoliło zwiększyć dokładność pomiarów przez uśrednienie wartości współczynników odbicia od powierzchni czołowych trzech stempli o powierzchni kontaktu ok. 65 mm² każdy. Całkowita powierzchnia kontaktu mierzonego podczas eksperymentu wynosiła ok. 195 mm².

Pomiar amplitud fali odbitej jest realizowany za pomocą jednokanałowego defektoskopu cyfrowego Panametrics Epoch 4 przez sukcesywne przełączanie wejścia/wyjścia defektoskopu do kolejnych przetworników. Przed obciążeniem próbki jest wykonywany pomiar amplitudy sygnału początkowego R_{mi} (referencyjnego), dla którego współczynnik odbicia jest z definicji równy 1. Podczas zwiększania obciążenia próbki amplituda sygnału odbitego maleje, gdyż coraz większa część energii fali ultradźwiękowej przechodzi przez kontaktujące się fragmenty powierzchni. Współczynnik odbicia R , liczony jako iloraz bieżącej amplitudy sygnału odbitego do amplitudy sygnału referencyjnego, maleje monotonicznie w funkcji wzrastającego nacisku. W przypadku bardzo gładkich, polerowanych powierzchni może on osiągać wartości bliskie 0. W przypadku typowych powierzchni frezowanych, piaskowanych lub szlifowanych osiągnięcie idealnego kontaktu nie jest możliwe nawet przy obciążeniach wielokrotnie przewyższających granicę plastyczności materiału. W takich przypadkach współczynnik odbicia spada przy maksymalnych naprężeniach do pewnej skończonej wartości zależnej od geometrii powierzchni [11]. Po osiągnięciu zadanego maksymalnego obciążenia następuje odciążenie próbki i pomiar wszystkich wielkości w funkcji zmniejszającego się nacisku.

Oprócz pomiaru amplitudy impulsu układ umożliwia rejestrację pełnego przebiegu czasowego odbitego sygnału ultradźwiękowego oraz analizę wyników badań w dziedzinie częstotliwości. Zastosowanie analizy widmowej odbitych impulsów ultradźwiękowych pozwala na znacznie bardziej precyzyjny pomiar współczynnika odbicia fal o określonej częstotliwości niż pomiar oparty na maksymalnej



Rys. 2. Schemat stanowiska do jednoczesnego pomiaru odkształceń kontaktowych i współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych
Fig. 2. Schema of the simultaneous measurement of strain and ultrasonic wave reflection coefficient

amplitudzie rejestrowanych impulsów. Wynika to z tego, że impulsy ultradźwiękowe zawierają w sobie składowe harmoniczne z pewnego pasma częstotliwości, a ich amplituda jest wynikiem interferencji tych składowych. W rezultacie współczynnik odbicia wyznaczany z pomiarów maksymalnej amplitudy impulsów jest wartością uśrednioną w pewnym przedziale częstotliwości, a nie wartością odnoszącą się do ściśle zdefiniowanej częstotliwości.

Drugą istotną korzyścią wynikającą z zastosowania analizy widmowej impulsów jest możliwość wyznaczania częstotliwościowej charakterystyki współczynnika odbicia w zakresie częstotliwości obejmującym pasmo przenoszenia stosowanych głowic.

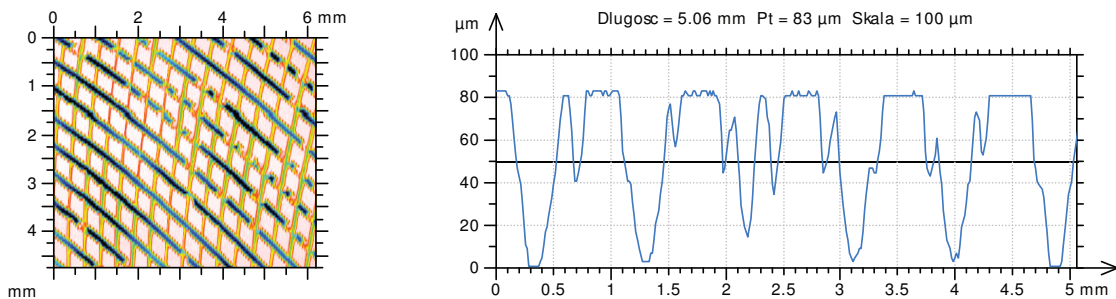
BADANIA PRÓBEK MODELOWYCH

Celem tej części badań było zweryfikowanie modelu odbicia fal ultradźwiękowych stosowanego w zakresie średniofalowym (wzór (1)). W tym celu przygotowano serię próbek modelowych wykonanych ze stali o specjalnie przygotowanej geometrii powierzchni. Powierzchnie czołowe próbek były najpierw toczone lub dłutowane, a następnie szlifowane i polerowane na różną głębokość tak, aby otrzymać profile powierzchni o różnych proporcjach płaskich wierzchołków nierówności do powierzchni zagłębień (rowków). Dla tak przygotowanych próbek względnie łatwo jest oszacować rzeczywistą powierzchnię styku podczas eksperymentu na podstawie wykonanych wcześniej pomiarów profilometrycznych. Ponadto *RPS* tak przygotowanych powierzchni powinien w niewielkim stopniu zależeć od zastosowanego obciążenia styku. W konsekwencji współczynnik odbicia fal ultradźwiękowych od styku takiej powierzchni z idealnie gładką powierzchnią stempla powinien osiągnąć charakterystyczną wartość minimalną już przy stosunkowo niskim obciążeniu.

