

Andrzej Posmyk^{1*}, Ireneusz Piotr Chmielik²

¹ Politechnika Śląska, Wydział Transportu, ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, Poland

² Taylor Hobson Polska, ul. Zwolenńska 46 H, Warszawa, Poland

* Corresponding author. E-mail: andrzej.posmyk@polsl.pl

Otrzymano (Received) 30.12.2009

WPŁYW METODY POMIAROWEJ CHROPOWATOŚCI MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH NA OCENĘ POWIERZCHNI

Przedstawiono wpływ metody pomiaru chropowatości materiałów strukturalnie niejednorodnych na uzyskane wyniki pomiarów. Materiałami niejednorodnymi strukturalnie są kompozyty na osnowie stopów aluminium, magnezu i tworzyw sztucznych zawierające fazę zbrojącą o znacznie większej twardości niż osnowa, np. SiC i Al₂O₃. Podczas pomiarów chropowatości oraz określania zużycia liniowego metodą profilografowania z wykorzystaniem tzw. bazy niepracującej materiałów kompozytowych można popełnić błędy wynikające z różnicy twardości osnowy i fazy zbrojącej. Wyniki pomiarów metodą stykową i bezstykową są istotnie różne dla tego samego materiału. W pracy przedstawiono wyniki pomiarów używanego w budowie części nadwozia pojazdów stopu do przeróbki plastycznej EN-AW 6061 (AlMg2Si) oraz wytworzonego na jego osnowie kompozytu W6D.22A używanego do produkcji wałów napędowych samochodów osobowych. Stwierdzono duże różnice wyników pomiarów metodą bezstykową i stykową oraz to, że czynnikiem istotnym dla poprawności wyników w metodzie stykowej jest nacisk igły pomiarowej na badaną powierzchnię zawierającą składniki struktury o różnej twardości.

Słowa kluczowe: kompozyt, chropowatość, metody pomiaru, błędy pomiarowe

THE ACTING OF COMPOSITE MATERIALS ROUGHNESS MEASURING METHOD ON SURFACE ESTIMATION

The influence of roughness measuring on surface structural inhomogeneous materials has been presented in this paper. Inhomogeneous materials are composite with Al, Mg alloys or polymer matrix, including reinforcing phase having significantly higher than matrix hardness, e.g. SiC and Al₂O₃. Analogous problems with composites can be observed by roughness measuring on composite nickel or chromium covering, including soft PTFE particles. There are two groups of measuring methods, i.e. mechanical method using diamond stylus and an optical, interference method, using light beam (non-contact). The results delivered from the instruments according to both measuring methods are not comparable. Another problem can be observed by surface roughness measuring of composite materials with aluminium alloy matrix and alumina as reinforcing phase. The surface topography of matrix alloy EN-AW 6061 having hardness (39 HB, T0) and the alloy reinforced with 22% of alumina particles (59 HB, T0) has been investigated. The samples have been specially prepared by metallographic polishing on Struers equipment. Two profilometers, i.e. mechanical Taylor Hobson Talysurf and optical FRT have been used during the investigation. The measurement using the mechanical profilometer has been conducted with an adjusted load on the diamond stylus of 1 mN. The diamond stylus during the measurement process contacts the measured material and scratches along the surface. It has been stated that the stylus leaves ploughing traces on the surface if the hardness is too low. On the matrix material the traces were continuous on the sampling length. On the composite material the traces were none continuous, i.e. dotted. Roughness parameter S_a of matrix material measured by the contact method (0.073 μm) was about 2.63 times lower than parameter of composite material (0.20 μm), parameter S_p was about 2.7 times and S_v about 2.9 times lower than parameter of composite material. The reason for such differences is the dihedral surface of composites. The first plane (lower) creates a surface of matrix material and the second plane (upper) create polished peaks of alumina particles. Between both planes the measured distance is up to 2 μm . Roughness parameters of matrix material measured by non-contact method were higher (5.9x - S_a ; 12.8x - S_p ; 26x - S_v) than measured by contact method. The reason for such significant differences is the ability of aluminium to oxidize. A thin oxide film absorbs part of the light beam and gives the wrong results.

