

Rafał REIZER
Uniwersytet Rzeszowski
Paweł PAWLUS
Politechnika Rzeszowska

PRZEGLĄD METOD MODELOWANIA STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI

W artykule przedstawiono dwa zasadnicze sposoby podejścia do modelowania struktury geometrycznej powierzchni. Pierwszym z nich jest modelowanie nieuwzględniające warunków technologicznego lub eksploatacyjnego kształtowania powierzchni, natomiast drugim modelowanie odzwierciedlające rzeczywiste warunki tworzenia powierzchni. Przedstawiono wyniki własnych badań na tle osiągnięć innych badaczy.

1. Wstęp

Modelowanie struktury geometrycznej powierzchni jest dziedziną inżynierii powierzchni o dużej perspektywie rozwoju. Obecnie modelowanie znajduje się nadal w fazie badań, a różnorodność i złożoność struktury geometrycznej powierzchni (SGP) to poważne utrudnienia szerokiego zastosowania modelowania w praktyce. Procedury modelowania stają się narzędziem do przewidywania skutków działań zamierzonych i zakłóceń losowych. Zastosowanie symulacji komputerowej i współczesnych technik obliczeniowych umożliwia stosowanie modeli coraz bardziej zbliżonych do rzeczywistej SGP.

Można wyodrębnić dwa zasadnicze sposoby podejścia do modelowania SGP. Pierwszym z nich jest modelowanie nieuwzględniające warunków technologicznego lub eksploatacyjnego kształtowania powierzchni. Stosowanie takiego modelowania może zapewnić bardzo dobre przybliżenie powierzchni modelowanych do powierzchni rzeczywistych. Sposób ten zapewnia również możliwości generowania powierzchni o specyficznych kształtach, trudnych do uzyskania w procesach obróbki, lecz przydatnych podczas eksploatacji skojarzeń materiałowych w określonych warunkach. Drugim sposobem jest modelowanie odzwierciedlające rzeczywiste warunki tworzenia powierzchni. Zapewnia możliwości analizowania wpływu warunków kształtowania technologicznego i eksploatacyjnego na strukturę geometryczną powierzchni elementów maszyn. Za-

zwyczaj przybliżenie powierzchni modelowych do rzeczywistych jest gorsze niż w metodzie pierwszej.

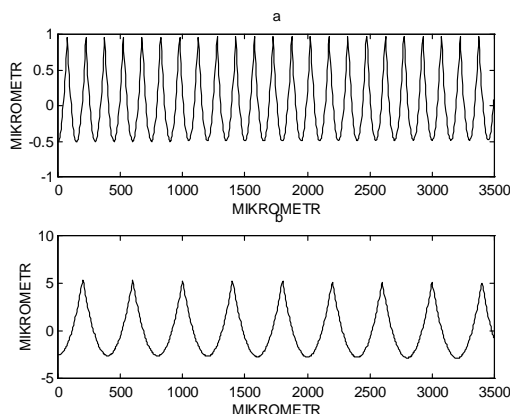
2. Modelowanie SGP powstającej w wyniku odwzorowania geometryczno-kinematycznego geometrii ostrza na przedmiocie obrabianym

Oba sposoby modelowania mogą się do siebie zbliżać, np. gdy pierwszy z nich uwzględnia powierzchnie otrzymane w określony sposób. Dotyczy to między innymi powierzchni powstającej w wyniku odwzorowania geometryczno-kinematycznego geometrii ostrza na przedmiocie obrabianym. Modele chropowatości powierzchni w procesie toczenia pojedynczym punktem zakładają wpływ posuwu i promienia zaokrąglenia noża. Najczęściej występującym profilem jest profil promieniowy, utworzony przez kolejne nałożenie okręgów o promieniu r_e (promień naroża ostrza) ze skokiem f_w (posuw wzdłużny).

Teoretyczną wysokość profilu zdeterminowanego określa się z zależności:

$$R = f_w^2 / 8r_e$$

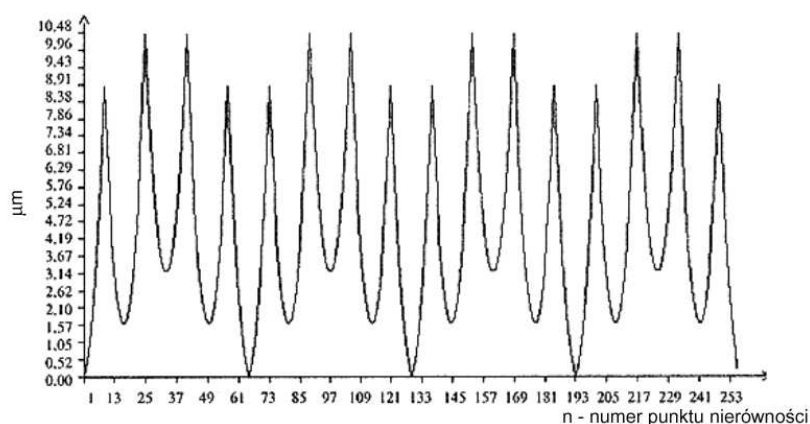
Rysunek 1. przedstawia teoretyczne profile promieniowe o różnych wartościach posuwu i promienia naroża ostrza.