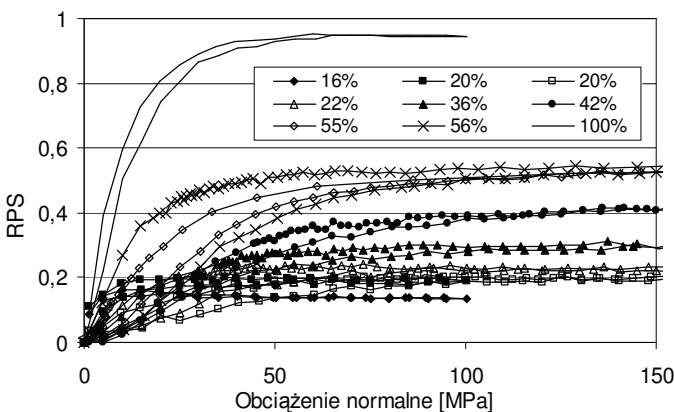
Do oceny struktury geometrycznej powierzchni próbek wykorzystano profilometr skaningowy Hommel Tester T8000 nanoscan. Geometrię powierzchni przykładowej próbki pokazano na rysunku 3.

Rysunek 3 przedstawia mapę warstwicową oraz profil powierzchni próbki dłutowanej, a następnie szlifowanej i polerowanej. Z krzywej nośności, posilując się rozkładem rzędnych, można ocenić rzeczywistą powierzchnię kontaktu dla tego rodzaju próbek. Dla przypadku pokazanego na rysunku 3 przewidywany *RPS* wynosi 37%. Dla pozostałych próbek dłutowanych i polerowanych oszacowane powierzchnie styku wynosiły od 16% do prawie 100%. Szerokości rowków na powierzchni próbek są rzędu kilku dziesiątych milimetra, co oznacza, że pustki utworzone przez nie na powierzchni styków będą miały szerokość w porównywalną do długości stosowanych fal ultradźwiękowych ($\lambda = 0,8$ mm).

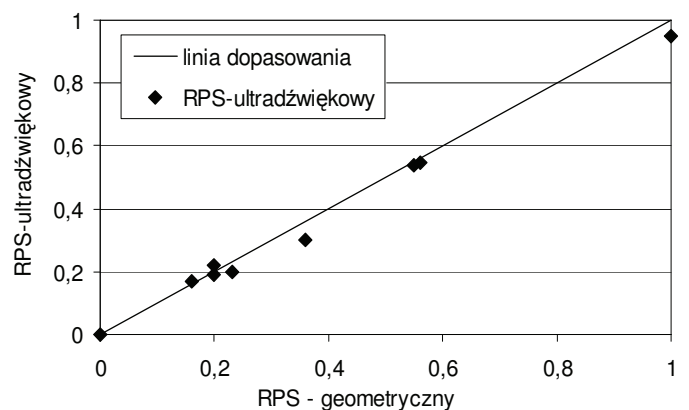
Próbki dłutowane i polerowane poddawano obciążeniom i badaniom ultradźwiękowym. Na podstawie wyznaczonych wartości współczynnika odbicia obliczano rzeczywistą powierzchnię styku *RPS* zgodnie ze wzorem (1). Z wyników pokazanych na rysunku 4 widać, że już przy obciążeniu równym 100 MPa uzyskiwano prawie stałe przebiegi *RPS* w funkcji nacisku, co potwierdza przewidywania wynikające ze sposobu przygotowania powierzchni próbek. Końcowe wartości *RPS* (uzyskane dla naprężeń powyżej 100 MPa) porównano z wartościami wynikającymi z pomiarów stereometrycznych powierzchni wykonanych przed obciążeniem próbek. Wynik tego porównania przedstawiono na rysunku 5 ilustrującym zależność między wartościami *RPS* uzyskanymi z pomiarów ultradźwiękowych i stereometrycznych. Można stwierdzić, że istnieje nadspodziewanie dobra zgodność między wynikami pomiarów ultradźwiękowych i profilometrycznych dla całego zakresu wartości *RPS*. Jest to o tyle interesujące, że do wyznaczenia ultradźwiękowych wartości *RPS* wykorzystano bardzo prosty, przybliżony model



Rys. 3. Mapa warstwicowa i profil powierzchni próbki dłutowanej i polerowanej
Fig. 3. Contour map and profile of the sample surface slotted and polished



Rys. 4. Zależność *RPS* od nacisku nominalnego dla próbek modelowych o różnym stopniu powierzchni potencjalnego kontaktu
Fig. 4. Real Contact Area (RCA) dependence on the nominal pressure of the model samples with varying contact surface



Rys. 5. Zestawienie wyników wartości *RPS* wyznaczonych z pomiarów ultradźwiękowych (kropki) z odpowiadającymi im wartościami obliczonymi geometrycznie dla próbek modelowych
Fig. 5. Summary of the results of the RCA determined with ultrasonic method (dots) and RCA calculated on basis of surface geometry

fizyczny prowadzący do wzoru (1). Należy jednak zauważyć, że wynik ten uzyskano na specjalnie przygotowanych próbkach o bardzo regularnym profilu powierzchni i dość dużej szerokości pustek. Uogólnianie uzyskanej zgodności na przypadek rzeczywistych powierzchni styku może być ryzykowne i wymaga dalszych rozważań i analiz.

Należy zauważyć, że szerokie, regularne i powtarzalne pustki zdarzają się na rzeczywistych powierzchniach styku bardzo rzadko. Zwykle nierówności powierzchni części maszyn i urządzeń po różnych obróbkach technologicznych są rozłożone przypadkowo, a szerokości pustek są znacznie mniejsze niż długości stosowanych fal ultradźwiękowych. Warunek średniofalowy ($\lambda \cong w$) nie jest więc najczęściej spełniony.

