

WYKORZYSTANIE PROFILOMETRII 3D DO BADAŃ KONTAKTU POWIERZCHNI

Grzegorz STARZYŃSKI
IPPT PAN, Warszawa
gstarz@ippt.pan.pl

1. WSTĘP

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 szeregu wielkości opisujących styk powierzchni: m.in. 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. Próbę ich wyznaczania za pomocą fal ultradźwiękowych przedstawialiśmy z prof. Szelągkiem i dr Mackiewiczem na XVI Seminarium w Zakopanem [1-2] a także w pracy [3].

W tej pracy chciałbym pokazać różne metody wykorzystania geometrycznego pomiaru powierzchni poddanej obciążeniom kontaktowym, przy pomocy profilometru 3D. W kolejnych rozdziałach przedstawione będą podstawy profilometrii 3D w kontekście badań kontaktu powierzchni (rozd.2), wyniki eksperymentu polegającego na zgniataniu kontaktowym powierzchni gładkich i tworzeniu się nowych struktur powierzchniowych (rozd.3), zgniatanie i wypłaszczanie powierzchni chropowatych (rozd.4), wyznaczenie rzeczywistej powierzchni styku (rozd.5) oraz wykorzystanie profilometrii do pomiaru zużycia (rozd.6).

2. PROFILOMETRIA A KONTAKT POWIERZCHNI

2.1 Struktura geometryczna powierzchni (SGP)

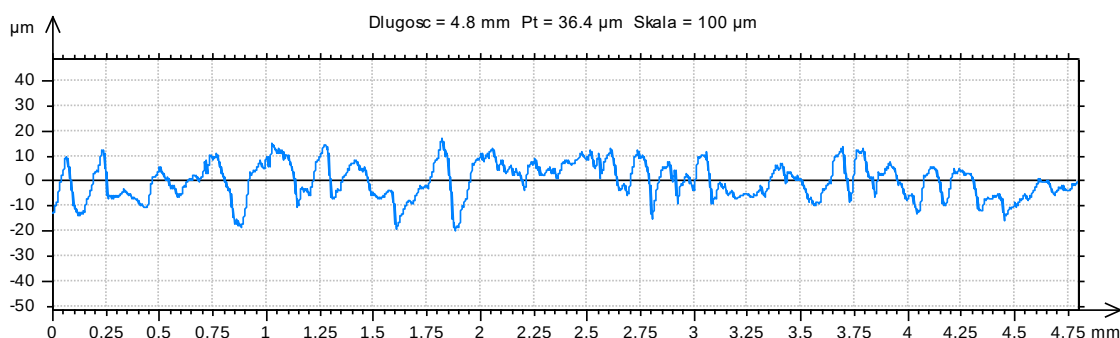
Struktura geometryczna powierzchni jest ściśle związana z wytwarzaniem i eksploatacją elementów maszyn i urządzeń a w miarę rozwoju technologii, rozwija się również coraz bardziej precyzyjna aparatura pomiarowa. Pojawiły się nowe możliwości analizy powierzchni w układzie trójwymiarowym (3D) z dokładnością nanometrową. Wspomaganie komputerowe ułatwiło tę analizę i stworzyło możliwości określenia nowych funkcji i parametrów: przestrzennych, objętościowych i funkcjonalnych, pozwalających na znajdowanie związków między charakterystykami powierzchni a jej walorami użytkowymi.

W zależności jednak od rodzaju użytkowania czy oceny powierzchni pod kątem jej wykorzystania, należy do wyników pomiarów podchodzić uważnie i z ostrożnością. Między innymi problem kontaktu dwóch powierzchni chropowatych wymaga szczególnego zdefiniowania używanych parametrów, albo przynajmniej uważnej ich oceny. Poniżej przedstawiony zostanie krótki przegląd profilometrii ze szczególnym uwzględnieniem jej

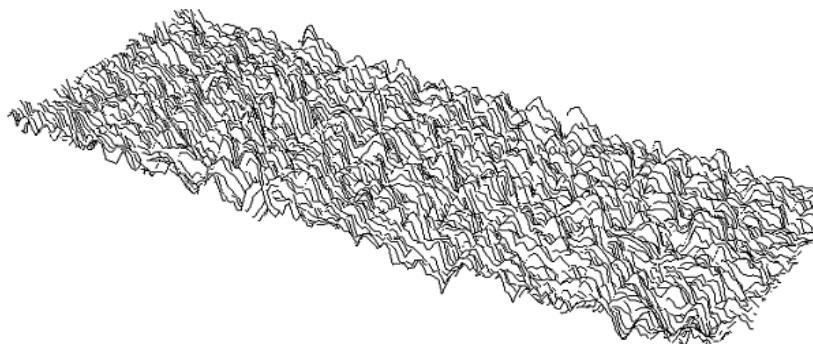
wykorzystania do pomiarów powierzchni poddanych obciążaniu w kontakcie z drugą powierzchnią.

Granicę między badanym ciałem stałym a otaczającym go środowiskiem nazywamy *powierzchnią rzeczywistą*, która charakteryzuje się bardzo złożoną budową ukształtowaną w procesie produkcji i użytkowania. Wymiary występujących na niej nierówności z jednej strony porównywalne są z wymiarami atomu a drugiej z wymiarem całej powierzchni. Aby ją opisać stworzone zostało pojęcie *struktury geometrycznej powierzchni* (SGP).

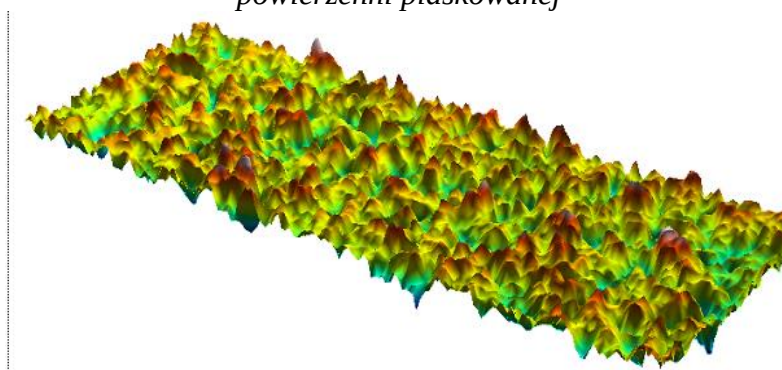
Do badań struktury geometrycznej powierzchni używa się najczęściej profilometrów, wcześniej liniowych, które w wyniku pomiaru dawały jeden profil jako odzwierciedlenie ruchu igły po badanej powierzchni (Rys. 2.1a), obecnie niemal wyłącznie korzysta się już z profilometrów 3D, które mierzą nie jeden profil, lecz niemal dowolną, założoną przez badacza liczbę równoległych profili (Rys.2.1b), w wyniku czego komputerowe programy wizualizacyjne tworzą ciągłe, quasi stereometryczne obrazy powierzchni (Rys. 2.1c).



Rys. 2.1a Przykładowy profil pomiarowy powierzchni piaskowanej



Rys. 2.1b Obraz powierzchni utworzony z kolejno pomierzonych równoległych profili powierzchni piaskowanej



Rys. 2.1c Quasi stereometryczna wizualizacja powierzchni piaskowanej, utworzona z kolejno pomierzonych równoległych profili

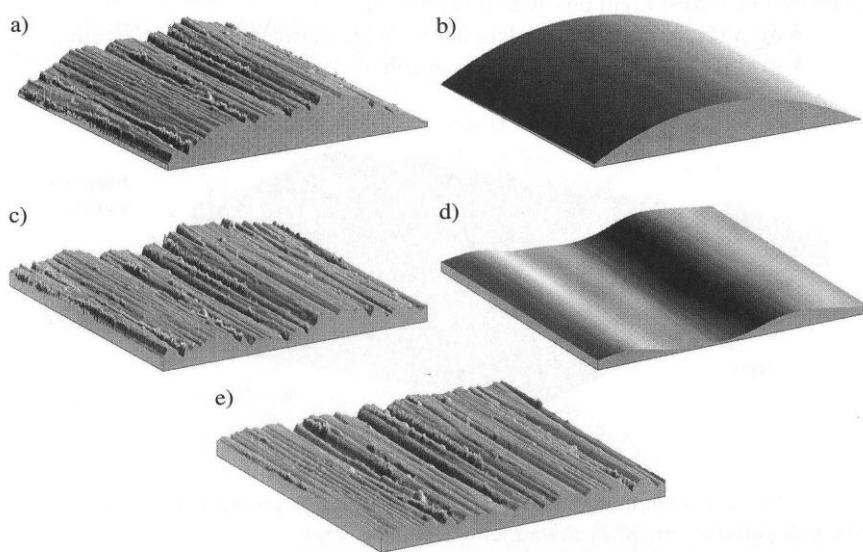
Badane powierzchnie są próbkowane w kierunku ruchu igły (x) z odstępem Δx , oraz w kierunku prostopadłym y z odstępem Δy . Odstęp Δx może być bardzo mały i zależy w dużej

mierze od możliwości elektronicznych profilometru (Δx może być rzędu kilku nanometrów) natomiast odstęp Δy jest ograniczony minimalnym krokiem i błędem przesuwu stolika pozwalającego na pomiar kolejnego profilu, czyli zależny jest od mechanicznych możliwości urządzenia. Najlepsze profilometry pozwalają na pomiar profili w odstępach $0.5 \mu\text{m}$. W wyniku pomiaru otrzymujemy zatem macierz (x,y) o wymiarach $M \times N$, a każdemu punktowi przypisana jest wartość z wysokości powierzchni mierzona obecnie z dokładnością rzędu nanometrów.