Keywords: composite, roughness, measuring methods, measuring errors

WSTĘP

Chropowatość powierzchni wywiera decydujący wpływ na właściwości użytkowe części maszyn. Jest jedną z najistotniejszych i zazwyczaj najłatwiej mierzalnych

cech warstw powierzchniowych. Podczas pomiaru chropowatości powierzchni różnych materiałów metodą stykową z wykorzystaniem diamentowego stożka, szcze-

gólnie materiałów strukturalnie niejednorodnych, jakimi są kompozyty na osnowie metali lekkich i polimerów lub powłok metalicznych modyfikowane cząstkami miękkimi, np. PTFE, można popełnić istotne błędy wynikające z budowy materiałów i samej techniki pomiarów. Podczas badania chropowatości ww. materiałów należy uwzględnić dużą różnicę twardości osnowy (np. polimer PE - 66 Shore D lub stop glinu 40÷80 HB) i fazy zbrojącej (np. cząstki Al_2O_3 - HV = 2600÷2700 MPa lub SiC - HV = 2600 MPa). Podobne problemy występują podczas pomiaru chropowatości kompozytowych powłok na osnowie twardych metali zawierających miękkie cząstki, np. PTFE (powłoka chemiczna Ni - 1200 HV, PTFE - 50-60 Shore D). Na podstawie analizy dostępnej literatury z zakresu materiałów kompozytowych [1, 2] można sformułować wniosek, że Autorzy nie uwzględniają (lub nie wynika to z treści artykułu) wpływu oddziaływania ostrza igły diamentowej na otrzymywane wyniki pomiaru chropowatości powierzchni materiałów kompozytowych metodą stykową. Krótką wzmiankę na ten temat można znaleźć w pracy [3]. Takie podejście jest uzasadnione podczas badań materiałów o homogenicznej strukturze. Jeżeli twardość materiału osnowy jest znacząco różna od twardości materiału fazy zbrojącej, to należy sprawdzić, jaki jest wpływ nacisku ostrza profilografometru na uzyskane wyniki pomiarów.

Problem wynikający z różnicy twardości składników kompozytu pojawia się przy określaniu zużycia liniowego metodą profilografowania z wykorzystaniem bazy niepracującej. Wyniki uzyskane z przeprowadzonych w niewłaściwy sposób pomiarów na materiałach z bardziej miękką osnową mogą odbiegać od faktycznego zużycia.

Istotą pomiaru chropowatości metodą stykową jest przemieszczanie diamentowego ostrza po badanej powierzchni. Ostrze to wywiera określony nacisk na badaną powierzchnię. Jeżeli naciski ostrza są większe niż naciski dopuszczalne materiału, to dochodzi do jego plastycznych deformacji. Pomimo niewielkich sił nacisku (ok. 1 mN), podczas wykonywania pomiarów chropowatości materiałów miękkich metodą stykową, igła odkształca plastycznie badany materiał i pozostawia widoczny ślad (rys. 3). Głębokość śladu rośnie proporcjonalnie do spadku twardości badanego materiału. Ślady na kompozycie z osnową EN-AC-4200 (twardość 75 HB) były płytsze niż na kompozycie z osnową EN-AW-6061 (twardość 40 HB).

W przedłożonym artykule został opisany wpływ śladów ostrza igły pomiarowej pozostawionych w badanym materiale na wartości parametrów chropowatości powierzchni o niehomogenicznym rozkładzie twardości, jakim charakteryzują się materiały kompozytowe.

WADY I ZALETY METOD POMIARU CHROPOWATOŚCI KOMPOZYTÓW

W zależności od użytej metody pomiarowej błędy pomiarów chropowatości powierzchni materiałów kom-

pozytowych, wynikające z różnicy twardości osnowy i fazy zbrojącej, mogą być różne. Posługując się metodami stykowymi, należy pamiętać o tym, że mają one zarówno zalety, jak i wady.

Do zalet zaliczamy:

- pełne odzwierciedlenie mierzonej powierzchni - brak punktów niezmiernych - igła pomiarowa odzwierciedla fizycznie powierzchnię, jej wymiar determinuje szczegółowość penetracji powierzchni; prędkość pomiarowa - musi być tak dobrana, aby końcówka nie pomijała części składowych powierzchni;
- brak wpływu charakterystyki optycznej badanej powierzchni na wynik pomiaru, niezależnie od współczynnika odbicia oraz przenikalności mierzonej powierzchni zebrane punkty pomiarowe odzwierciedlają jej geometrię;
- dobra penetracja badanej powierzchni (igła o kącie 90° , można stosować 60° , a nawet 35°);
- duża gęstość próbkowania - nowe systemy stykowe pozwalają na wczesną digitalizację sygnału pomiarowego z określonym krokiem w osi X, obecnie uzyskuje się krok od 0,1 μm .