BADANIA PRÓBEK PO RÓŻNYCH OBRÓBKACH TECHNOLOGICZNYCH POWIERZCHNI

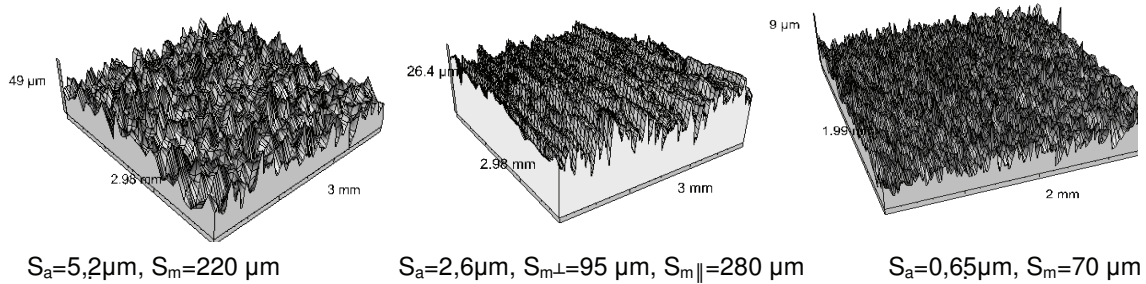
Wyniki pomiarów współczynnika odbicia fali ultradźwiękowej dotyczą trzech wybranych typów powierzchni chropowatych (rys. 6 i 7). W opisie chropowatości powierzchni podano wartość średniego odchylenia standardowego S_a oraz drugiego istotnego

w tym przypadku parametru – średniej odległości między wierzchołkami chropowatości liczonej na poziomie płaszczyzny średniej S_m . Badaniami objęto następujące rodzaje powierzchni:

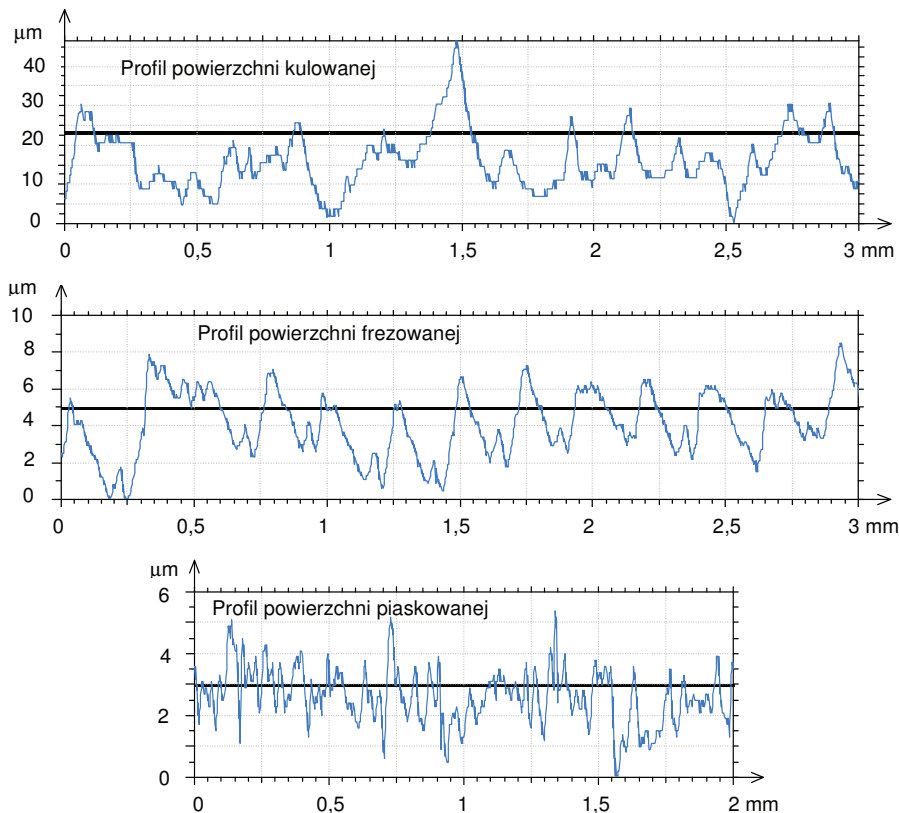
- kulowana na stali węglowej, bardzo chropowata ($S_a = 5,2 \mu\text{m}$) silnie uciążona w wyniku obróbki, izotropowa, $S_m = 220 \mu\text{m}$,
- frezowana, na stali węglowej, średnio chropowata ($S_a = 2,6 \mu\text{m}$), o wyraźnym ukierunkowaniu tekstury i powtarzających się grzbiętach nierówności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

Pomiary współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych były prowadzone na opisanych próbkach obciążanych przez sztywną i bardzo gładką powierzchnię stempla na stanowisku badawczym opisanym w pierwszej części artykułu. Na każdej próbce (w innych miejscach powierzchni) wykonywano pomiar współczynnika odbicia fal podłużnych i poprzecznych. Obciążenie nominalne powierzchni styku (liczone dla sumarycznej powierzchni stempli) było zadawane w granicach od 0 do 800 MPa.