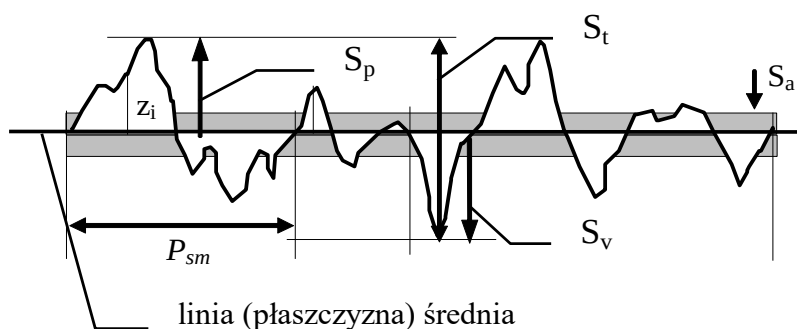
Na strukturę geometryczną powierzchni składają się *chropowatość*, *falistość* i – według niektórych norm – także *błędy kształtu* (rys 2.2a i 2.2b). Dla wyznaczania podstawowych parametrów chropowatości odfiltrowuje się błędy kształtu i falistość, jednak dla oceny pola kontaktu realnej powierzchni elementu niezbędne jest branie pod uwagę również tych dwóch składowych struktury geometrycznej. Szerzej o tym w dalszej części rozdziału.

2.2 Parametry SGP

Parametry SGP służą do ilościowej oceny stanu analizowanej powierzchni. Dawniej parametry były nazywane dużą literą R z różnymi indeksami (R_a , R_q , R_{sk} ,... itp.) co pochodziło od angielskiego słowa *R-roughness* i oznaczało parametr obliczany dla profilu. Określenia te pozostały do dziś dla profilu, natomiast parametry obliczane dla całej badanej powierzchni oznacza się literą S (od *surface*) z analogicznymi indeksami jak te poprzednie (S_a , S_q , S_{sk} , itp.). Jest ich ok. 30.



Rys. 2.2. Porównanie różnych elementów SGP – powierzchnia rzeczywista (a), błąd kształtu (b), falistość + chropowatość (c), falistość (d), chropowatość (e)



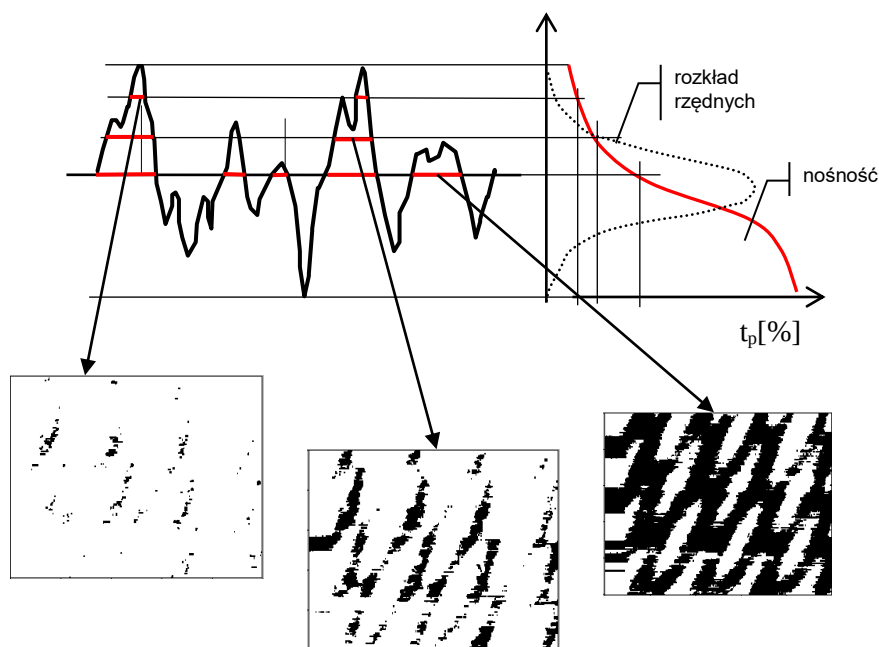
Rys. 2.3 Schemat profilu z wybranymi parametrami

Na rys. 2.3 pokazany jest przykładowy profil z niektórymi parametrami (w rozdziale tym, wszystkie parametry będą opisywane w układzie trójwymiarowym jako S... jednak szereg schematycznych rysunków przedstawionych będzie dla profili, ze względu na wygodę i łatwość wizualną). Podstawowym elementem od którego liczy się wszystkie parametry w 3D jest płaszczyzna średnia (dawniej, w 2D linia średnia), nazywana często powierzchnią odniesienia. Matematycznie jest ona wyznaczana metodą najmniejszych kwadratów. Jednym z podstawowych i niewątpliwie najczęściej używanym parametrem jest S_a , czyli średnie arytmetyczne odchylenie chropowatości (w μm)

$$S_a = \frac{1}{MN} \int_j^N \int_i^M z(x_i, y_j)$$

gdzie z jest rzędną charakterystycznego ukształtowania powierzchni, zmierzonego profilometrem. Bardzo podobnym w interpretacji parametrem jest średnie kwadratowe odchylenie chropowatości (S_q). Ponadto, korzysta się jeszcze z wysokości nierówności S_t , maksymalnej wysokości wzniesień S_p i maksymalnej głębokości dolin (wgłębień) S_v , (patrz rys. 2.3). Do parametrów amplitudowych zalicza się także współczynnik skośności S_{sk} i współczynnik skupienia S_{ku} , które są odpowiednio trzecim i czwartym momentem statystycznym rozkładu rzędnych.

Rozkład rzędnych jest ilustracją ukształtowania geometrycznego powierzchni a jednocześnie jest równy statystycznej funkcji gęstości prawdopodobieństwa. Pozwala to korzystać z innych wielkości statystycznych charakteryzujących rozkład, takich właśnie jak wcześniej wymienione momenty, do których należy również parametr S_q – jako moment drugiego rzędu. Ważnym parametrem jest udział nośny t_p [%] na zadanej wysokości, który, przedstawiony w funkcji głębokości tworzy tzw. krzywą nośności (rys.2.4). Krzywa ta jest całką (dystrybucją) z rozkładu rzędnych i wskazuje stosunek powierzchni przekroju na wybranym poziomie do całkowitej powierzchni. W początkowej części, licząc od najwyższych wzniesień, jest ona bardzo zbliżona do rzeczywistej powierzchni styku – jednego z najważniejszych parametrów przy opisie kontaktu dwóch powierzchni chropowatych.

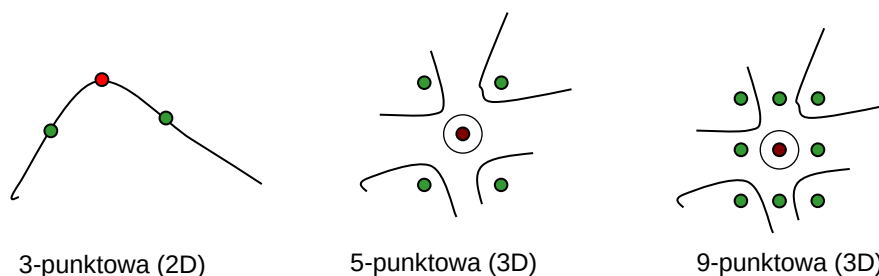


Rys. 4 Schematyczny profil i rzeczywiste obrazy przecięć powierzchni frezowanej na różnych poziomach. Z prawej strony profilu schematyczny rozkład rzędnych i krzywa nośności

Kolejnymi parametrami wykorzystywanymi do modelowania procesu kontaktu powierzchni chropowatych są wielkości związane z wierzchołkami: gęstość wierzchołków S_{ds} (liczba wierzchołków na jednostkę powierzchni), średnie nachylenie nierówności $S_{dq} [\mu\text{m}/\mu\text{m}]$ oraz średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołków nierówności $S_{sc} [1/\mu\text{m}]$.

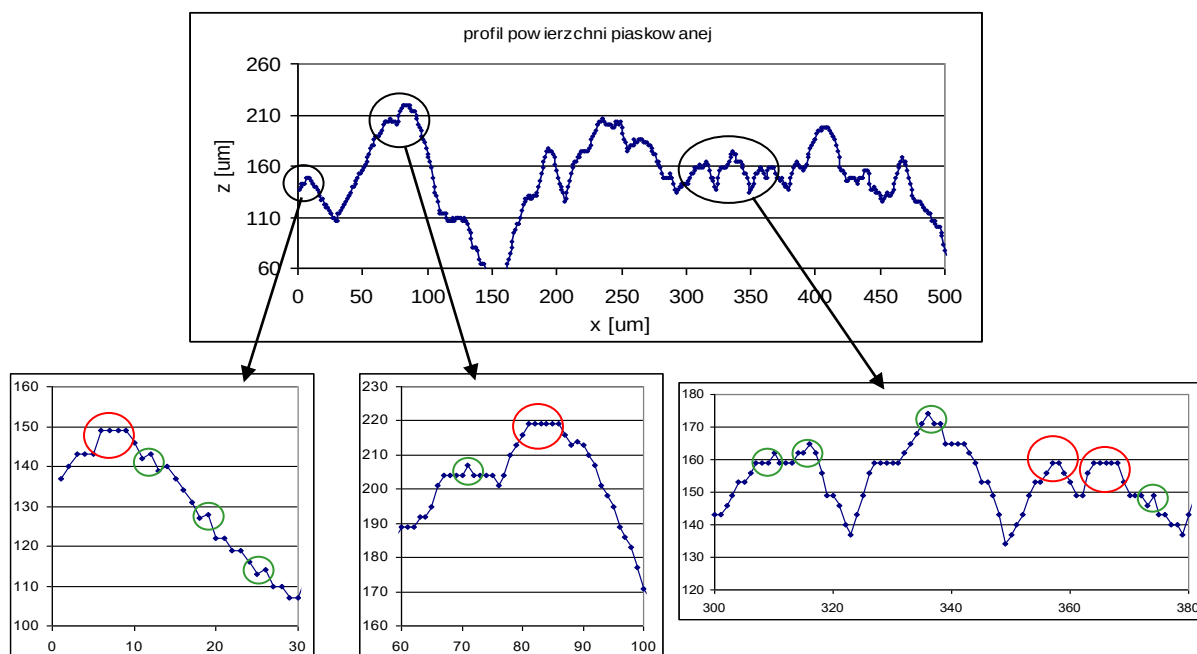
2.3 Wpływ kroku próbkowania na parametry chropowatości