Rys. 1. Teoretyczne profile promieniowe:
a) $f_w = 0.15$ mm, $r_e = 1.9$ mm, b) $f_w = 0.4$ mm, $r_e = 2.5$ mm [1]

Zazwyczaj modele uwzględniające tylko dwa czynniki, tzn. posuw oraz promień zaokrąglenia ostrza, nie są dokładne. Prace dotyczące modelowania chropowatości powierzchni toczonej były rozwijane w ostatnich latach [2-7]. Przykładowo Boryczko [3] zajmował się wpływem przemieszczeń narzędzia w stosunku do przedmiotu na kształt profilu toczonego. Generował komputerowo-

wo profile powierzchni toczonych, uwzględniając analizowane zakłócenia (rys. 2.).



Rys. 2. Model profilu po toczeniu, uwzględniający zakłócenia o małej częstotliwości

W pracy [8] symulowano topografię powierzchni po szybkościowym frezowaniu. Wykorzystano fakt zniekształcenia dokładności geometrycznej powierzchni przez drgania wywołane dużą prędkością wrzeciona. Powstał model pozwalający generować profile chropowatości powierzchni. Modelowaniem chropowatości powierzchni frezowanych zajmuje się Miko [9]. W modelu chropowatości powierzchni frezowanych walcowo uwzględnił: stereometryczno-kinematyczne odwzorowanie ostrzy frezu, nieusuwalną część nadatku obróbkowego, przemieszczenia względne frezu i materiału obrabianego, bicie promieniowe ostrzy frezu, zużycie ostrzy skrawających.

Wymienione dwa podejścia do modelowania różnią się od siebie w przypadku modelowania powierzchni losowych. Dlatego zostaną one omówione osobno.

3. Metody modelowania nieuwzględniające warunków kształtowania powierzchni

Jako pierwsze zostaną przedstawione metody nieuwzględniające warunków kształtowania powierzchni na drodze wytwarzania lub eksploatacji. Generowanie komputerowe powierzchni losowej wymaga informacji o jej cyfrowej charakterystyce. Metody modelowania profili można podzielić na: generowanie profili o normalnym rozkładzie rzędnych i generowanie profili o rozkładzie rzędnych różnym od normalnego. Pierwszą czynnością w obu przypadkach jest

zazwyczaj generowanie wysokości nierówności z generatora sygnałów pseudo-losowych.

Wcześniejsze prace opierały się na analizie szeregów czasowych (ARMA). Do opisu szeregów czasowych, w których operacje są zależne, stosowane są modele stochastyczne. Oparte są one na pomysłu, że szereg czasowy, w którym kolejne wartości są silnie zależne, można traktować jako szereg generowany przez ciąg niezależnych impulsów a_t (zwany białym szumem). W modelu autoregresji bieżąca wartość procesu jest wyrażona jako skończona kombinacja liniowa poprzednich wartości procesu i impulsu a_t . Gdy wartości \tilde{z}_t są odchyleniami procesu od jakiegoś punktu lub od swojej średniej μ ,

$$\tilde{z}_t = \phi_1 \tilde{z}_{t-1} + \phi_2 \tilde{z}_{t-2} + \dots + \phi_p \tilde{z}_{t-p} + a_t,$$