Z punktu widzenia profilometrii geometria badanych powierzchni jest bardzo różna. Powierzchnia piaskowana jest najbardziej izotropowa o rozkładzie wysokości niemal dokładnie

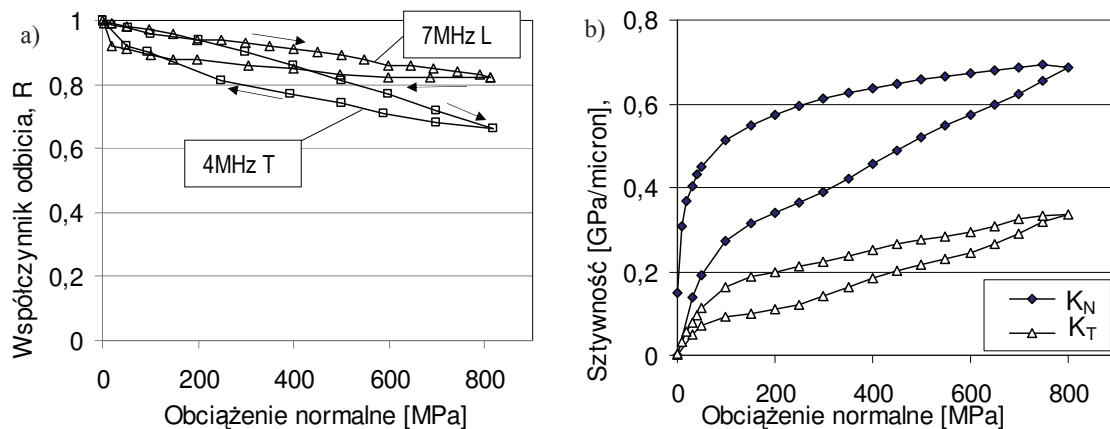


Rys. 6. Widok powierzchni badanych próbek
Fig. 6. View of the surface of the test samples

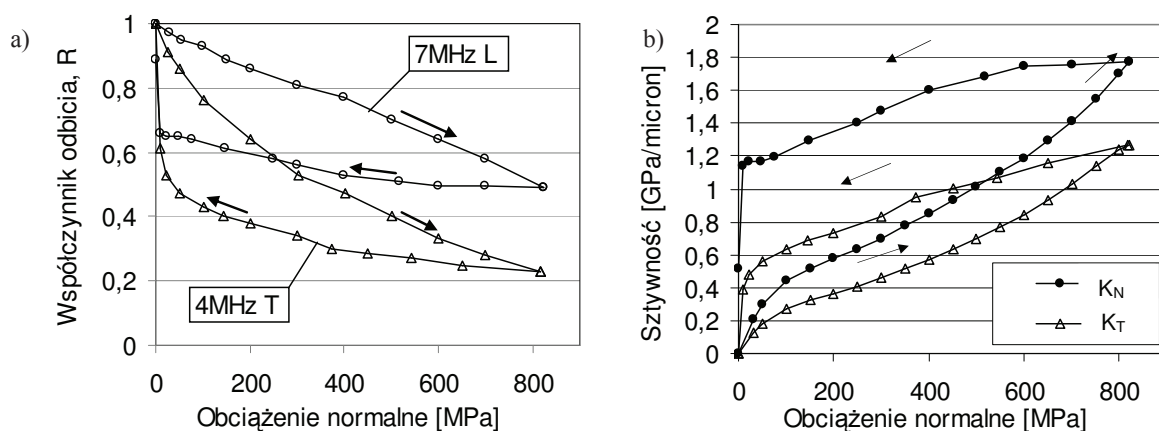


Rys. 7. Przykładowe profile powierzchni badanych próbek
Fig. 7. Examples of the surface profile of test samples

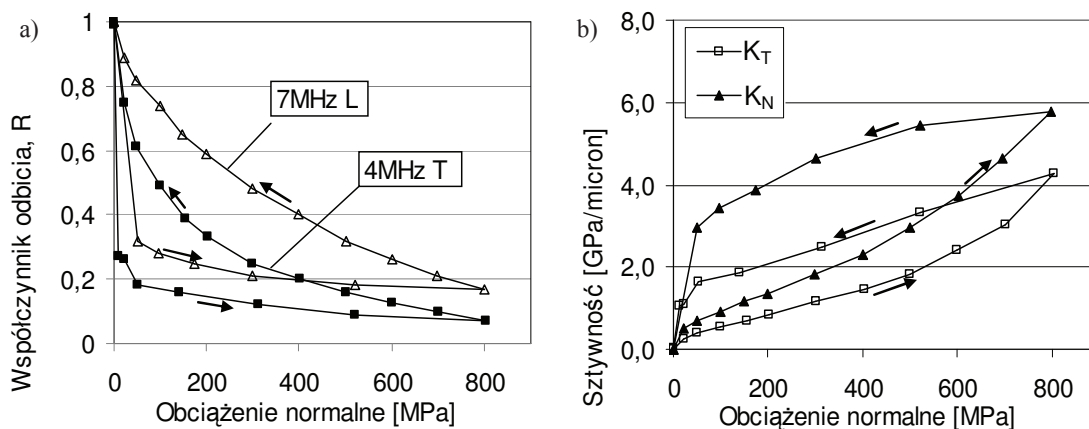
podlegającym rozkładowi Gaussa. Z kolei powierzchnia frezowana jest silnie anizotropowa z charakterystycznymi powtarzającymi się grzbietami. Powierzchnia kulowana jest wprawdzie izotropowa, ale przez specyficzny sposób powstania (nagniatanie niewielkimi twardymi kuleczkami) powstają sferyczne zagłębienia oraz ostro zakończone wierzchołki, zupełnie inne niż w przypadku pozostałych powierzchni.