Wybór kroku próbkowania (dx , dy) zmienia stopień dokładności odwzorowywanej powierzchni. W zasadzie dąży się do jak najgęstszego próbkowania aby odwzorowanie było jak najdokładniejsze. Jednak w przypadku kontaktu gęste próbkowanie nie oddaje prawidłowo rzeczywistego problemu i może wprowadzić poważne kłopoty, zwłaszcza, jeśli do modelu weźmie się dane ze standardowych programów do analizy powierzchni. Nie oznacza to oczywiście, że programy te działają nieprawidłowo. Otrzymany wynik związany jest przede wszystkim z definicją wierzchołka, zaproponowaną przez Greenwooda [4] i stosowaną w większości programów komputerowych analizujących wyniki pomiarów profilometrycznych. Według tej definicji wierzchołkiem jest każdy punkt pomiarowy, którego „sąsiedzi” mają niższe wartości składowej z . W przypadku pomiarów dwuwymiarowych jest to definicja trójpunktowa, a dla 3D – pięcio- lub dziewięciopunktowa (rys.2.5).



Rys.2.5 Różne definicje pojęcia wierzchołka

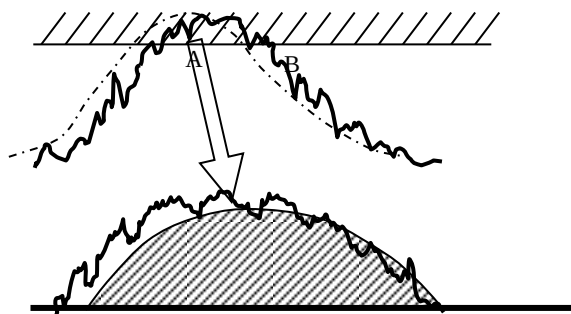
Nietrudno sobie wyobrazić, że będzie bardzo dużo wierzchołków, które będą spełniały wymogi definicji, ale z punktu widzenia procesu kontaktu mechanicznego będą one zupełnie nieistotne.



Rys.2.6 Przykładowy profil z powierzchni piaskowanej i jego fragmenty w okolicach nierówności

Na rys.2.6 pokazany jest rzeczywisty przykład opisanego wyżej problemu. Wybrany został fragment profilu z rzeczywistego pomiaru powierzchni piaskowanej a następnie powiększono trzy części w okolicach nierówności. Czerwonymi kółkami zaznaczono nierówności, które powinny zostać policzone a przy takiej definicji wierzchołka nie zostaną wzięte pod uwagę, a zielonymi zaznaczono wierzchołki, które są mało istotne, ale spełniają warunki definicji.

Należy zatem rozróżnić *wierzchołek* (według definicji) i *nierówność*, która będzie rzeczywistym, nośnym miejscem kontaktu dwóch powierzchni (rys.2.7).



Rys.2.7 Rozróżnienie między wierzchołkiem i nierównością nośną z punktu widzenia problemu kontaktu

Wydaje się, że jedną z metod na takie rozróżnienie jest *rozgęszczanie*, czyli pomiar ze znacząco większym krokiem próbkowania. Należy jednak zwrócić uwagę jak zwiększanie kroku próbkowania wpływa na parametry geometryczne powierzchni, aby zmniejszając dokładność pomiaru nie zatracić jego cech charakterystycznych. **Trzeba jednak wyraźnie podkreślić, że mówimy tu o problemie kontaktu powierzchni chropowatych i rozgęszczanie nie jest prawidłowym ani pożądanym działaniem i nie może być stosowane w żadnym wypadku do pomiarów chropowatości jako takich.** Problem optymalnego wyboru kroku próbkowania został przedstawiony przeze mnie w pracy [5].

W następnych rozdziałach przedstawione zostaną przykłady niestandardowych zastosowań profilometrii 3D, pozwalającej na dokładniejszy i często unikatowy opis zmian morfologii powierzchni po różnych procesach.

3. CHROPOWACENIE POWIERZCHNI W WYNIKU DEFORMACJI (ROUGHENING)

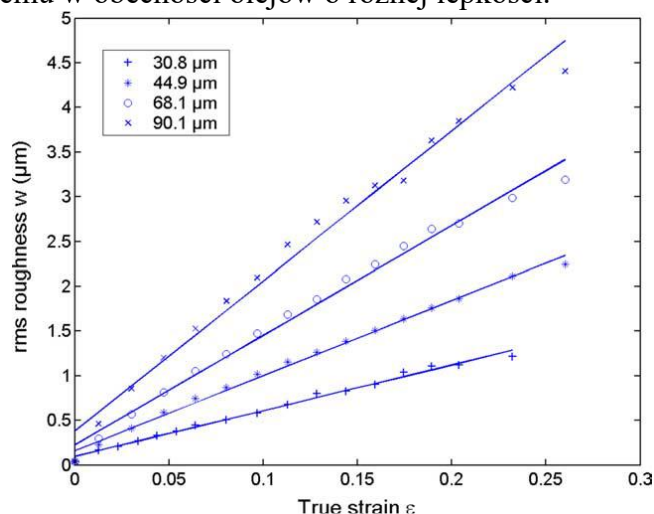
Podczas deformacji gładkie początkowo, swobodne powierzchnie metalowe stają się chropowate, co wpływa nie tylko na ich wygląd ale także na szereg właściwości powierzchni materiału, takich jak współczynnik odbicia, tarcie, transport smarów, spawalność i przyczepność. Chropowata powierzchnia może także ułatwić tworzenie inicjacji miejsc dla lokalizacji deformacji, co może poważnie pogorszyć własności mechaniczne materiału. W konsekwencji proces chropowacenia (*roughening process*) powierzchni podczas deformacji jest przedmiotem licznych badań eksperymentalnych i modelowych. Badania te wykazały, że chropowatość zależy przede wszystkim od wartości odkształcenia, wielkości ziarna i tekstury. Zależności między chropowatością a odkształceniem oraz wielkością ziarna są często liniowe ale niektórzy autorzy stwierdzili odchylenia od liniowości co jest szczególnie ważne przy większych deformacjach.

Ogólnie zatem zależność między parametrami opisującymi średnią wysokość nierówności (takimi jak R_a , R_q) można przedstawić następująco:

$$R_a = C \varepsilon d$$

Gdzie ε jest wartością odkształcenia próbki, d to średnia wielkość ziarna a C jest współczynnikiem zależnym od badanego materiału i określanego parametru (rys. 3.1).

Znacznie mniej jest prac opisujących chropowacenie powierzchni podczas kontaktu. Zachodzi ono w specyficznych warunkach, gdy mamy do czynienia z gładkimi powierzchniami i elementem smarnym między nimi. Poniżej przedstawione zostaną wyniki eksperymentu pokazującego co dzieje się z gładką początkowo powierzchnią poddaną odkształceniu kontaktowemu w obecności olejów o różnej lepkości.



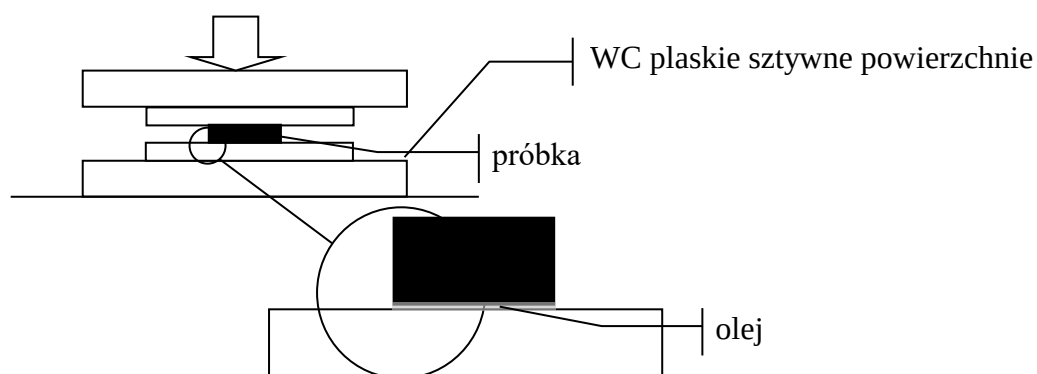
Rys. 3.1 Zmiany chropowatości w funkcji odkształcenia dla materiału o różnej wielkości ziaren [6]

Do eksperymentu wybrano dwie stale: stal austenityczną 0H18N9 oraz stal S235 o różnych charakterystykach wytrzymałościowych. Granice plastyczności tych stali są bardzo zbliżone (ok. 300 MPa) natomiast dalszy przebieg znacząco się różni. Stal austenityczna monotonicznie się umacnia natomiast stal S235, po obszarze niestabilności w początkach plastyczności niewiele się umacnia i już powyżej odkształcenia 0,15 zaczyna słabnąć i zrywa się przed odkształceniem 0,30.

Eksperyment przeprowadzono na próbkach okrągłych o grubości ok. 3 mm i średnicy 8 mm, które były ściskane w zmodernizowanym urządzeniu do badania kontaktu normalnego. Działanie urządzenia oparte jest na prasie hydraulicznej pozwalającej na uzyskaniu dużych sił normalnych. Próbkę umieszczono między płaskimi i gładkimi płytkami z bardzo twardego materiału (WC). Pomiędzy powierzchnią próbki a płytką z WC wprowadzano olej, w związku z czym próbka była obciążana przez cieniutki film olejowy powstający na powierzchniach kontaktu próbki i płytki ściskającej.