Do wad zaliczamy:

- niszczący wpływ igły pomiarowej na badaną powierzchnię - pomimo niewielkiej siły nacisku (ok. 1 mN) powoduje odkształcenie plastyczne badanej powierzchni, zależne od twardości materiału;
- duży poziom szumów własnych urządzenia generowanych przez układ mechaniczny prowadzenia igły pomiarowej ($Rq = 10\div30$ nm - standardowe urządzenia laboratoryjne, $Rq = 1$ nm - urządzenia specjalne);
- długi czas pomiaru - dla prawdziwego odzwierciedlenia mierzonej powierzchni (profil 3D) igła pomiarowa musi się przesuwać po niej z odpowiednią prędkością (0,1 do 2 mm/s), przy za dużych prędkościach powierzchnia nie będzie właściwie penetrowana, a igła może wpaść w drgania;
- brak możliwości pomiarów materiałów o bardzo małej twardości - igła pomiarowa bruzduje materiał w stopniu zależnym od jego właściwości fizycznych;
- możliwa reakcja fizykochemiczna pomiędzy materiałem igły i materiałem badanym, np. „zasysanie” siłami międzyatomowymi.

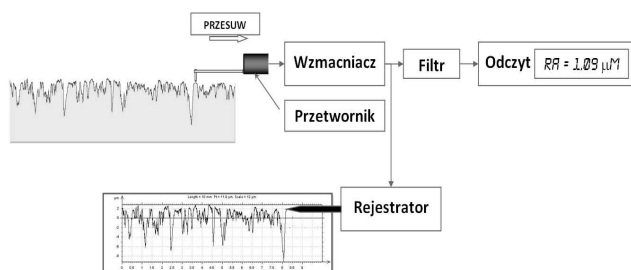
Metody bezstykowe też mają swoje zalety i wady. Do zalet zaliczamy:

- brak oddziaływania na badaną powierzchnię - podczas pomiaru nie następuje jakikolwiek kontakt fizyczny narzędzia z powierzchnią;
- niskie szumy własne od $Rq = 0,02$ nm dzięki ograniczeniu stosowania napędów mechanicznych (np. w interferometrii szerokopasmowej);
- duża szybkość pomiaru - możliwy jednoczesny pomiar dużej ilości punktów nawet do 1 000 000 w pojedynczym pomiarze;
- wysoka rozdzielczość w osi Z - od 10 pm przy szerokopasmowej interferometrii skaningowej.

Pomiar chropowatości powierzchni metodą bezstykową wykazuje następujące wady:

- duży wpływ właściwości optycznych badanej powierzchni na wynik pomiaru - metoda pomiaru wykorzystuje fale światła - przy całkowitym pochłanianiu lub rozproszeniu światła powierzchnia pomiarowa jest niemierzalna;
- występowanie punktów niezmiierzonych - brak ciągłości pomiaru przy częściowym rozproszeniu lub pochłonięciu światła, niektóre punkty z mierzonej powierzchni nie zostają zmierzone, lecz uzupełnione przez oprogramowanie analityczne;
- słaba penetracja badanej powierzchni (kąt „igły optycznej” 120°), możliwy pomiar zboczy o pochyleniu maksymalnie 30° , większe pochylenia nie zostają zmierzone, problemy przy pomiarach powierzchni porowatych (np. ceramika) oraz charakteryzujących się pikami o ostrych zboczach (np. kompozyty z włóknami);
- fałszywe wyniki przy pomiarach na ostrych krawędziach - częstym błędem metody pomiarowej jest częściowe rozproszenie oraz nałożenie się składowej odbitego światła z „niższego” poziomu, co skutkuje fałszywym odczytem w osi Z;
- mała rozdzielczość w płaszczyźnie X/Y - natura fal świetlnych ogranicza rozdzielczość metod optycznych do minimum $0,36 \mu\text{m}$.