Rys. 8. Wyniki pomiarów współczynnika odbicia R (a) oraz obliczonej sztywności kontaktowej normalnej K_N i poprzecznej K_T (b) w funkcji obciążenia i odciążania powierzchni styku dla powierzchni kulowanej ($Sa = 5,2 \mu\text{m}$)
 Fig. 8. The results of measurements of ultrasonic wave reflection coefficient R (a) and the calculated normal (K_N) and tangential (K_T) contact stiffness (b) during loading and unloading for the shot peened surface ($Sa = 5.2 \mu\text{m}$)



Rys. 9. Wyniki pomiarów współczynnika odbicia R (a) oraz obliczonej sztywności kontaktowej normalnej K_N i poprzecznej K_T (b) w funkcji obciążenia i odciążania powierzchni styku dla powierzchni frezowanej ($Sa = 2,6 \mu\text{m}$)
 Fig. 9. The results of measurements of ultrasonic wave reflection coefficient R (a) and the calculated normal (K_N) and tangential (K_T) contact stiffness (b) during loading and unloading for the milled contact surface ($Sa = 2.6 \mu\text{m}$)



Rys. 10. Wyniki pomiarów współczynnika odbicia R (a) oraz obliczonej sztywności kontaktowej normalnej K_N i poprzecznej K_T (b) w funkcji obciążenia i odciążania powierzchni styku dla powierzchni piaskowanej ($Sa = 0,65 \mu\text{m}$)
 Fig. 10. The results of measurements of ultrasonic wave reflection coefficient R (a) and the calculated normal (K_N) and tangential (K_T) contact stiffness (b) during loading and unloading for the sandblasted contact surface ($Sa = 0.65 \mu\text{m}$)

wzrastającą rzeczywistą powierzchnią styku *RPS*. Wartości obu współczynników odbicia R_t i R_r zmniejszają swoją wartość w funkcji obciążenia najszybciej dla powierzchni najmniej chropowatej (piaskowanej), a najwolniej dla powierzchni o największej chropowatości (kulowanej). Dla tej samej wartości obciążenia współczynnik odbicia fali poprzecznej jest zawsze mniejszy od współczynnika odbicia fali podłużnej. Spadki (szybkości zmian) współczynników odbicia fal poprzecznych w funkcji obciążenia 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 granicę plastyczności materiału próbek) występuje wyraźna histereza, czyli różnica przebiegu zależności współczynnika odbicia podczas obciążania i odciążania powierzchni styku. Zgodnie z oczekiwaniami histereza jest najmniejsza dla próbki kulowanej ze stali nierdzewnej, która została silnie umocniona podczas obróbki powierzchniowej.

W czasie odciążania wartość współczynnika odbicia fali podłużnej zmienia się jedynie o kilkanaście procent i wyraźnie różnie dopiero przy całkowitym odciążeniu. Nieco większe zmiany współczynnika odbicia w czasie odciążania są obserwowane dla fali poprzecznej. Oznacza to, że podczas odciążania rzeczywista powierzchnia styku zmienia się znacząco dopiero po usunięciu obciążenia. Utrudnia to wykorzystanie pomiarów współczynnika odbicia do monitorowania zmian jakości połączeń wciskowych w czasie eksploatacji maszyn [12].

Rysunek 11 przedstawia porównanie ilorazu sztywności kontaktowej poprzecznej do podłużnej (K_T/K_N) dla badanych próbek. Jak można zauważyć, dla wszystkich rodzajów powierzchni istnieje niewielka tendencja wzrostowa wraz ze zwiększaniem się obciążenia, przy czym jest ona najsłabsza w przypadku powierzchni piaskowanych.

Teoretyczne modele opisujące proces kontaktu i sztywność w czasie stykania się dwóch powierzchni najczęściej opierają się na modelu Greenwooda-Williamsona (GW) [13], który zakłada kulisty kształt wierzchołków, normalny ich rozkład oraz wyłącznie sprężyste odkształcenie nierówności. Przy spełnieniu tych warunków, obliczając sztywności K_T i K_N oraz ich iloraz $K_T/K_N = A(1-\nu)/(2-\nu)$, otrzymuje się dla $A = 2$ (taka wartość wynika z modelu GW) oraz $\nu = 0,3$ $K_T/K_N = 0,8$. W opisywanym modelu iloraz ten jest niezależny od obciążenia. Współczynnik A zmienia się dla różnych modeli kontaktu. Sheriff i Kossa w pracy [14] otrzymali $A = \pi/2$, natomiast Nagy [15] uzyskał $A = 0,71$. Ponieważ w trakcie obciążania opisanych próbek nastąpiło znaczące odkształcenie plastyczne powodujące zmianę początkowego kulistego kształtu nierówności,

temu właśnie można przypisać zwiększenie ilorazu K_T/K_N wraz ze wzrostem obciążenia. W przypadku próbek frezowanych nie jest też spełniony warunek normalnego rozkładu nierówności, co również może być powodem różnic między wynikami pomiarów a wynikami obliczeń teoretycznych.