Gładkie, wypolerowane powierzchnie próbek o Sa w granicach 13 – 23 nm obciążano „idealnie gładką i sztywną” powierzchnią ($S_a = 34 \mu\text{m}$) z dwoma olejami - AN22 o lepkości 55 mm²/s i SP 680 o lepkości 3250 mm²/s w temperaturze pokojowej (patrz rys. 3.2).

Na kolejnych rysunkach pokazane są wyniki tak przeprowadzonego eksperymentu.

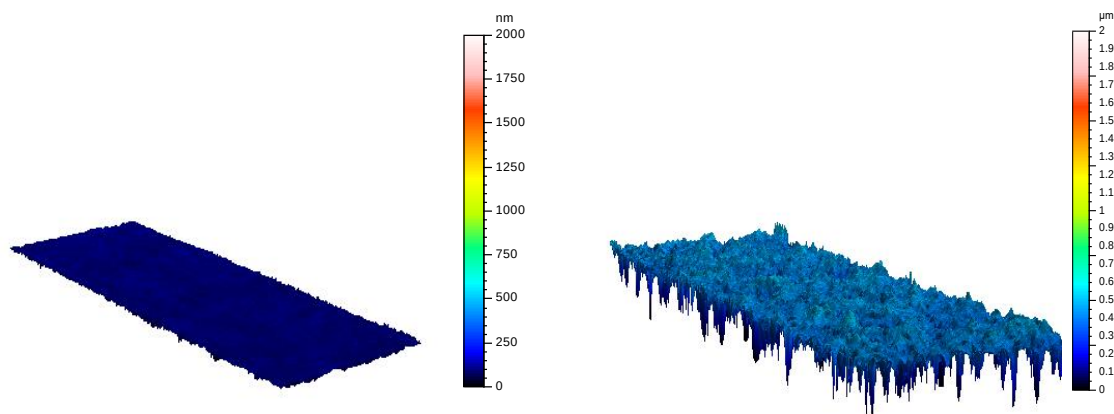


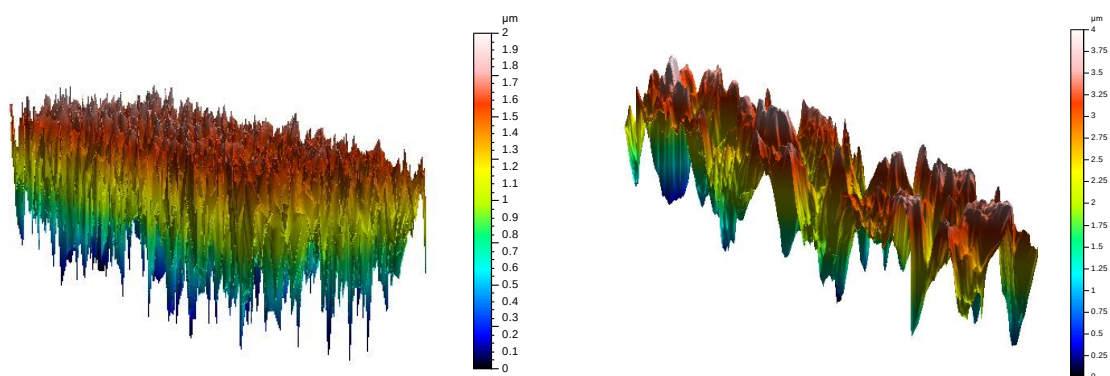
Rys. 3.2 Schemat obciążania kontaktowego próbki

Najogólniej można stwierdzić, że w wyniku wzajemnego obciążenia gładkich polerowanych powierzchni z różnymi olejami, powstaje nowa struktura geometryczna powierzchni, całkowicie odmienna od struktury powierzchni wyjściowej i różna dla oleju bardzo lepkiego (SP 680) i oleju o małej lepkości (AN 22).

Pierwsze rysunki, (rys. 3.3) przedstawiają obrazy 3D powierzchni stali austenitycznej przed obciążeniem (rys. 3.3a) oraz nowych struktur powierzchni (3.3b-3.3c). Aby ułatwić i uzmysłowić skalę zmian, jaka zachodzi podczas ściskania powierzchni z różnymi olejami, wizualizację przedstawiono w tej samej skali.

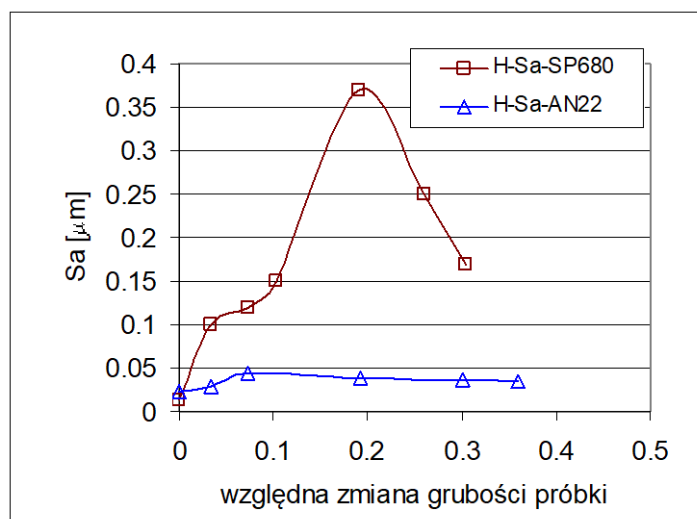
Jak łatwo zauważyć powierzchnie są diametralnie różne, przy obciążeniu z olejem o dużej lepkości powstają duże rzadziej usytuowane nierówności podczas gdy dla obciążenia z olejem o małej lepkości powierzchnia staje się gęsto chropowata, z nierównościami o małej wysokości. Trzeba zauważyć, (co potwierdzą kolejne rysunki porównujące parametry powierzchni, rys.3.4 – 3.5), że zmiany w amplitudzie nierówności między tak wygenerowanymi powierzchniami dochodzą do kilku razy. Ostatni z tych rysunków (rys.3.3d) pokazuje zmiany amplitudowe chropowatości dla stali S235, które są jeszcze większe od analogicznych dla stali austenitycznej.



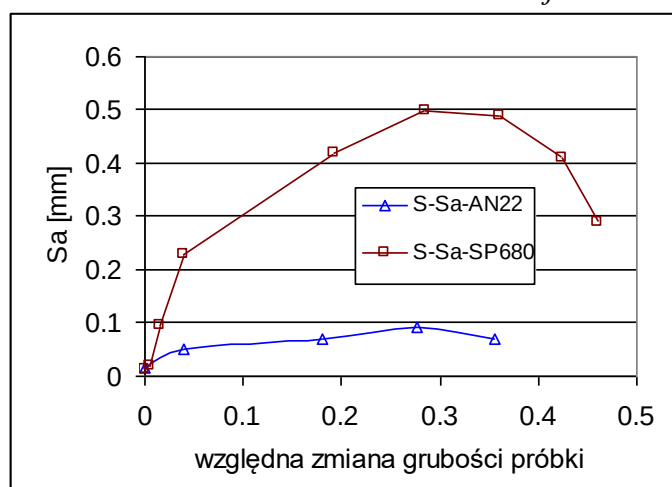


Rys. 3.3 Widok 3D powierzchni stali H18N9

- a) polerowanej, nieobciążonej
- b) po obciążeniu do odkształcenia 0.2 z olejem AN22 (o małej lepkości)
- c) po obciążeniu do odkształcenia 0.2 z olejem SP 680 (o dużej lepkości)
- d) Widok 3D powierzchni stali S235 po obciążeniu do odkształcenia 0.2 z olejem SP680 (o dużej lepkości).



Rys. 3.4 Porównanie zmian wartości Sa dla obu olejów dla stali H18N9



Rys. 3.5 Porównanie zmian wartości Sa dla obu olejów dla stali S235

Jak widać, zmiany są rzeczywiście bardzo duże i zależne zarówno od lepkości oleju jak i badanego materiału. Na powierzchni stali zwykłej S235, nie umacniającej się, tworzy się

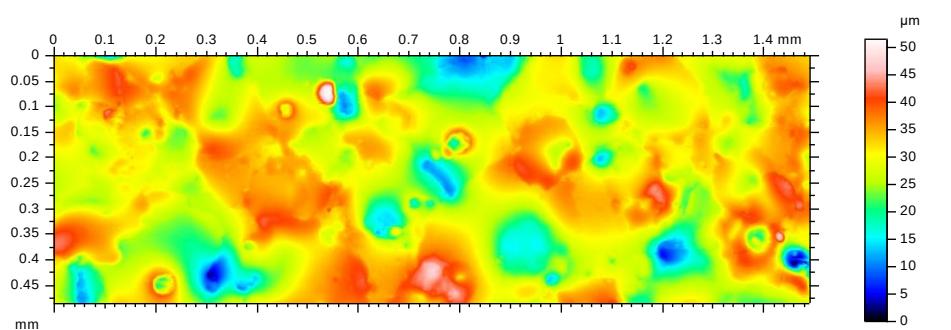
chropowatość o większej amplitudzie niż dla stali austenitycznej. Wynikają z tego dwa wnioski: Po pierwsze, obciążanie z olejem powoduje do pewnego momentu zwiększanie się chropowatości powierzchni, a po przekroczeniu pewnego krytycznego punktu, chropowatość się zmniejsza, gdyż zostaje zgniatana powierzchnią przeciwpróbki. Punkty krytyczne występują między 20% a 30% całkowitego odkształcenia próbki a miejsce w którym występują jest zależne od historii obciążania i materiału próbki.