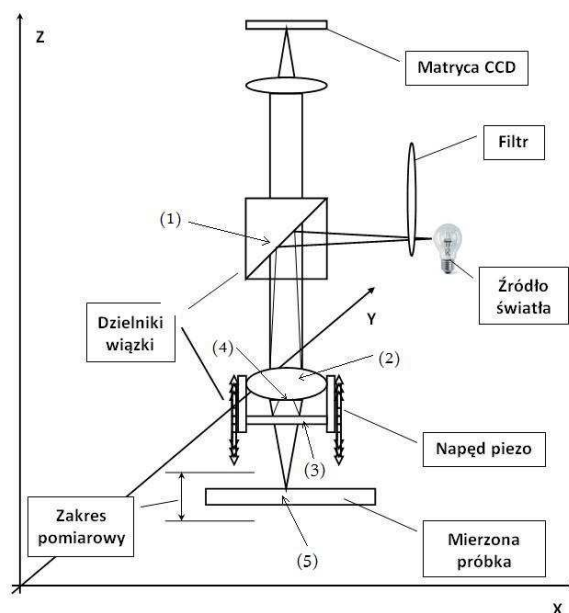
Na rysunku 1 przedstawiono zasadę tworzenia profilu 2D badanej powierzchni. Ramię pomiarowe zakończone igłą diamentową o promieniu zaokrąglenia $2 \mu\text{m}$, dociskaną siłą 1 mN , przesuwa się po mierzonej powierzchni. Zmiany położenia igły w osi pionowej (Z), wywołane strukturą powierzchni, są przetwarzane na sygnał elektryczny, następnie wzmacniane, filtrowane i obrabiane. Pozycjonowanie w osi poziomej (X) odbywa się w oparciu o liniał inkrementalny. Jeżeli siła nacisku igły jest niewłaściwie dobrana do twardości materiału, to powstają bruzdy na elementach struktury o zbyt małej twardości.



Rys. 1. Zasada pomiaru chropowatości powierzchni metodą stykową
Fig. 1. Principle of surface roughness measuring using contact method

Profilografometry bezstykowe (rys. 2) wykorzystują szerokopasmową interferometrię skaningową. Głowica pomiarowa urządzenia jest sprzężona z napędem wysokiej precyzji, który realizuje ruch w osi Z. Wyniki pomiarowe są rejestrowane przez kamerę CCD i przetwa-

rzane w oprogramowaniu analitycznym. W rezultacie otrzymuje się strukturę geometryczną powierzchni o ultrawysokiej rozdzielczości wertykalnej - 10 pm - niezależnej od stosowanego powiększenia.



Rys. 2. Zasada pomiaru chropowatości powierzchni metodą bezstykową
Fig. 2. Principle of surface roughness measuring using noncontact method

Górny dzielnik wiązki (1 - rys. 2) kieruje strumień światła z jego źródła w kierunku soczewek obiektywu (2). Dolne półprzezroczyste zwierciadło (3) dzieli padający strumień na dwa, tj. strumień odniesienia i pomiarowy. Każdy z nich wędruje oddzielną drogą optyczną, jeden na powierzchnię odniesienia (4) na spodzie soczewki obiektywu (2), drugi na powierzchnię mierzoną (5). Jeżeli obie drogi - pomiarowa i bazowa - są tej samej długości, to powstaje interferencja odczytywana przez matrycę CCD jako prążki interferencyjne. W urządzeniu wykorzystuje się światło polichromatyczne, co ułatwia wyznaczenie maksimum interferencji. Wszystkie długości fal interferują na tej samej odległości. Tylko wtedy informacja jest zapisywana w matrycy CCD. Przez przesuwanie pionowe obiektywu soczewki można dokładnie wyznaczyć punkt maksymalnej interferencji dla każdego z 1 miliona pikseli matrycy CCD. Poprzez śledzenie pozycji obiektywu soczewki podczas tego procesu zostaje utworzony trójwymiarowy obraz mierzonej powierzchni.

WPŁYW METODY POMIARU CHROPOWATOŚCI NA WYNIKI POMIARÓW

W celu określenia wpływu metody i warunków pomiaru chropowatości materiałów kompozytowych na uzyskiwane wyniki wykonano badania dwóch materiałów o różnej twardości, tj.:

- stopu do przeróbki plastycznej EN AW-6061 (AlMg2Si - twardość 39 HB, T0)
- kompozytu W6D.22A wytworzonego na podstawie stopu 6061 - twardość 59 HB, T0).

Fazą zbrojącą w badanym kompozycie są cząstki tlenku glinu. Obydwa materiały znajdują zastosowanie w budowie pojazdów samochodowych, np. do wytwarzania elementów karoserii, przewodnic rozsuwanych dachów (EN AW-6061) oraz wałków napędowych samochodów osobowych (W6D22A).

WARUNKI I PRZEBIEG POMIARÓW

Pomiary chropowatości metodą stykową wykonano za pomocą profilografometru Form Talysurf Taylor Hobson. Jest to urządzenie klasy laboratoryjnej z bazą wewnętrzną - głowica pomiarowa bez ślizgacza o rozdzielczości w osi Z od 0,6 nm. Na urządzeniu przed pomiarami ustawiono siłę docisku 1 mN, zgodnie z zaleceniami producenta. Wpływ siły nacisku sprawdzono w osobnych badaniach [4].