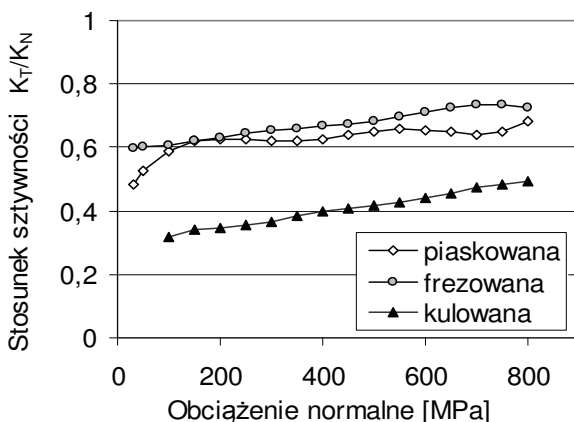
Interesujące jest porównanie wartości K_T/K_N dla powierzchni kulowanej z wynikami dla pozostałych typów powierzchni. Iloraz K_T/K_N dla powierzchni kulowanej jest niemal dwukrotnie mniejszy, co może wynikać ze specyficznego kształtu nierówności po takiej obróbce (rys. 6). W porównaniu z powierzchniami frezowanymi i piaskowanymi wierzchołki powierzchni kulowanej są bardziej smukłe i ostro zakończone, co powoduje, że w przypadku obciążenia stycznego mogą one ulegać nie tylko odkształceniom postaciovym o charakterze ścinania, ale także odkształceniom objętościowym o charakterze zginania.

Sztywność kontaktowa rośnie z obciążeniem i osiąga największe wartości (rzędu 6 GPa/ μm) dla najmniej chropowatej powierzchni piaskowanej. Dla najbardziej chropowatej powierzchni kulowanej sztywność kontaktowa jest najmniejsza. Wynika to z tego, że jest ona bardzo silnie umocniona i nie może być przy obciążaniu odkształcana i doprowadzana przez rozplaszczanie wierzchołków chropowatości do zwiększenia powierzchni kontaktu. Pośrednim przypadkiem jest próbka frezowana, która pomimo dość dużej chropowatości wykazuje znaczny wzrost sztywności kontaktowej wskutek obciążenia. Jest to efekt uplastycznienia i odkształcenia wierzchołków chropowatości prowadzący do wzrostu powierzchni kontaktu.

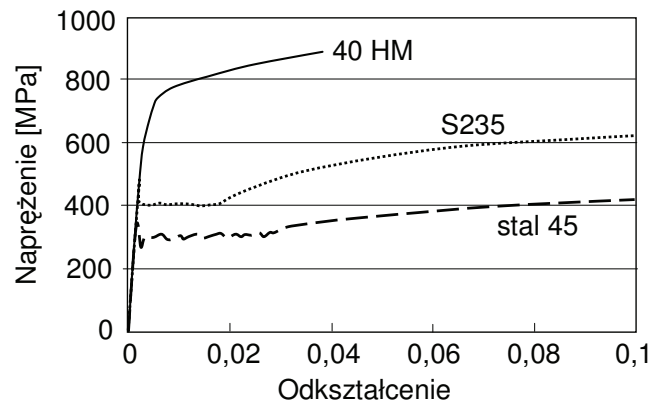
Warto zwrócić uwagę na wzajemne relacje sztywności kontaktowych poszczególnych próbek. Są one odwrotnie proporcjonalne do chropowatości – im większa chropowatość tym mniejsza sztywność. Różnice są duże, sztywność kontaktowa zarówno normalna (obliczana na podstawie wyników badań falami L), jak i poprzeczna (obliczana na podstawie danych uzyskanych w badaniach falami T) dla powierzchni piaskowanej obciążonej do 800 MPa jest 3 razy większa niż sztywność powierzchni frezowanej i ponad 10 razy większa od sztywności powierzchni kulowanej.

BADANIA PRÓBEK WYKONANYCH Z RÓŻNYCH GATUNKÓW STALI

Kolejna część eksperymentu dotyczyła oceny wpływu rodzaju materiału na sztywność kontaktową. Wykonano trzy rodzaje próbek z trzech różnych gatunków stali: węglowej 45, chromowo manganowej 40HM oraz konstrukcyjnej S235. Moduł sprężystości tych stali był praktycznie jednakowy, natomiast znacząco różniły się ich granice plastyczności oraz przebiegi krzywych rozciągania (rys. 12).



Rys. 11. Porównanie wartości ilorazu sztywności kontaktowej poprzecznej do podłużnej K_T/K_N dla próbek po różnych obróbkach
Fig. 11. Comparison of relative tangential to the normal contact stiffness (K_T/K_N) for presenting various surface states



Rys. 12. Krzywe rozciągania badanych stali: węglowej 45, konstrukcyjnej S235 i chromowo manganowej 40HM
Fig. 12. Stress-strain curves for tested steels: carbon 45, structural S235 and manganese and chromium 40HM

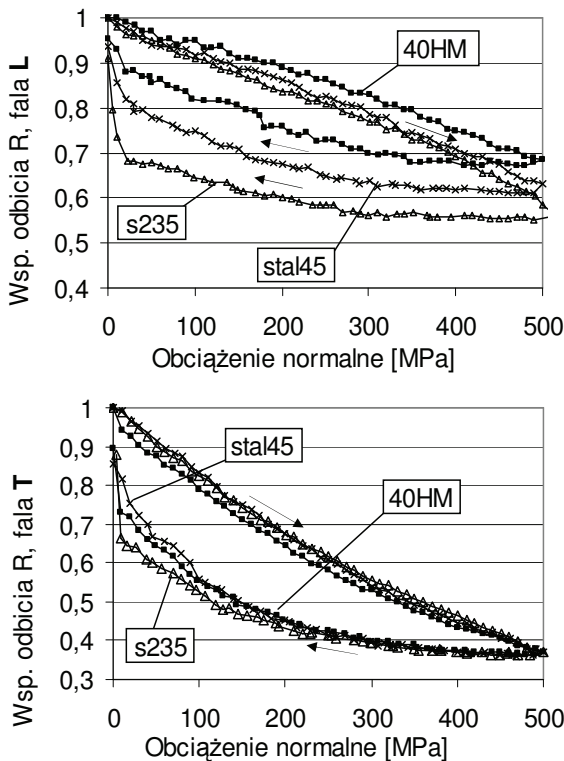
Powierzchnie próbek zostały poddane piaskowaniu w taki sposób, aby otrzymać jak najbardziej zbliżone parametry geometryczne powierzchni. Uzyskano: $Sa = 3,8 \mu\text{m}$ oraz $Sm = 180 \mu\text{m}$. Wyniki pomiarów zmian współczynnika odbicia fal oraz zmian sztywności kontaktowej w funkcji obciążenia dla tych próbek pokazano na rysunkach 13 i 14.