Przedstawiony przykład jest rzadko opisywany, w odróżnieniu od chropowacenia swobodnych powierzchni, np. blach poddanych plastycznemu formowaniu, gdzie problem ten występuje często. Dodatkowym problemem chropowacenia kontaktowego jest to, że występuje ono na styku powierzchni, często w zamkniętych i niedostępnych miejscach.

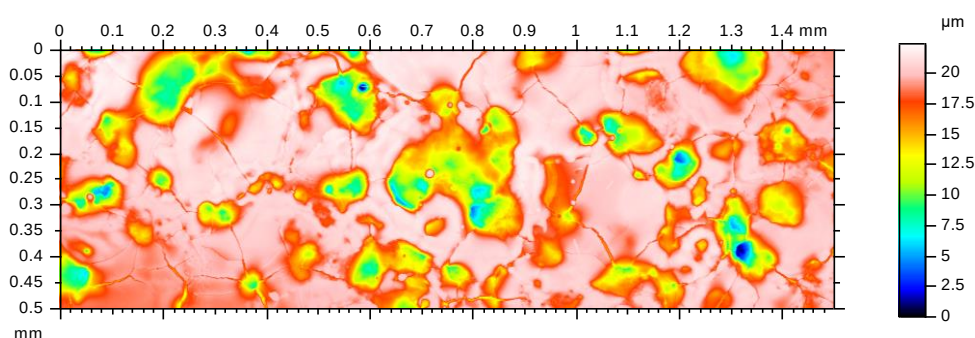
4. WYPŁASZCZANIE POWIERZCHNI W WYNIKU DEFORMACJI (FLATENING)

Kolejny przykład opisuje odwrotną sytuację – chropowate początkowo powierzchnie zostają wypłaszczane w wyniku plastycznej deformacji kontaktowej. Jednak, wbrew oczywistym oczekiwaniom, chropowate powierzchnie nie zawsze będą się spłaszczać w taki sam sposób.

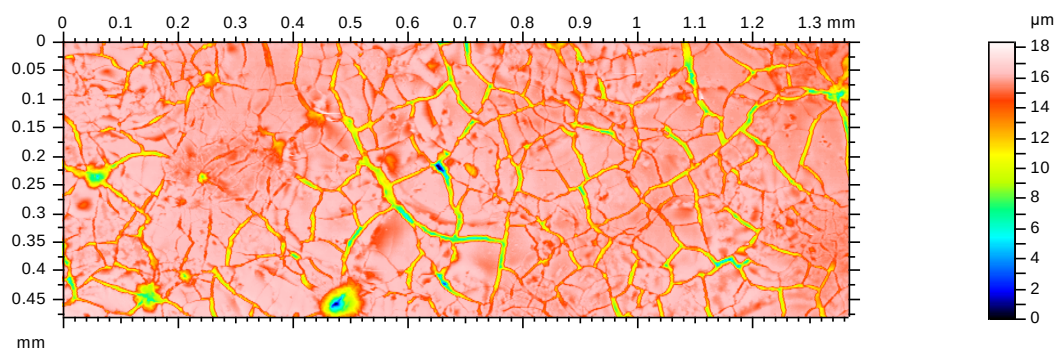
Na próbkach ze stali austenitycznej H18N9 po obróbce elektroiskrowej dokonano pomiarów i obliczeń profilometrycznych przed obciążaniem (chropowatość powierzchni $S_a=5,2 \mu\text{m}$.) oraz po obciążeniu do czterech różnych zgniotów i dla dwóch olejów oraz dla ściskania suchego.



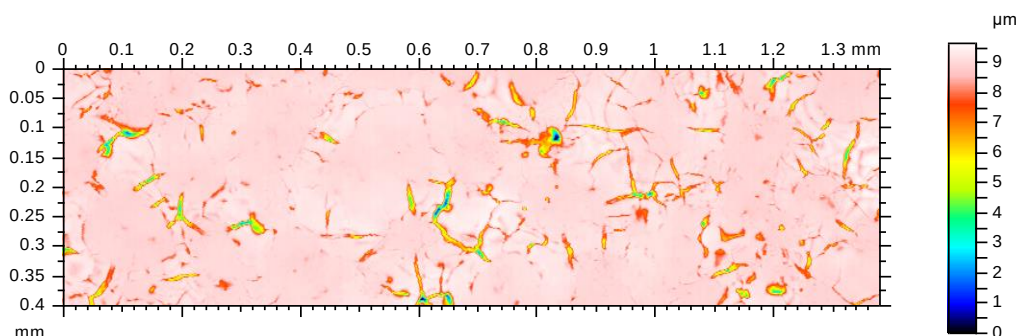
Rys. 4.1a Struktura powierzchni przed obciążeniem.



Rys. 4.1b Struktura powierzchni po odkształceniu 18% z olejem SP680.



Rys. 4.1c Struktura powierzchni po odkształceniu 34% z olejem SP680.

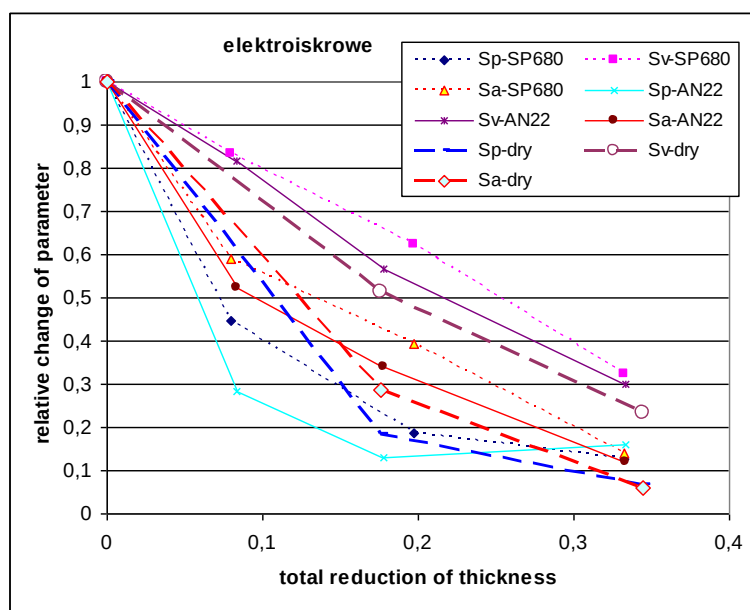


Rys. 4.1d Struktura powierzchni po odkształceniu 34% bez oleju.

W ramach pomiarów profilometrycznych porównano zmiany parametrów wysokościowych ale przede wszystkim zaobserwowano także specyficzną zmianę struktury powierzchni. W miarę wzrostu obciążenia, struktura początkowo izotropowa (rys. 4.1a) zmienia się najpierw (przy zgnieciu 8%) w strukturę składającą się z pojedynczych jeziorek o kształcie okrągłym bądź eliptycznym o głębokości do 30 μm , pomiędzy którymi znajduje się wypłaszczona powierzchnia na której rozstęp chropowatości nie przekracza 1 μm . Zgniot na poziomie 18% wprowadza powstawanie połączeń kanalikowych pomiędzy jeziorkami, których głębokość zmniejsza się do ok. 20 μm , a głębokość łączących je kanalików wynosi 4 μm (rys. 4.1b). W zgniecionym obszarze pomiędzy nimi rozstęp chropowatości pozostaje na poziomie 1 μm . Dalsze zwiększanie zgniotu powoduje tworzenie się gęstej siatki kanałów a jeziorka zamieniają się w wąskie rynny o głębokości 2-10 μm , (rys. 4.1c). Płaskie fragmenty między nimi nie przekraczają powierzchni 20x25 μm a rozstęp chropowatości nadal pozostaje na poziomie 1 μm .

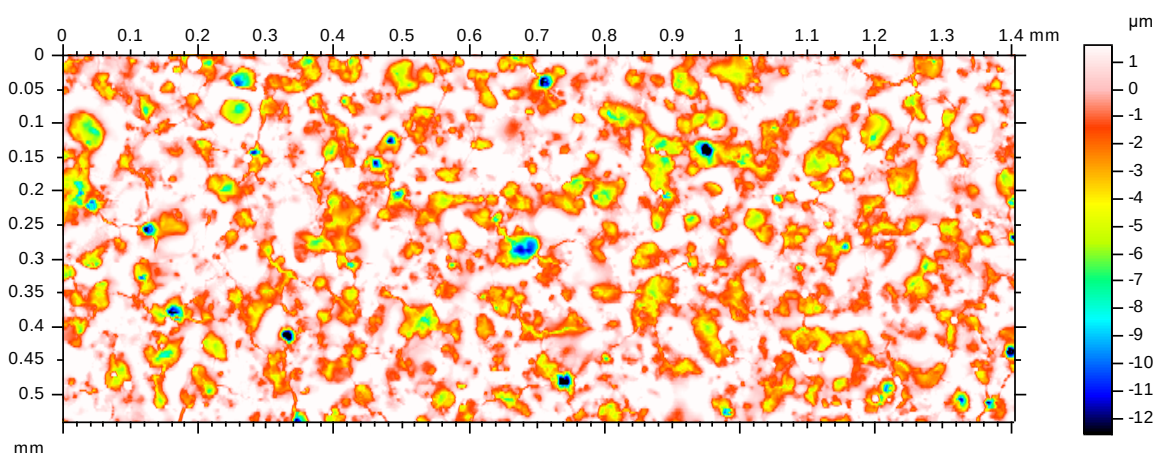
Zmiany o takim charakterze najbardziej są widoczne dla bardzo lepkiego oleju SP680 a mniej dla rzadszego AN22, jednak charakter struktury kanalikowej przy obciążaniu w obecności obu olejów pozostaje ten sam. W przypadku zgniatania bez obecności oleju początkowa faza zgniotu jest bardzo podobna, (pojedyncze jeziorka o kształcie okrągłym bądź eliptycznym o głębokości do 30 μm , pomiędzy którymi znajduje się wypłaszczona powierzchnia na której rozstęp chropowatości nie przekracza 1,5 μm). Dalsze obciążenie powoduje silne spłaszczenie obszaru poza jeziorkami (rozstęp chropowatości nie przekracza 01-03 μm) a same jeziorka prawie zanikają tworząc niepołączone ze sobą kanaliki o głębokości do 12 μm .