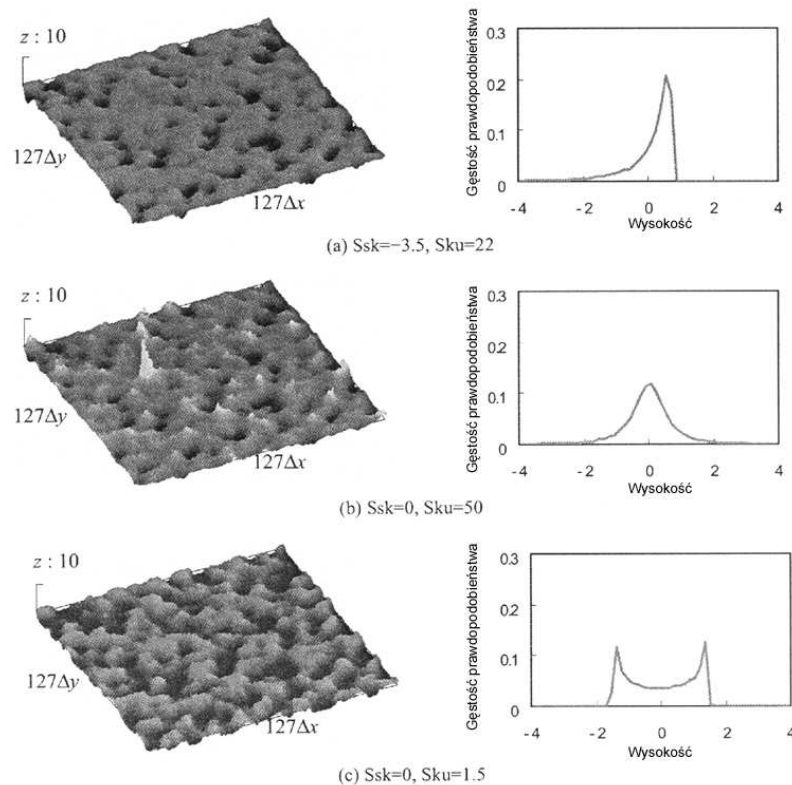
proces nazywa się procesem autoregresji rzędu p lub procesem AR(p). Proces autoregresji można traktować jako wyjście \tilde{z}_t filtru liniowego z funkcją przenoszenia $\phi^{-1}(B)$, w którym wejściem jest szum biały a_t [10].

Do analizy profili często stosowano metody szeregów czasowych, opisujące właściwości poziome profilu. Najczęściej stosuje się model AR. Whitehouse [11] podał zależności między parametrami modelu AR(2) a wartościami dwóch punktów funkcji autokorelacji. Autorzy pracy [12] analizowali zastosowanie modeli AR(1) i AR(2) do modelowania profili powierzchni losowych o normalnym i asymetrycznym rozkładzie rzędnych. Stwierdzono podobieństwo rozkładu rzędnych i kształtu profili rzeczywistych i symulowanych. Natomiast występowały różnice kształtu funkcji autokorelacji. Ci sami autorzy w pracy [13] zastosowali przekształcenie Johnsona do symulacji profili o innym rozkładzie rzędnych, przy danych wartościach parametrów R_{sk} i R_{ku} .

DeVries analizował aspekty modelowania AR profili powierzchni szlifowanych i toczonych [14]. Modele szeregów czasowych posłużyły do estymacji widmowej gęstości mocy, momentów spektralnych i wynikających z nich parametrów. Stwierdzono, że w celu szczegółowej analizy częstotliwościowej powinny być stosowane momenty rzędu większego niż 2. Stauffert [15] uważał, że model AR(4) jest odpowiedni tylko w zastosowaniu do symetrycznych profili losowych.

Numeryczna procedura generowania powierzchni w układzie 3D, na podstawie szeregów czasowych, została opisana w pracy [16]. Możliwe jest generowanie powierzchni izo- lub anizotropowych o normalnym rozkładzie rzędnych, przy założeniu funkcji autokorelacji w dwóch prostopadłych kierunkach. Zastosowano liniową transformatę macierzy losowych. Generowanie powierzchni o liniowym kształcie funkcji autokorelacji jest najprostsze, natomiast symulacja powierzchni o wykładniczym kształcie funkcji autokorelacji wymaga rozwiązania układu równań nieliniowych.

Gu i Huang [17] zastosowali metodę szeregów czasowych do modelowania powierzchni o rozkładzie rzędnych różnym od rozkładu normalnego. W pracach [18-20] zastosowano metodę AR do generowania komputerowego stereometrii powierzchni. Założono kształt funkcji autokorelacji w układzie 3D. Podobnie jak w większości prac do modelowania SGP o rozkładzie rzędnych różnym od normalnego (rys. 3.) zastosowano metodę translacyjną Johnsona wykorzystującą system Pearsona krzywych częstotliwościowych.