Najciekawszym wynikiem otrzymanym z porównania wyników pomiarów ultradźwiękowych dla tak samo ukształtowanych powierzchni różnych stali jest zróżnicowany przebieg zależności współczynników odbicia od obciążenia dla fal podłużnych i praktycznie identyczny przebieg dla fal poprzecznych (rys. 13). Współczynnik odbicia fal poprzecznych nie reaguje na zmianę własności plastycznych stali w odróżnieniu od współczynnika odbicia fal podłużnych, który wyraźnie zależy od granicy plastyczności materiału próbki. Na rysunku 15 przedstawiono stosunki sztywności kontaktowej normalnej i poprzecznej dla zbadanych próbek.

WNIOSKI

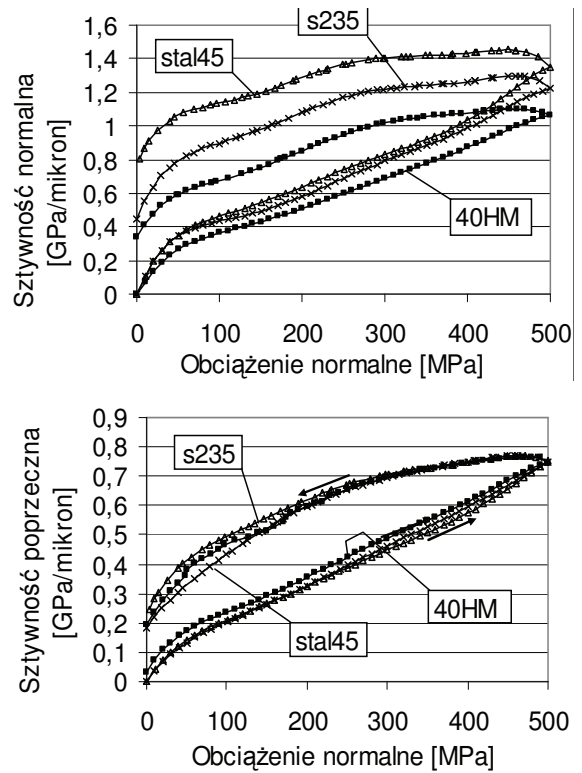
Badanie współczynnika odbicia fali ultradźwiękowej od styku powierzchni chropowatych dostarcza wielu informacji o kontakcie tych powierzchni, których nie można uzyskać innymi metodami. Wyniki są powtarzalne, dokładne i potwierdzają model teoretyczny, według którego amplituda fali ultradźwiękowej odbijającej się od powierzchni chropowatej w najczęściej spotykanych zakresach chropowatości jest zależna od sztywności kontaktowej obszaru kontaktu.

Przy dużych obciążeniach styku, znacząco przewyższających granicę plastyczności, występuje wyraźna histereza zależności współczynnika odbicia od obciążenia powierzchni styku. Jest to wynik uplastycznienia materiału zależny od własności mechanicznych materiału i sposobu przygotowania jego powierzchni. Histereza



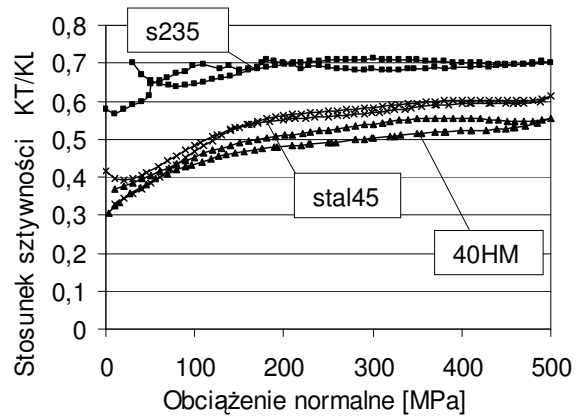
Rys. 13. Zależność współczynnika odbicia fali podłużnej L i poprzecznej T od obciążenia dla próbek o zbliżonych parametrach geometrii powierzchni, wykonanych z trzech gatunków stali o różnych granicach plastyczności

Fig. 13. Dependence of the reflection coefficient of longitudinal L and transverse T waves on the load for the samples made of three steel grades, various yield limits but with similar parameters of surface geometry



Rys. 14. Zależności sztywności kontaktowej normalnej K_N i poprzecznej K_T od obciążenia dla trzech gatunków stali o zbliżonych parametrach powierzchni i różnych granicach plastyczności

Fig. 14. Dependence of contact stiffness normal (K_N) and tangential (K_T) on the load for three samples made of various steel grades, with various yield limits but similar surface characteristics



Rys. 15. Iloraz sztywności kontaktowej poprzecznej do normalnej K_T/K_N dla próbek z trzech gatunków stali o zbliżonych parametrach powierzchni i różnych granicach plastyczności

Fig. 15. Ratio of the tangential to normal contact stiffness (K_T/K_N) for the three steel grades with similar surface characteristics and various yield limits

za jest znacznie mniejsza dla próbki kulowanej ze stali nierdzewnej, której warstwa wierzchnia została silniej umocniona podczas obróbki powierzchniowej (rys. 8) niż dla próbki frezowanej ze stali 45 (rys. 9), dla której uplastycznienie warstwy styku mogło być dużo silniejsze. Podobnie histereza dla próbki ze stali 40HM o dużej granicy plastyczności była znacznie mniejsza niż dla próbki ze stali S235 o małej granicy plastyczności (rys. 13).