Taki charakter zmian struktury powierzchni spowodował bardzo silne zmniejszanie się wartości parametrów amplitudowych opisujących tę powierzchnię. Sieć kanalików pozwalała „uciekać” olejom i chropowatość bardzo się zmniejszała co jest widoczne na rysunku poniżej.

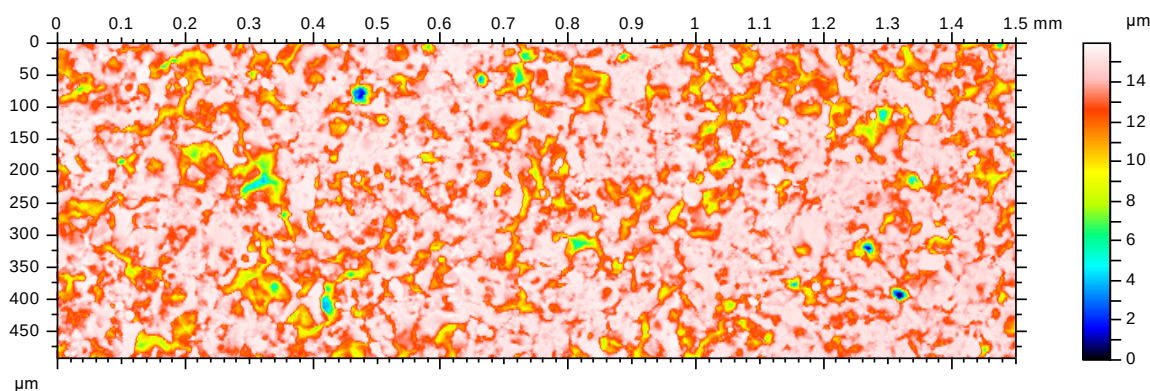


Rys.4.2 Względna zmiana parametrów wysokościowych dla stali 0H18N9 po obróbce elektroiskrowej

Podobną analizę przeprowadzono dla stali 45 o początkowej chropowatości $Sa=2,8 \mu m$. Zmiany struktury powierzchni były zupełnie inne. Nie powstawały kanaliki, jeziorka długo zachowywały owalny kształt, dopiero przy odkształceniu powyżej 30% zaczęły zmieniać kształt na podłużny (rys. 4.3).



Rys. 4.3a Struktura powierzchni stali 45 po odkształceniu 19% z olejem SP680.

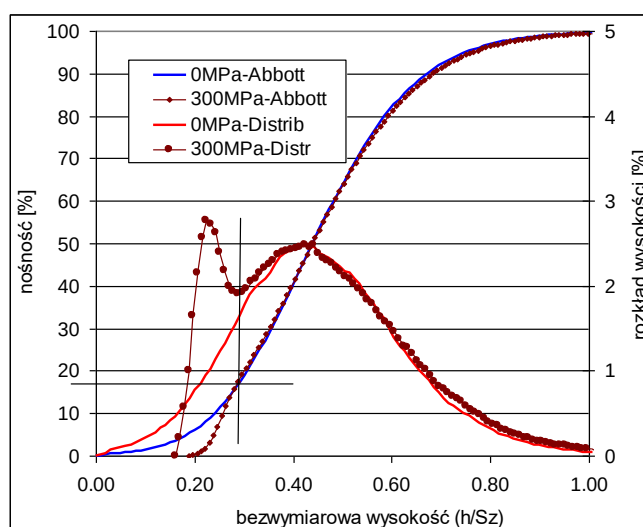


Rys. 4.3b Struktura powierzchni stali 45 po odkształceniu 36% z olejem SP680.

5. IDEA WYZNACZANIA RZECZYWISTEJ POWIERZCHNI STYKU Z POMIARÓW PROFILOMETRYCZNYCH

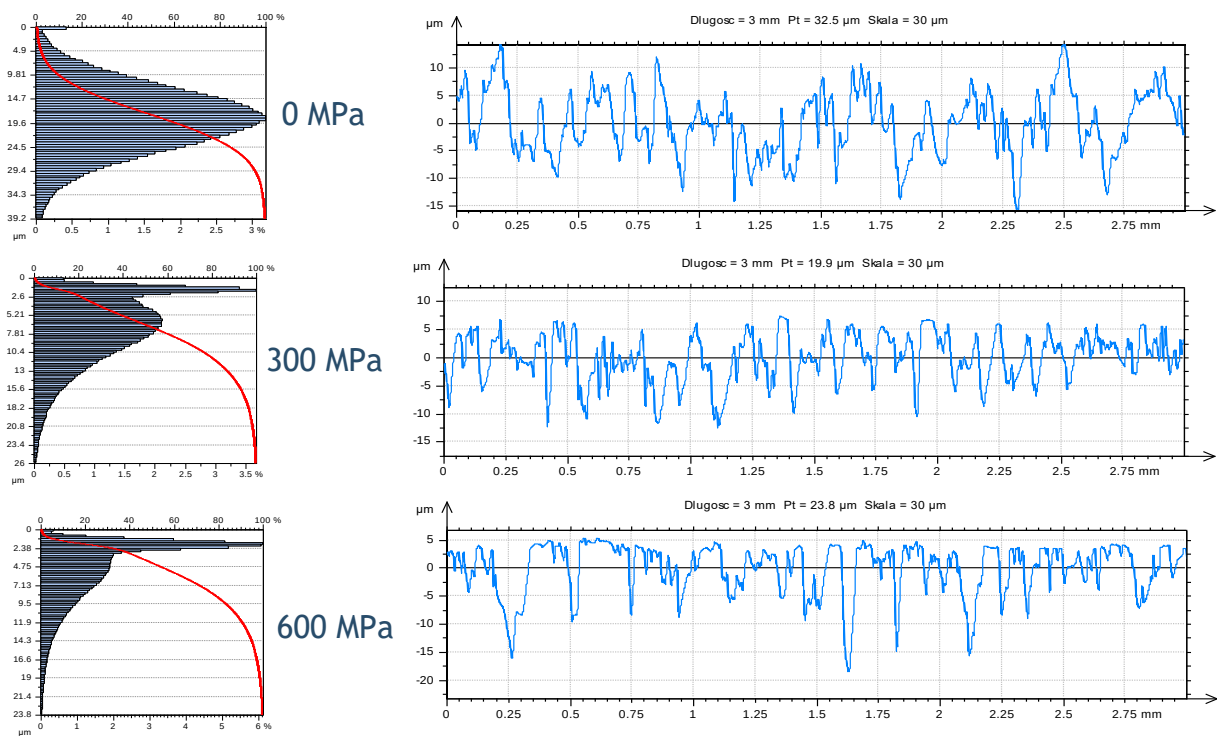
Problem wyznaczenia czy nawet szacowania rzeczywistej powierzchni styku jest trudny zarówno eksperymentalnie jak i teoretycznie i numerycznie. Z drugiej strony jest istotny, gdyż – jak było wspomniane we wstępie - przy wzajemnym kontakcie powierzchni ich styk następuje na wierzchołkach nierówności, więc 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. Chciałbym pokazać możliwość szacowania RPS z wykorzystaniem profilometrii na powierzchni po deformacji. Idea takiego wyznaczenia RPS pokazana zostanie na przykładzie powierzchni piaskowanej zgniecionej gładką sztywną przeciwpróbką.

Na krzywej rozkładu wysokości, która przed obciążeniem była bardzo zbliżona do rozkładu normalnego (krzywa 0MPa-Distr na rys. 5.1), w wyniku obciążania i deformacji powierzchni pojawia się pik (wypukłość), co odpowiada zwiększonej liczbie z-rzędnych wynikającej ze zgniecenia szczytów chropowatości, podczas gdy dolna część chropowatości (doliny) pozostaje praktycznie bez zmian. Idea wykorzystania tej zależności do oceny **rzeczywistej powierzchni styku** jest przedstawiona na rysunku. 5.2, gdzie pokazano przykładowe profile i odpowiadające im krzywe rozkładu wysokości po deformacji powierzchni do różnych obciążeń normalnych.