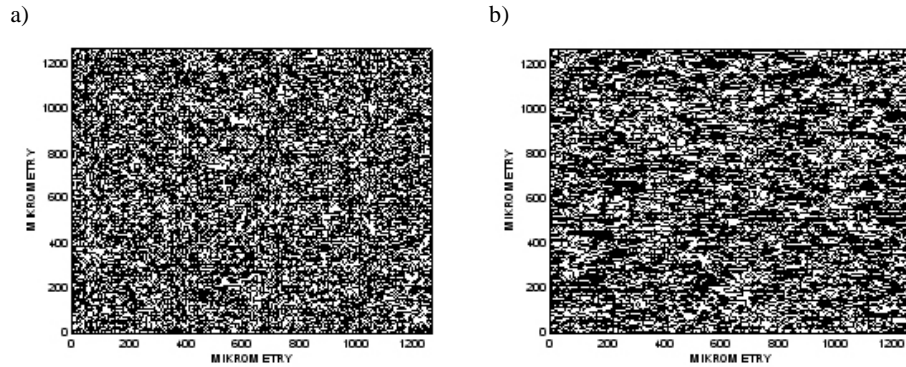


Rys. 3. Modelowane powierzchnie o różnych rozkładach rzędnych (na podstawie [19])

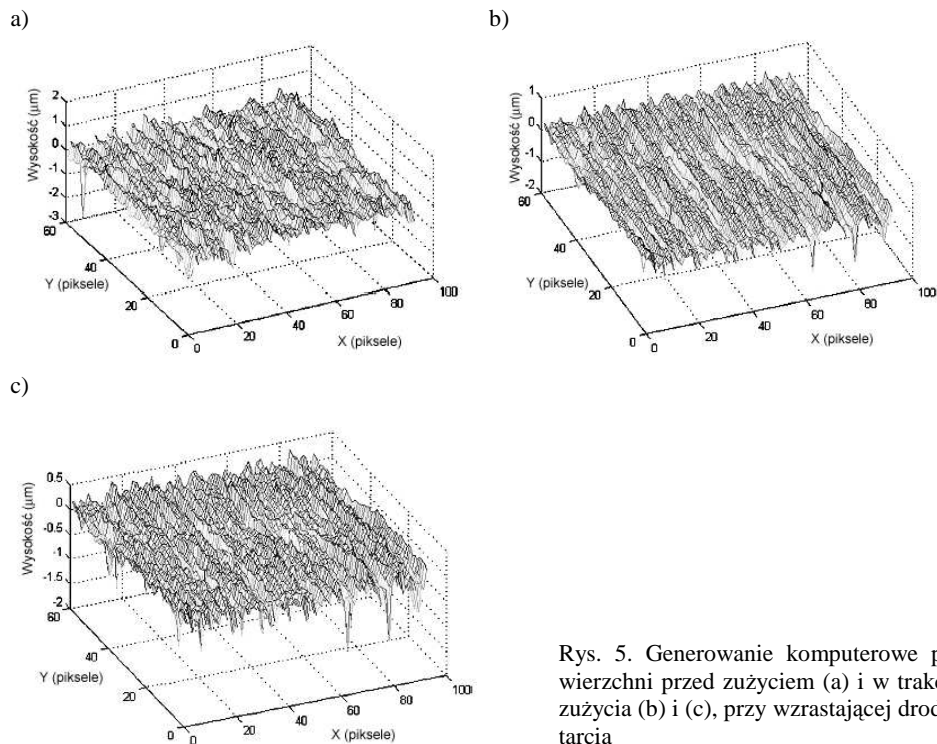
Metodę szeregów czasowych do modelowania SGP zastosowali również naukowcy z Politechniki Poznańskiej [21]. W większości przedstawionych prac zastosowano metody szeregów czasowych.

Alternatywą jest wykorzystanie szybkiej transformaty Fouriera. Możliwości generowania komputerowego powierzchni o różnym kształcie funkcji autokorelacji w dwóch prostopadłych kierunkach opisano w pracy [22]. Rysunek 4. przedstawia mapy konturowe powierzchni izotropowej oraz anizotropowej

o niewielkim stopniu anizotropii. Zastosowano dolnoprzepustowe filtry 2D o skończonej odpowiedzi impulsowej, zależnej od zadanej funkcji autokorelacji. W podobny sposób modelowano powierzchnię zużytą o rozkładzie rzędnych różnym od normalnego [23] – rys. 5.



Rys. 4. Mapa konturowa powierzchni izotropowej (a) i anizotropowej o normalnym rozkładzie rzędnych (b), [1]

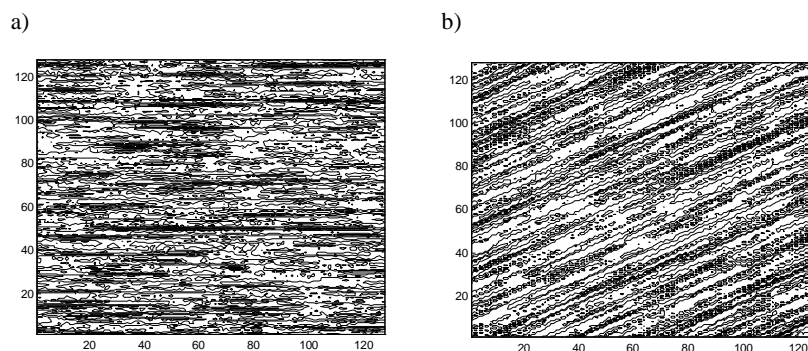


Rys. 5. Generowanie komputerowe powierzchni przed zużyciem (a) i w trakcie zużycia (b) i (c), przy wzrastającej drodze tarcia