W ramach badań wykonano serie pomiarów 2D i 3D metodą stykową na długości 5 mm równoległych do siebie w odstępach $>10 \mu\text{m}$ (promień ostrza diamentowego $r = 2,5 \mu\text{m}$). Odległość pomiędzy poszczególnymi pomiarami 2D musi być dostatecznie duża, żeby rysy nie zachodziły na siebie. Pomiary powtórzono 5 razy dla celów statystycznych. Wyniki zestawiono w tabelach 1 i 2.

TABELA 1. Parametry chropowatości stopu EN-AW 6061
TABLE 1. Roughness parameters of EN-AW 6061 alloy

Profilometr Parametr	Stykowy	Bezstykowy
$S_a, \mu\text{m}$	0,076	0,45
$S_p, \mu\text{m}$	0,624	8,0
$S_v, \mu\text{m}$	1,01	26,1

TABELA 2. Parametry chropowatości kompozytu W6D.22A
TABLE 2. Roughness parameters of W6D.22A composite

Profilometr Parametr	Stykowy	Bezstykowy po stykowym	Bezstykowy
$S_a, \mu\text{m}$	0,20	2,04	0,77
$S_p, \mu\text{m}$	1,68	19,7	4,79
$S_v, \mu\text{m}$	2,99	19,6	6,54

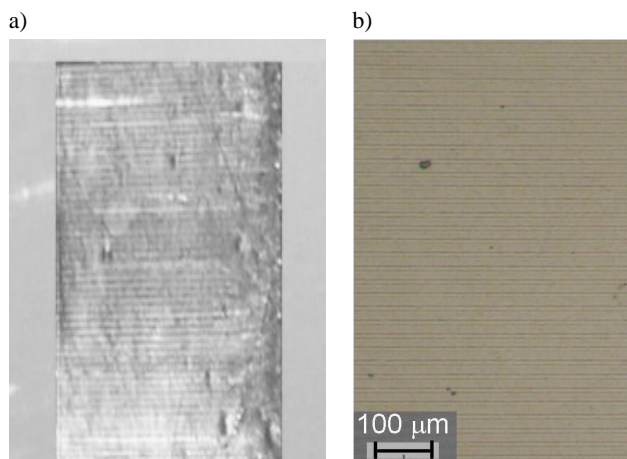
Pomiary metodą bezstykową przeprowadzono na profilografometrze optycznym FRT w miejscach, w których wykonano uprzednio pomiary metodą stykową oraz w miejscach nienaruszonych przez igłę profilografometru. Pierwsza seria pomiarów miała na celu określenie wpływu nacisku igły na deformację materiału osnowy, a tym samym na wynik pomiaru chropowatości. Celem drugiej serii było porównanie wyników pomiarów wykonanych metodami bezstykową i stykową.

WYNIKI POMIARÓW

Wyniki pomiarów chropowatości uzyskane obydwoma metodami zostały zapisane w postaci plików cyfrowych, które obrabiano za pomocą odpowiedniego oprogramowania. W ramach przeprowadzonych badań określono podstawowe parametry stereometryczne wysokości profilu (S_a, S_p, S_v) oraz wykonano rzuty aksonometryczne profilu 3D w celu pokazania różnicy poziomów płaszczyzny powierzchni osnowy i powierzchni styku z żeliwem. Wyniki zamieszczono na rysunkach 6-8.

Z powierzchni, na których mierzono chropowatość 2D i 3D metodą stykową, wykonano fotografie makro- i mikroskopowe. Wyniki zamieszczono na rysunkach 3-5.