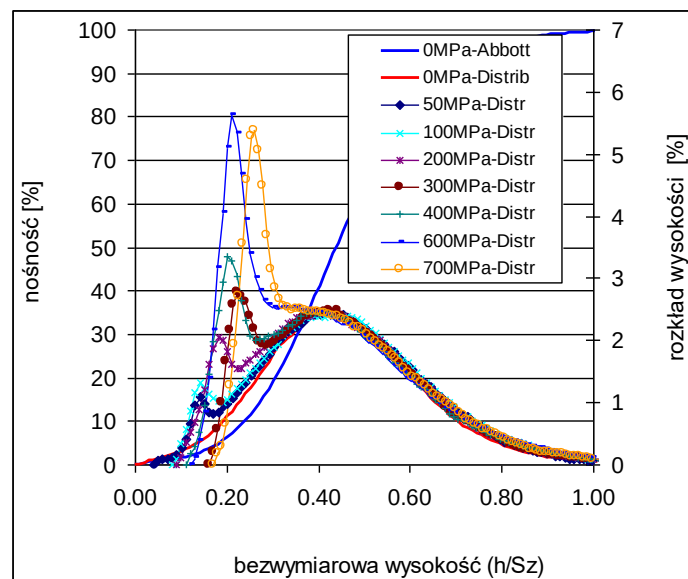


Rys.5.1 Ocena Rzeczywistej Powierzchni Styku (RPS) na podstawie rozkładu wysokości i krzywych nośności

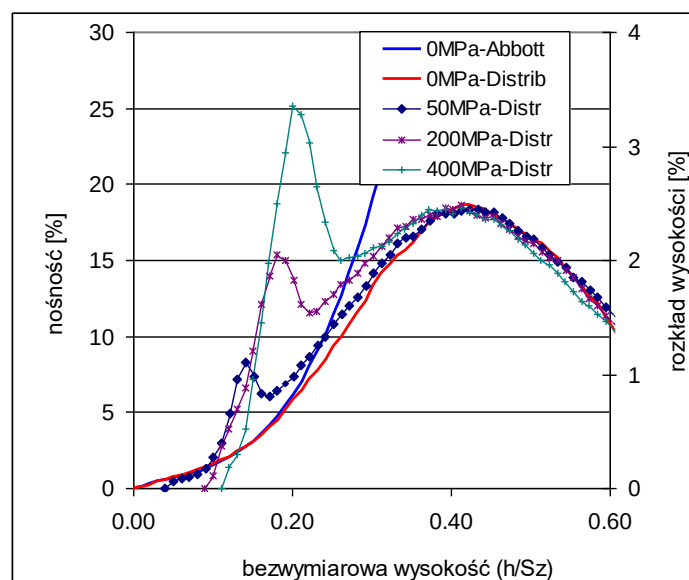
Rzeczywistą Powierzchnię Styku (RPS) szacujemy na podstawie miejsca na krzywej rozkładu w którym krzywa rozkładu po deformacji zaczyna się różnić od krzywej przed obciążeniem (rys. 5.1). Warto zwrócić uwagę, że rozkład dolin (ogólnie wysokości powyżej 50% krzywej nośności) praktycznie się nie zmienia bez względu na to jakie obciążenie zostaje zastosowane.



Rys.5.2 Profile i odpowiadające mu krzywe rozkładu wysokości przed i po deformacji powierzchni

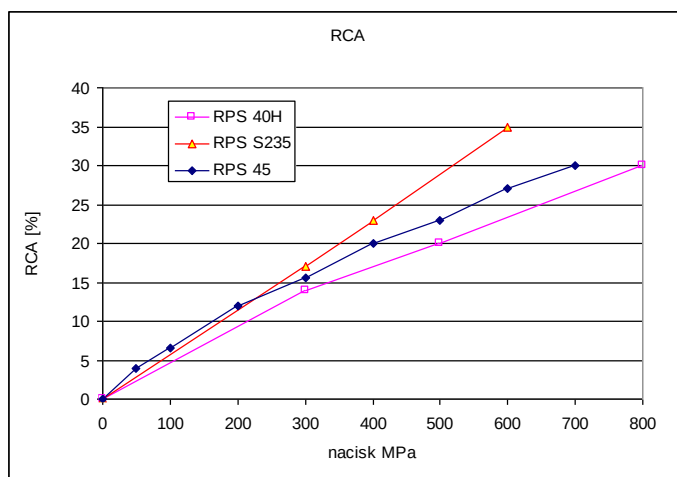


Rys.5.3 Porównanie przebiegów rozkładów wysokości dla powierzchni piaskowanej obciążanych do różnych wartości naprężenia



Rys. 5.4 Powiększony początkowy fragment rozkładów wysokości powierzchni z rys. 5.3

Kolejne rysunki, (rys. 5.3-5.4) pokazują rzeczywiste zmiany rozkładu wysokości dla próbki piaskowanej poddanej zwiększającemu się obciążeniu (od. 50 do 700MPa). Warto zwrócić uwagę, że już dla obciążenia nominalnego 50MPa (co odpowiada zaledwie ok. 15% wartości granicy plastyczności badanego materiału) powstaje wyraźny pik na krzywej rozkładu, wskazujący na zgniecenie wierzchołków, tworząc rzeczywistą powierzchnię styku o wartości ok. 5%. Przebiegi krzywej RPS w funkcji zadanego nominalnego obciążenia normalnego dla trzech różnych stali przedstawione są na rys. 5.5. Zależność ta jest bliska liniowej, a położenie krzywych zależy od granicy plastyczności materiału. Im materiał jest słabszy tym RPS jest większa dla zadanej siły.



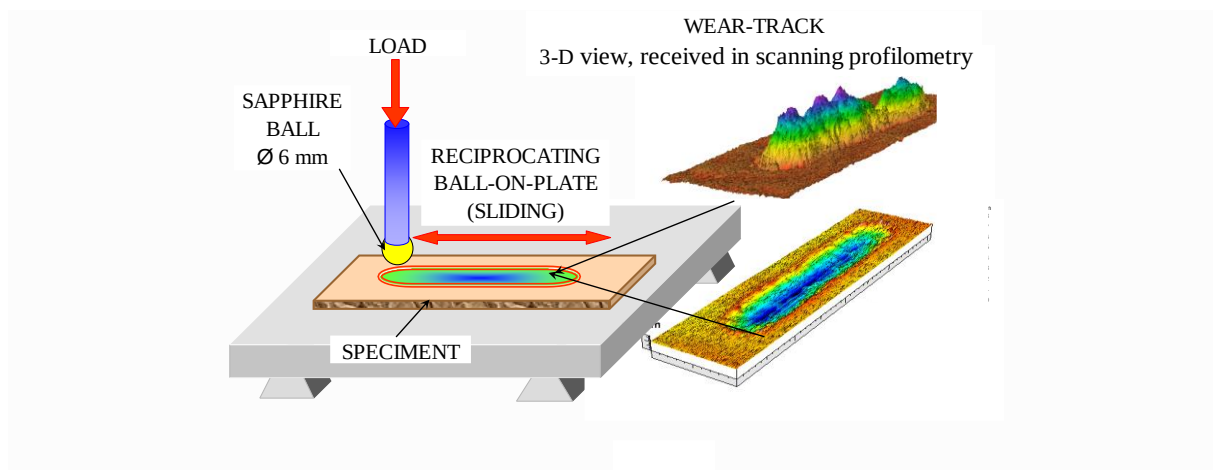
Rys.5.5 Rzeczywista Powierzchnia Styku wyznaczona dla takich samych powierzchni piaskowanych utworzonych na różnych stalach

6. POMIAR ZUŻYCIA PRZY ZASTOSOWANIU POROFILOMETRII 3D

Jednym z ważniejszych problemów, z którymi od lata boryka się technologia powierzchni jest problem odporności na zużycie cierne. A jeśli chce się badać zużycie i porównywać materiały pod kątem odporności trzeba mieć dobre narzędzia do pomiarów. Badanie zużycia w standardowych materiałach takich jak stal czy stopy aluminium oraz przy dużych naciskach nie jest dużym problemem, gdyż rowki zużyciowe są równe i

zastosowanie metody wagowej, czy wykorzystanie pomiaru profilu poprzecznego rowka daje dobre i porównywalne wyniki. Problem zaczyna się przy niestandardowych materiałach, które w czasie zużycia zachowują się odmiennie. Przykładem takiego problemu jest materiał z pamięcią kształtu NiTi.

Testy na zużycie przez tarcie „dry-sliding-test” przeprowadzono na skonstruowanym w PWW IPPT urządzeniu (tribo-tester "ball-on-plate") w warunkach suchego tarcia. Obciążona szafirowa kulka ruchem posuwisto - zwrotnym o skoku ślizga się bez smarowania po powierzchni badanego materiału w ciągu zadanego czasu. Schemat urządzenia do badania zużycia przedstawia Rys.6.1.

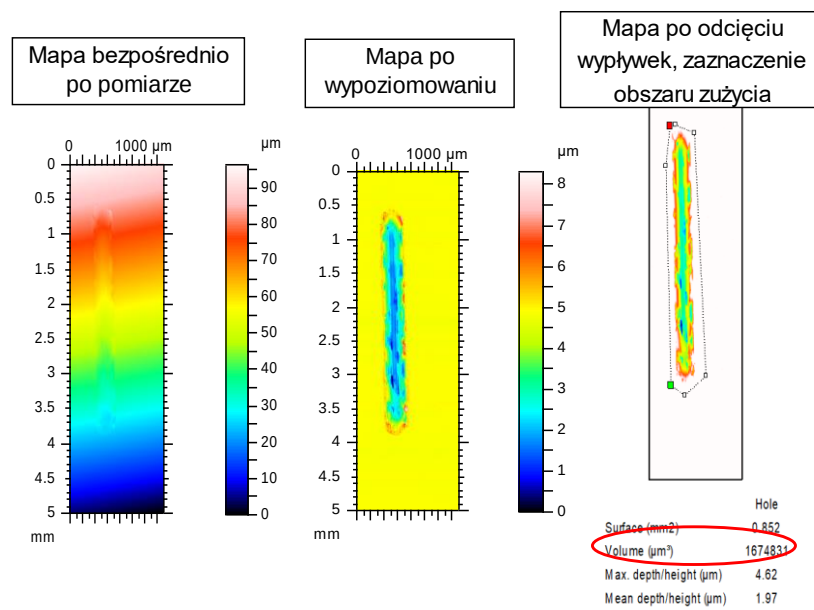


Rys.6.1. Schemat urządzenia do badania zużycia i graficzna ilustracja wyznaczenia metodą profilometryczną objętości ubytku materiału podczas „dry-sliding” testu.

Wyznaczenie objętości ubytku materiału NiTi podczas zużycia przeprowadzono na podstawie analizy profilometrycznych pomiarów powierzchni śladów zużycia. W przedstawionych badaniach miarą zużycia jest objętość bruzdy.