Autorzy pracy [24] zastosowali modyfikację metody Patira [16]. Jest ona oparta na liniowej transformacji macierzy. W celu ułatwienia rozwiązania układów równań nieliniowych i zmniejszenia wymogów pamięci komputera, zastosowano metodę nieliniowego sprzężonego gradientu. Wyniki otrzymane z użyciem tej metody porównano z rezultatami stosowania metodyki Hu i Tondera [22], stwierdzając, że zaproponowana metoda zapewnia lepsze wyniki dotyczące parametrów wzdłużnych w przypadku ich większych wartości.

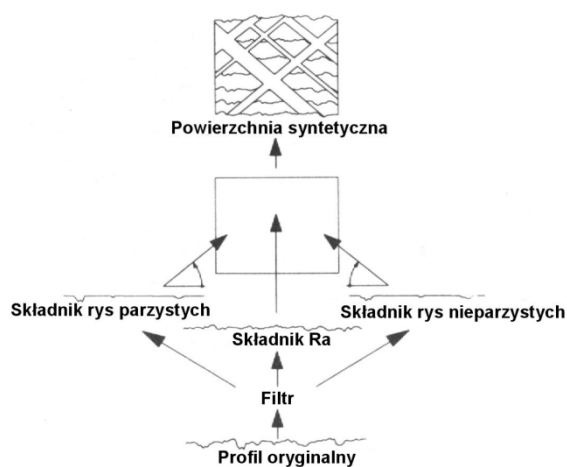
Uważa się, że stosowane metody ARMA niskich rzędów potrafią zachować cechy funkcji autokorelacji tylko blisko jej początku. Dlatego autor artykułu [25] również zastosował szybką transformatę Fouriera w celu generowania powierzchni 3D i profili 2D o znanej funkcji autokorelacji lub widmowej gęstości mocy. Punkty powierzchni symulowanej otrzymano na podstawie odwrotnej transformaty funkcji Fouriera, zależnej od zadanej widmowej gęstości mocy. Podobną metodę zastosował wcześniej Newland [26], pewne różnice dotyczyły postaci funkcji autokorelacji i widmowej gęstości mocy.

Metodykę generowania komputerowego arbitralnie zorientowanych powierzchni chropowatych o założonym rozkładzie rzędnych opisano w publikacji [27]. Jest rozwinięciem metody liniowej transformaty macierzy losowych zaproponowanej przez Patira. Stereometria powierzchni powstaje na podstawie założonej funkcji autokorelacji ustawionej w pewnym kierunku. Można też stosować inną metodę. W pierwszym etapie powstaje powierzchnia anizotropowa, tzw. jednokierunkowa, ukierunkowana zgodnie z układem współrzędnych. Następnie struktura taka zostaje obrócona o pewien kąt. Można w tym celu zastosować różne metody, np. obrót osi współrzędnych. Rysunek 6. przedstawia powierzchnię anizotropową oraz powierzchnię obróconą. Oczywiście, początkowy obszar próbkowania powierzchni jednokierunkowej powinien być większy od obszaru powierzchni obróconej. Taką metodykę zastosowali autorzy niniejszego opracowania [1, 28].



Rys. 6. Powierzchnia jednokierunkowa (a), obrócona o pewien kąt (b), [1]

W pracy [29] przedstawiono modelowanie stereometrii zorientowanej powierzchni cylindra. Opisano metodykę tworzenia syntetycznej powierzchni 3D po gładzeniu płaskowierzchołkowym na podstawie pomiaru profili osiowych. W odniesieniu do jednego z takich profili zastosowano filtr oddzielający część wgłębień od części wierzchołkowej (np. na poziomie linii średniej). Następnie doszło do podziału rys na 2 zbiory: co druga z nich zostaje tzw. rysą parzystą, a co druga nieparzystą. Profile z rysami parzystymi i nieparzystymi są przemieszczane po powierzchni pod kątem równym połowie kąta gładzenia α w jedną i drugą stronę. Powstaje więc powierzchnia charakteryzująca się wartością parametru R_a powierzchni nośnej, tzw. „pojemnością olejową”, i kątem gładzenia, czyli parametrami wpływającymi na właściwości eksploatacyjne powierzchni. Syntetyczna powierzchnia w układzie 3D może też powstać tylko na podstawie znajomości tych trzech parametrów (rys. 7.).