Ponieważ sztywność kontaktowa poprzeczna jest relatywnie mniejsza od sztywności normalnej (w porównaniu z odpowiednimi sztywnościami objętościowymi stykających się materiałów) współ-

czynnik odbicia fali poprzecznej zmniejsza się przy obciążeniu styku szybciej niż współczynnik odbicia fali podłużnej. Oznacza to, że dla oceny jakości połączenia weiskowego lub skurczowego na podstawie zmian współczynnika odbicia należy stosować raczej fale poprzeczne niż podłużne. Badania pokazują, że dla znanych materiałów i chropowatości jest możliwa ultradźwiękowa ocena obciążenia powierzchni styku elementów połączonych skurczowo. Jednak szerokie pętle histerezy zaobserwowane podczas odciązania elementów oznaczają, że monitorowanie metodą ultradźwiękową degradacji połączenia skurczowego (spadku naprężeń kontaktowych) w czasie eksploatacji jest praktycznie niemożliwe. Wyraźny wzrost współczynnika odbicia fal od powierzchni styku jest obserwowany dopiero przy praktycznie zupełnym jej odciążeniu, a więc przy niemal całkowitej utracie możliwości przenoszenia obciążeń czy utracie szczelności. Perspektywnym ultradźwiękowym sposobem monitorowania jakości połączenia skurczowego w niektórych przypadkach może być śledzenie zmian naprężenia w pobliżu granicy połączenia metodą ultradźwiękową z wykorzystaniem zjawiska elastoakustycznego.

Różne przebiegi sztywności kontaktowej dla fali podłużnej i poprzecznej, uzyskane na stalowych próbkach o takiej samej chropowatości, ale różnej granicy plastyczności, dają możliwości wykorzystania opisanej techniki ultradźwiękowej do badania właściwości plastycznych powierzchniowej warstwy materiału w sposób kwazinieniszczący.

LITERATURA

- [1] Obraz J.: *Ultradźwięki w technice pomiarowej*. Wyd. Naukowo-Techniczne, Warszawa (1983).
- [2] Brotherhood C. J., Drinkwater B. W., Dixon S.: The detectability of kissing bonds in adhesive joints using ultrasonic techniques. *Ultrasonics* 41 (2003) 521÷529.

- [3] Palmer D. D., Rehbein D. K., Smith J. F., Buck O.: Nondestructive characterization of the mechanical strength of diffusion bonds. II. Application of a quasi-static spring model. *Journal of Nondestructive Evaluation* 7 (1988) 167÷174.
- [4] Quin A. M., Drinkwater B. W., Dwyer-Joyce R. S.: The measurement of contact pressure in machine elements using ultrasound. *Ultrasonics* 39 (2002) 459÷502.
- [5] Królikowski J., Szczepek J.: Prediction of contact parameters using ultrasonic method. *Wear* 184 (1991) 181÷195.
- [6] Dwyer-Joyce R. S., Drinkwater B. W., Quin A. M.: The use of ultrasound in the investigation of rough surface interfaces. *Transactions of the ASME* 123 (2001) 8÷16.
- [7] Rehbein D. K., Skillings B. J., Smith J. F., Thompson D. O.: Ultrasonic reflection from a stressed interface. *Journal of Nondestructive Evaluation* 4 (1) (1984) 3÷12.
- [8] Marhsall M. B., Lewis R., Dwyer-Joyce R. S., Demilly F., Flament Y.: Ultrasonic characterisation of wheel hube/axle interference fit pressures. *Proc. Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 225 (2011) 287÷298.
- [9] Jen C. K., Cao B., Nguyen K. T., Loong C. A., Legoux J. G.: On-line ultrasonic monitoring of a die-casting process using buffer rods. *Ultrasonics* 35 (1997) 335÷344.
- [10] Starzyński G., Mackiewicz S., Szelażek J.: Pomiary współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych od styku powierzchni chropowatych pod obciążeniem normalnym. *Wyd. Narodowa Akademia Nauk Ukrainy, seria „Fizyczne metody ta zasobu kontroluj seredowiszcz, materialik ta wyrobiw”*, nr 13, Lwów (2008) 144÷151.
- [11] Starzyński G.: Relation between material parameters and contact loading process. *The Arch. of Mech. Eng.* XLVI 3 (1999) 201÷220.
- [12] Szelażek J., Mackiewicz S., Starzyński G.: Zastosowania pomiarów współczynnika odbicia fal ultradźwiękowych od granicy metal-metal w technice. *Wyd. IPPT PAN – Biuro Gamma, Mat. XVI Seminarium „Nieniszczące Badania Materiałów”*, Zakopane, 9÷12 marca (2010) 67÷82.
- [13] Greenwood J. A., Williamson J.: Contact of nominally flat rough surfaces. *Proc. Roy. Soc., London, Ser. A* 295 (1966) 300÷319.
- [14] Sherif H. A., Kossa S. S.: Relationship between normal and tangential contact stiffness of nominally flat surfaces. *Wear* 151 (1991) 49÷62.
- [15] Nagy P. B.: Ultrasonic classification of imperfect interfaces. *J. Nondestruct. Eval* 11 (1992) 127÷139.