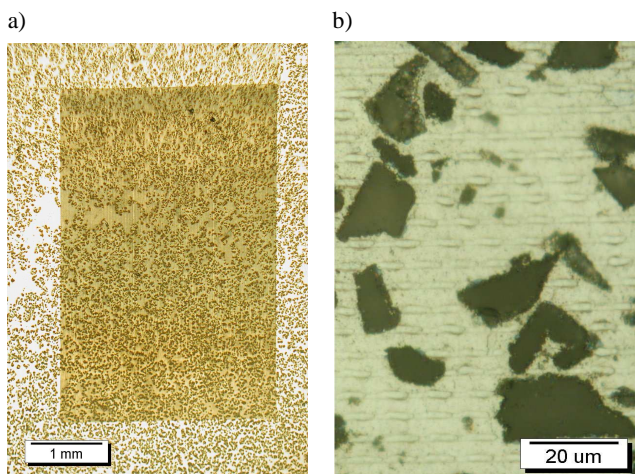
Podczas badań stwierdzono, że ślady pozostawione przez igłę na materiale kompozytowym, poddanym obróbce skrawaniem i szlifowaniem precyzyjnym, są praktycznie niewidoczne i trudne do sfotografowania ze względu na pochłanianie światła przez tlenek aluminium (zarówno z fazy zbrojącej, jak i naturalną warstwę tlenku powstałego w wyniku reakcji z tlenem z powietrza, rys. 5). Dlatego do pomiarów chropowatości przygotowano próbki, na których wykonano zglądy metalograficzne. Dopiero na tak przygotowanych powierzchniach można było zaobserwować i sfotografować ślady pozostawione przez igłę (rys. rys. 3, 4). Prawdopodobnie jest to przyczyną nieuwzględniania wpływu deformacji materiału osnowy przez igłę profilografometru stykowego przez wykonujących pomiary chropowatości kompozytów na osnowie stopów aluminium.



Rys. 3. Widok powierzchni zglądu materiału osnowy po pomiarze chropowatości metodą stykową: widoczne ślady po pomiarze 3D (a) i cieniutkie prążki bruzdowania igłą (b)

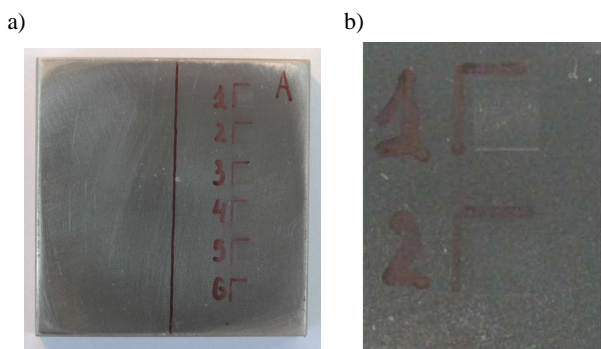
Fig. 3. Surface view of matrix material cross-section after roughness measuring using contact methods: ploughing traces made by stylus during 3D measuring (a) and narrow stylus ploughing lines (b) are visible

Dla porównania wykonano pomiary chropowatości i sfotografowano ślady igły na materiale osnowy. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że igła profilografometru pozostawia ciągłe bruzdy w samym stopie, a w kompozycie bruzdy pojawiają się tylko w materiale osnowy.



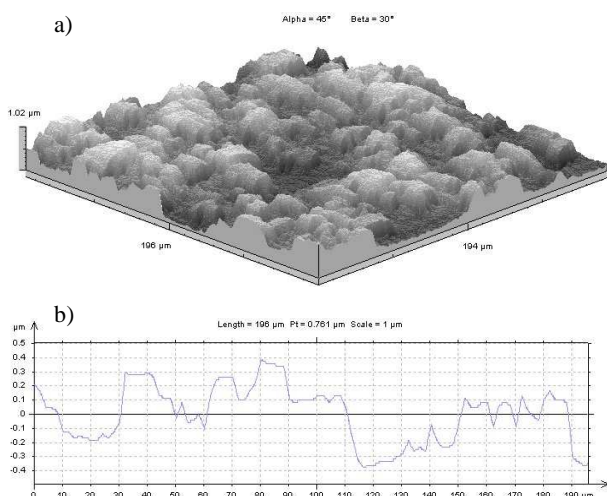
Rys. 4. Widok powierzchni zglądu kompozytu W6D.22A po pomiarach chropowatości metodą stykową (widoczne odkształcenia plastyczne materiału osnowy: cieniutkie prążki na rys. a i pojedyncze zglębienia na rys. b)

Fig. 4. Surface view of composite material (W6D.22A) crosssection after roughness measuring using contact profilometer (plastic deformation traces on matrix as narrow lines in fig. a and as single pits in fig. b)



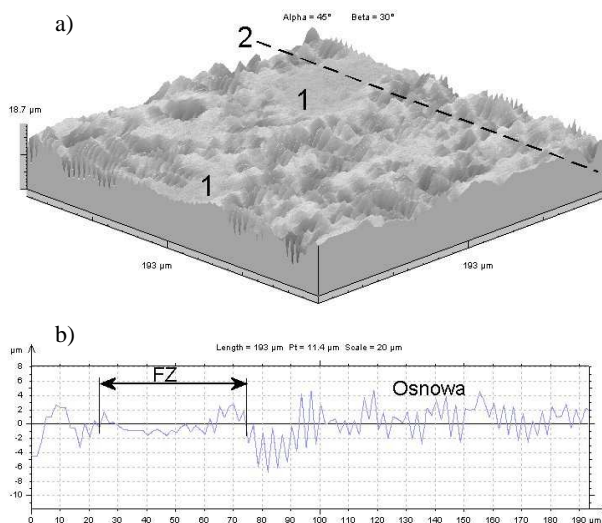
Rys. 5. Widok powierzchni szlifowanej kompozytu W6D.22A po pomiarach chropowatości (a) i powiększenie śladów igły (b)