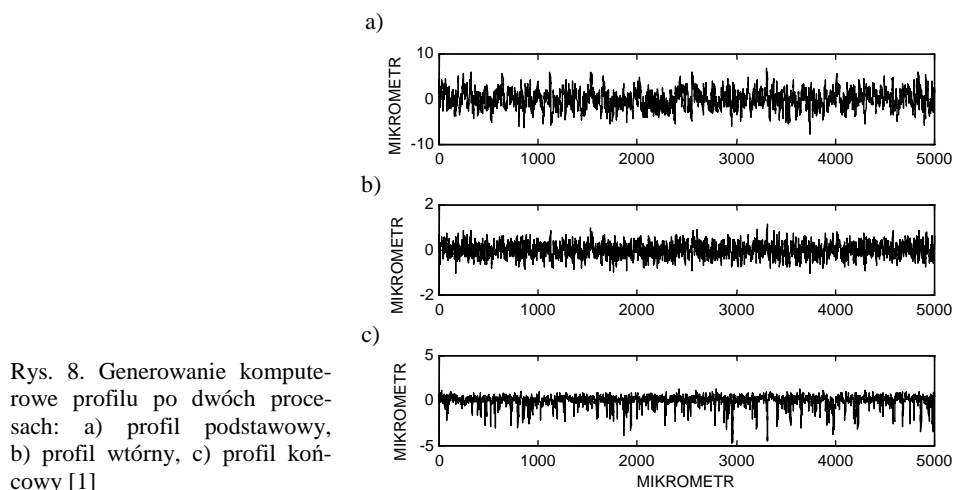


Rys. 7. Procedura syntezy powierzchni gładzonej w układzie 3D

Autorzy prac [30] zaproponowali metodykę generowania powierzchni cylindrów po gładzeniu. Generowanie komputerowe topografii powierzchni cylindrów o rozkładzie rzędnych Gaussa składa się z kilku etapów. W pierwszym z nich powstaje powierzchnia anizotropowa, tzw. jednokierunkowa. Następnie struktura taka zostaje obrócona o kąt ϕ , równy połowie kąta gładzenia. Następnie powierzchnię anizotropową powstałą na początku obraca się o kąt $180-\phi$. Kolejną czynnością jest nakładanie się dwóch zapamiętanych struktur. Metoda ta została zmodyfikowana w pracy Reizera [31].

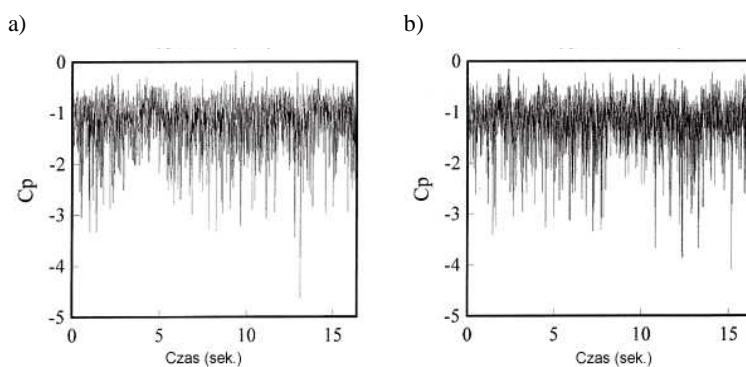
Do generowania SGP o rozkładzie rzędnych różnym od normalnego stosuje się zazwyczaj przekształcenie Johnsona. Możliwością modelowania struktury dwuprosowej jest nakładanie na siebie dwóch profili nierówności o normalnym rozkładzie rzędnych. Profile te (podstawowy i wtórny) są charakteryzowa-

ne odchyleniem standardowym wysokości nierówności P_q oraz parametrem wzdłużnym (rys. 8). Procedura polega na wyborze mniejszych rzędnych z tych dwóch rozkładów. Opiera się ona na normie ISO 13565-3 [32, 33]. Metodę tę zastosowano do modelowania SGP cylindrów po gładzeniu płaskowierzchłkowym [34].