Idea procedury powtarzalnego wyznaczenia objętości zużytego materiału pokazana jest na Rys. 6.2. Na powierzchni uzyskanej bezpośrednio z pomiaru profilometrycznego wykonano następujące operacje:

- Wypoziomowanie zmierzonego obszaru tak, aby powierzchnia poza śladem po zużyciu zajmowała położenie poziome - będzie to płaszczyzna odniesienia;
- Odcięcie części obszaru zmierzonego leżącego powyżej płaszczyzny odniesienia płaszczyzną równoległą do powierzchni odniesienia;
- Zaznaczenie obszaru rowka zużycia i obliczenie objętości obszaru materiału, znajdującego się poniżej płaszczyzny odcięcia.

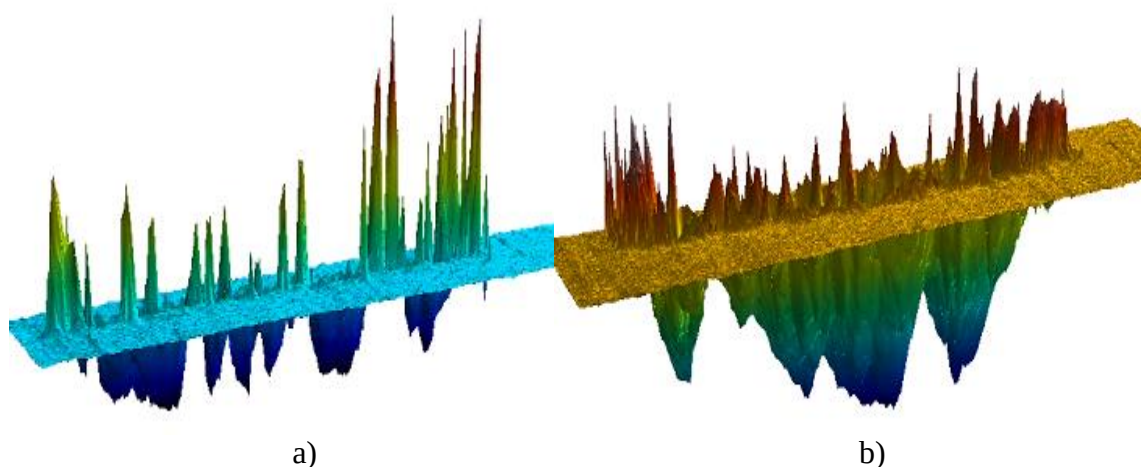


Rys. 6.2 Procedura wyznaczenia objętości śladu zużycia na podstawie pomiarów profilometrycznych

W ten sposób wyznaczono ubytek zużytego materiału podczas wszystkich testów na zużycie dla badanych powierzchni. Trzeba koniecznie zwrócić uwagę, że tak liczona objętość rowka zużycia (z pomiaru 3D, w którym obraz 3D wyznaczany jest na podstawie ok. 400 zmierzonych profili) znacznie dokładniej odzwierciedla rzeczywistą ilość zużytego materiału. W literaturze powtarza się często metoda wyznaczania objętości rowka na podstawie średniej głębokości i szerokości poprzecznego profilu rowka i długości rowka. Jest to bardzo zgrubne oszacowanie, zwłaszcza jeśli rowek po zużyciu jest nierównomierny, a taka właśnie sytuacja występuje w przypadku materiału NiTi.

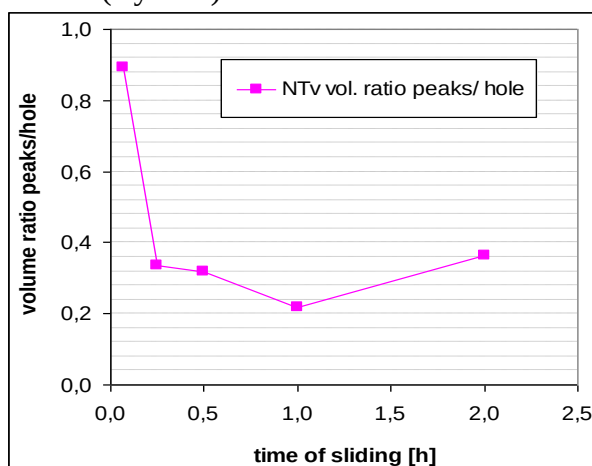
Standardowe testy przebiegu współczynnika tarcia w funkcji czasu zużycia wskazują na występowanie krótkiej (czasowo) fazy „dopasowania” ślizgającej się kulki po badanym materiale. Jednak sposób tego dopasowania jest diametralnie różny dla różnych materiałów, szczególnie dla tych z pamięcią kształtu.

W pierwszych minutach zużycia, wypływki są znacznie większe niż rowek zużycia, zarówno jeśli chodzi o ich wysokość (6-8µm dla wypływek przy ok. 2 µm dla rowków) a przede wszystkim objętość, która w tej fazie jest ok. 3 razy większa od objętości rowków (rys.6.3).

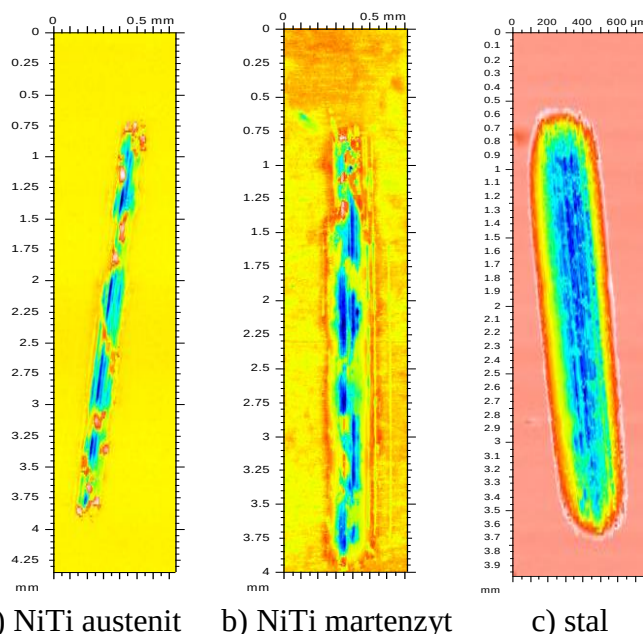


Rys.6.3. NiTi austenit po 1,5 min. zużycia (a) i po 1 godzinie zużycia (b), obciążenie 0,5N

W miarę kontynuowania procesu zużycia, wypływki maleją a objętość rowka zwiększa się. Stabilizacja stosunku objętości wypływek do objętości rowka następuje już po 15 min., na poziomie 0.3 – 0.4 (Rys.6.4).



Rys. 6.4. Stosunek objętości wypływek (peaks) do rowku zużycia (hole) w funkcji czasu zużycia (NiTi austenit)



a) NiTi austenit b) NiTi martenzyt c) stal

Rys. 6.5 Porównanie kształtu rowków zużycia (30min 0,5N) dla NiTi w fazie austenitycznej (a), martenzytycznej (b) oraz dla stali (c)

Już w początkowej fazie zużycia, wyraźnie można dostrzec zupełnie inny kształt rowka zużycia dla materiału NiTi w porównaniu z rowkiem np. dla stali i sytuacja ta nie zmienia się w stanie ustabilizowanym (rys. 16, 17). Rowek zużycia w stali jest bardzo równy, ma kształt „cygara” o stałej głębokości (Rys.6.5c). Materiał NiTi bez względu na fazę w jakiej się znajduje (austenitycznej lub martenzytycznej), zużywa się nierównomiernie, w trakcie badanego procesu powstają 3-5 zagłębień wzdłuż drogi tarcia (Rys. 6.5 a,b).

Wypływki znajdują się nie tylko na bokach rowka ale tworzą wzngrórki przecinające rowek zużycia i dzielący go na oddzielne zagłębienia.

Reasumując, wykorzystanie profilometrii 3D do ilościowej oceny zużycia jest bardzo przydatne zwłaszcza w sytuacji, gdy ślad zużycia nie jest równy. W porównaniu z metodą wagową, dodatkowo uwzględnia się istnienie wypływek, które w tamtej metodzie są wazone jak część pozostała po zużyciu, co jest błędem systematycznym pomiaru.

7. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiony został skrócony przegląd możliwości wykorzystania profilometrii 3D w różnych sytuacjach i problemach badawczych. Oprócz standardowego opisywania powierzchni za pomocą wielu parametrów, profilometria 3D pozwala na bardzo dokładną wizualizację powierzchni, często lepszą i dającą więcej możliwości niż mikroskop. W kolejnych rozdziałach pokazane zostały różne, niestandardowe podejścia do opisu powierzchni po różnych obróbkach lub po odkształceniu kontaktowym, które w zależności od sytuacji może zwiększać lub zmniejszać chropowatość powierzchni. Pokazana została możliwość szacowania rzeczywistej powierzchni styku odkształcanych powierzchni chropowatych jak również pomiar zużycia par trących.

LITERATURA

- [1] 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
- [2] Szelażek J., Mackiewicz S., Badania współczynnika odbicia i sztywności kontaktowej powierzchni chropowatych przy pomocy fal ultradźwiękowych, XVI Seminarium NIENISZCZĄCE BADANIA MATERIAŁÓW, Zakopane, 9-12 marca 2010
- [3] Starzyński G., Buczkowski R., Ultrasonic Measurements of Contact Stiffness Between Rough Surfaces, J.of Trib., 2014, vol. 136
- [4] Greenwood J.A., Williamson J.: Contact of nominally flat rough surfaces. Proc.Roy.Soc., London, Ser.A 295 (1966) 300-319
- [5] Kucharski S., Starzyński G., Study of contact of rough surfaces: Modeling and experiment, Wear, 2014, vol. 311, pp. 167-179
- [6] O. Wouters, W.P. Vellinga, R. Van Tijum, J.Th.M. de Hosson, On the evolution of surface roughness during deformation of polycrystalline aluminum alloys, Acta Materialia 53 (2005) 4043–4050