Fig. 5. Surface view of polished composite material W6D.22A after roughness measuring using contact profilometer (a) and magnified stylus traces (b)



Rys. 6. Wykonany metodą bezstykową profil 3D (a) i 2D (b) chropowatości powierzchni szlifowanego kompozytu W6D.22A

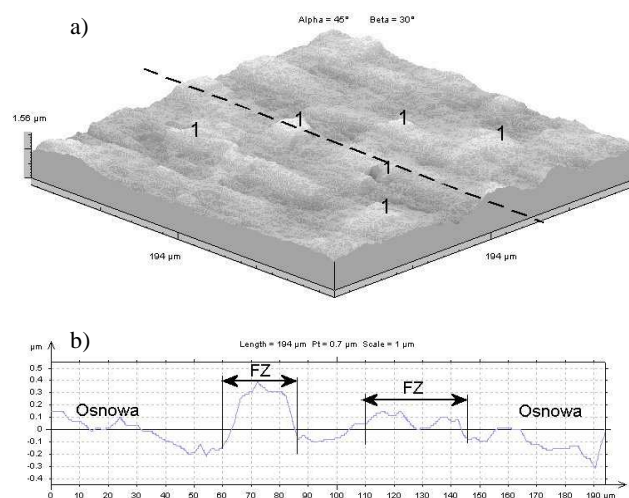
Fig. 6. The 3D (a) and 2D (b) roughness profile of grinded W6D.22A composite surface made by non-contact methods



Rys. 7. Wykonany metodą bezstykową profil 3D (a) i 2D (b) chropowatości powierzchni polerowanego kompozytu W6D.22A w miejscu wykonania pomiarów metodą stykową (1- Al₂O₃, 2 - miejsce wykonania profilu 2D)

Fig. 7. The 3D (a) and 2D (b) roughness profile of polished W6D.22A composite made by non-contact methods on the stylus traces (1- Al₂O₃, 2 - profile 2D)

Całkowita długość bruzd w stopie 6061 jest równa długości odcinka pomiarowego (rys. 3), natomiast w kompozycie zależy od udziału powierzchniowego cząstek fazy zbrojącej [4].



Rys. 8. Wykonany metodą stykową profil 3D (a) i 2D (b) chropowatości powierzchni polerowanego kompozytu W6D.22A (1 - cząstki fazy zbrojącej, linia przerywana - miejsce wykonania profilu 2D)

Fig. 8. 3D (a) and 2D (b) roughness profile of polished W6D.22A composite made by stylus method (1 - reinforcing phase particles, dotted line - place where the 2D profile has been made)

OMÓWIENIE WYNIKÓW I WNIOSKI

Wyniki przeprowadzonych badań profilografometrycznych z wykorzystaniem urządzeń stykowych (z diamentową igłą) i bezstykowych (metoda konfokalna) oraz badań mikroskopowych wykazały, że podczas pomiaru metodą stykową igła diamentowa odkształca ma-

teriał osnowy. Sposób i skala deformacji zależą od wartości siły nacisku igły na badany materiał. Siłę nacisku igły należy dobrać do twardości badanych materiałów. Podczas badania materiałów strukturalnie niejednorodnych, jakimi są kompozyty na osnowie stopów aluminium zawierające tlenek glinu jako fazę zbrojącą, uzyskuje się wyniki obarczone błędem, którego wartość zależy od różnicy twardości materiału osnowy i fazy zbrojącej oraz od siły nacisku.

Wyznaczone metodą stykową średnie arytmetyczne odchylenie profili (S_a) dla badanych próbek, na których wykonano w identycznych warunkach zgłady metalograficzne, jest około 2,63 razy mniejsze dla materiału osnowy (0,076 μm) niż dla kompozytu (0,20 μm). Maksymalna wysokość wzniesień profilu (S_p) materiału osnowy (0,624 μm) jest również około 2,7 razy mniejsza niż kompozytu (1,68 μm). Maksymalna głębokość wgłębień profilu (S_v) dla osnowy (1,01 μm) jest około 2,9 razy mniejsza niż dla kompozytu (2,99 μm).