Rys. 8. Generowanie komputerowe profilu po dwóch procesach: a) profil podstawowy, b) profil wtórny, c) profil końcowy [1]

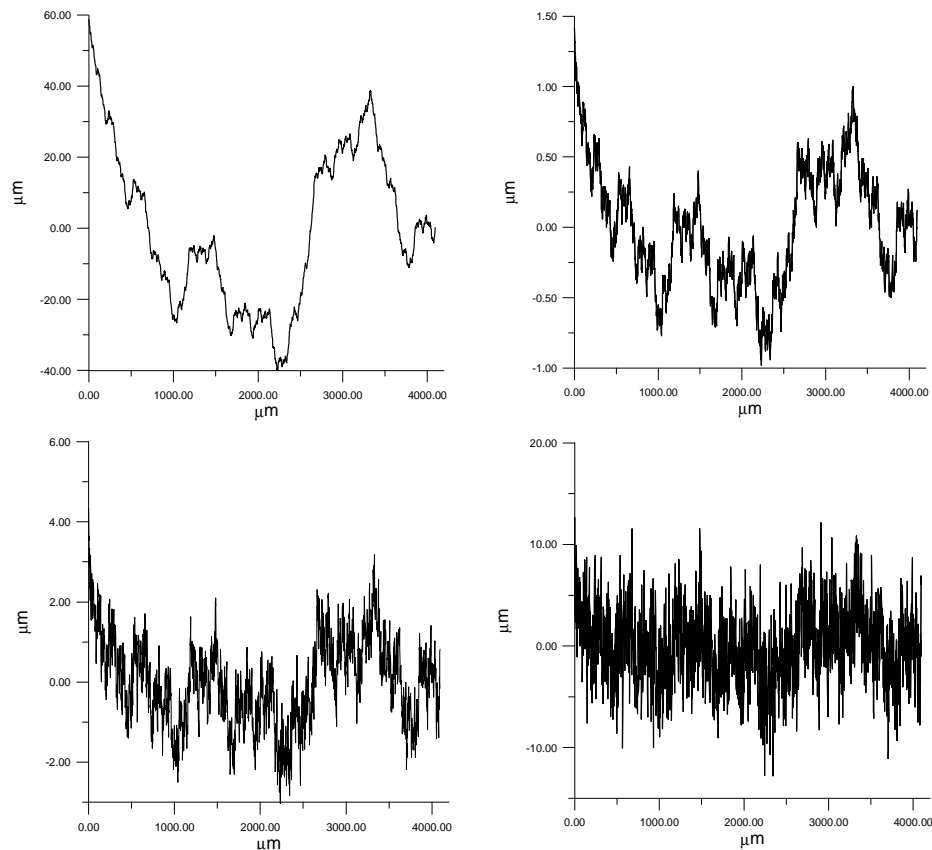
Modelowanie ciśnienia wiatru jest podobne do modelowania profili nierówności. Autorzy pracy [35] zastosowali szybką transformatę Fouriera do generowania sygnałów o rozkładzie rzędnych różnym od normalnego. Istnieje możliwość modelowania sygnału o zadanych wartościach parametrów R_q , R_{sk} i R_{ku} . Metody te nie uwzględniają jednakże symulacji funkcji autokorelacji. Można je zastosować do modelowania profili nierówności. Rysunek 9. przedstawia sygnał rzeczywisty i modelowany z wykorzystaniem metody opisanej w artykule [35].



Rys. 9. Sygnały: a) rzeczywisty, b) modelowany

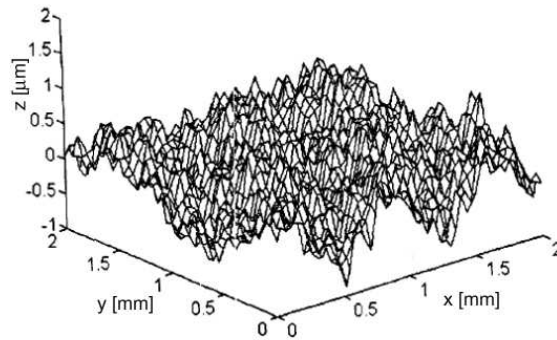
Wu zaproponował metodę symulacji powierzchni losowej o rozkładzie rzędnych różnym od normalnego, z wykorzystaniem szybkiej transformaty Fouriera [36]. Wykorzystano szybką transformatę Fouriera i system translacyjny Johnsona. Autorzy artykułu [37] symulowali rozkład rzędnych SGP różny od normalnego, z wykorzystaniem systemu krzywych częstotliwościowych Pearsona.

Podjęmowano próby generowania profili fraktalnych. W pracy [38] zastosowano funkcję W-M (Weierstrassa-Maldenbrotta). Oryginalną procedurę zastosowano w artykule [39] do symulowania niestacjonarnych profili za stacjonarnym przyrostem. Wykorzystano szybką transformatę Fouriera. Profile fraktalne były też generowane komputerowo w monografii [40]. Rysunek 10. przedstawia przykłady profili fraktalnych generowanych komputerowo.