Przyczyną stwierdzonych rozbieżności wyników pomiarów jest różnica w budowie warstwy powierzchniowej osnowy i kompozytu. W kompozycie występuje dwupłaszczyznowość warstwy wierzchniej. Jedną płaszczyznę stanowi zbiór punktów będących sumą powierzchni zeszlifowanych (polerowanych) wierzchołków fazy zbrojącej, a drugą zbiór punktów powierzchni osnowy. Powierzchnia wierzchołków fazy zbrojącej (zaznaczone FZ na rys. 8b) może wystawać od ułamków mikrometra (0,4 μm ponad linię średnią na rys. 8b) nawet do 2 μm nad powierzchnię osnowy (osnowa, rys. 7b). Dlatego parametr S_a kompozytu jest 2,63 razy większy niż osnowy. Krotności parametrów S_p (2,7) i S_v (2,9) są nieco większe niż S_a , ponieważ przemieszczająca się po spolerowanych powierzchniach fazy zbrojącej igła diamentowa, spadając na powierzchnię miękkiej osnowy, wbija się głębiej niż przy pomiarze samej osnowy, dochodząc przy tym wspomnianych we wstępie wibracji.

Wyznaczony metodą bezstykową parametr (S_a) osnowy (0,45 μm) jest 5,9x większy niż wyznaczony metodą stykową (0,076 μm), Również parametry S_p i S_v są większe, a S_v nawet 25-krotnie. Nie jest to zgodne z danymi zawartymi w literaturze specjalistycznej [5]. Ustalenie przyczyn takich rozbieżności wyników uzyskanych obydwoma metodami pomiarowymi wymaga dalszych badań.

Przeprowadzone pomiary udowodniły, że różnice parametrów wysokościowych chropowatości zmierz-

nych porównywanymi metodami na polerowanym kompozycie są znacznie mniejsze - S_a ok. 3,8x, S_p ok. 2,8x i S_v ok. 2,2x.

Analiza wyników pomiarów chropowatości kompozytu w miejscu po wykonanym pomiarze stykowym wykazuje, że nastąpiło znaczące pogorszenie chropowatości zmierzonej metodą bezstykową. Parametr S_a w miejscu pomiaru stykowego (2,04 μm) jest około 2,65 razy większy niż w miejscu nienaruszonym przez igłę profilografometru stykowego (0,77 μm). Natomiast parametr S_p w miejscu pomiaru stykowego (19,7 μm) jest ok. 4,1 razy większa niż w miejscu nienaruszonym przez igłę profilografometru (4,79 μm). Również maksymalna głębokość wgłębień (S_v) w miejscu pomiaru stykowego (19,6 μm) jest ok. 3 razy większa niż w miejscu nienaruszonym przez igłę profilografometru (6,54 μm). Przyczyną zwiększenia wysokościowych parametrów chropowatości są deformacje plastyczne, tj. bruzdowanie polegające na robieniu rys i wypychaniu części materiału powyżej polerowanej powierzchni.

Wyniki z przeprowadzonych badań pozwalają sformułować następujące wnioski:

1. Pomiar chropowatości kompozytu na osnowie miękkiego stopu aluminium (6061) metodą stykową powoduje deformacje badanej powierzchni osnowy, w wyniku czego uzyskuje się zawyżone wartości chropowatości (nawet do 300%).
2. Wyniki pomiarów chropowatości materiałów kompozytowych stosowanymi obecnie urządzeniami mechanicznym i optycznym nie są porównywalne, dlatego należy opracować inną metodę, która pozwoli zmniejszyć rozbieżności uzyskiwanych wyników.

LITERATURA

- [1] Napłocha K., Samsonowicz Z., Właściwości tribologiczne materiałów kompozytowych na osnowie stopu AK9 umacnianych włóknami ceramicznymi „Saffil”, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, Poznań 1998, 18, 233-242.
- [2] Trzaska M., Kucharska B., Właściwości powierzchniowych warstw kompozytowych Ni/PTFE, *Kompozyty (Composites)* 2009, 9, 4, 363-368.
- [3] Bhushan B., *Introduction to Tribology*, John Wiley & Sons, New York 2002.
- [4] Posmyk A., *Materiały kompozytowe w budowie pojazdów, Badania Katedralne KEPS Polit. Śl., Katowice* 2010.
- [5] Whitehouse D.J., *Handbook of Surface Metrology*, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia 1994.