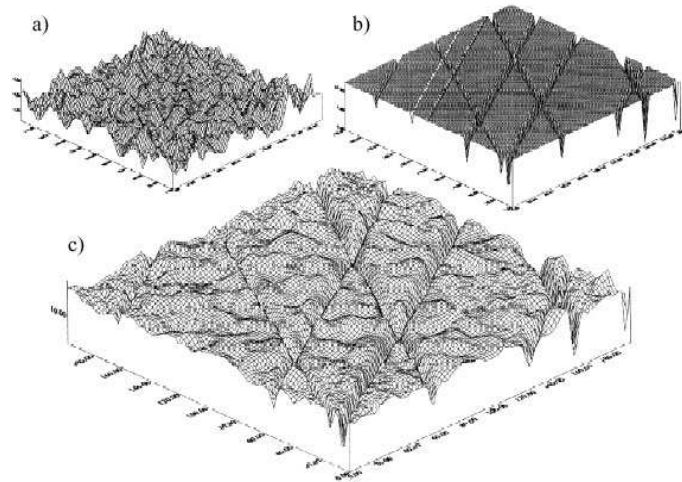
Rys. 10. Przykładowe profile fraktalne [1]

Poprzez transformację spektrum profili na spektrum powierzchni można generować komputerowo powierzchnie w układzie 3D przez uogólnienie funkcji W-M w kierunkach x i y [41]. W pracy [42] zasymulowano anizotropową powierzchnię w układzie 3D (rys. 11.).



Rys.11. Przykład modelowanej powierzchni fraktalnej

Możliwością generowania powierzchni cylindrów jest nakładanie składnika fraktalnego na głębokie rysy [43, 44], (rys. 12.). Autorem takiej koncepcji opublikowanej w pracy [44] był Jerzy Jabłoński. W podobny sposób (przez nakładanie struktury fraktalnej na tzw. strukturę podstawową) generowano topografie powierzchni po obróbce laserowej [45].

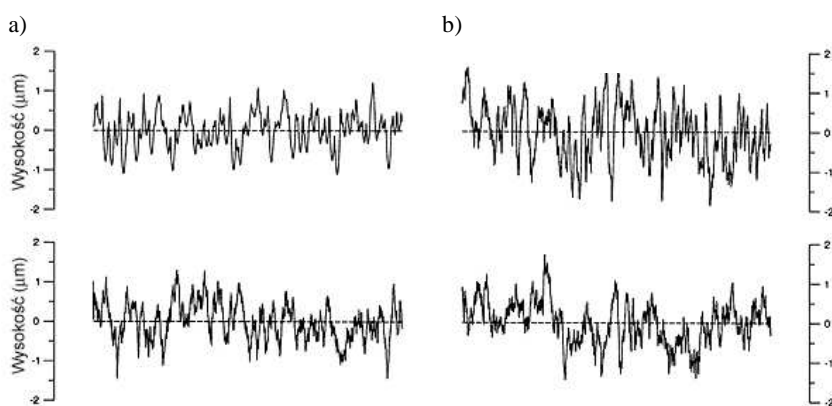


Rys. 12. Symulowana powierzchnia cylindra: a) powierzchnia fraktalna, b) generowana komputerowo powierzchnia gładzona, c) powierzchnia symulowana, będąca sumą powierzchni a i b

4. Metody modelowania odzwierciedlające rzeczywiste warunki tworzenia powierzchni

Przykładami drugiego podejścia jest modelowanie powierzchni obrobionej lub zużywanej. Modele powstawania powierzchni losowej podczas obróbki dotyczą głównie szlifowania.

Symulacja procesu obróbki zazwyczaj polega na komputerowym generowaniu ściernicy oraz analizy kinematycznej obróbki. Inną możliwością jest modelowanie oddziaływania rzeczywistej (mierzonej) powierzchni ściernicy na SGP szlifowanej. Można generować komputerowo profil nierówności, stereometrię powierzchni lub tylko niektóre z parametrów chropowatości (przede wszystkim amplitudowe). Modelowanie szlifowania ściernicą diamentową opisali Koshy i inni [46], (rys. 13.).

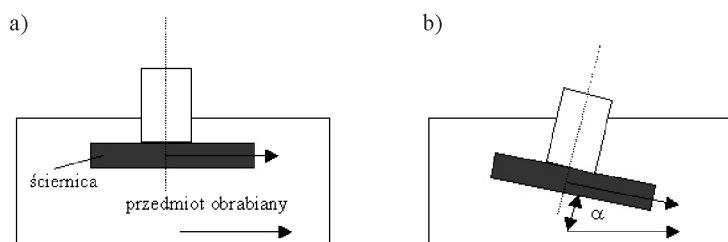


Rys.13. Porównanie profili powierzchni modelowanych i powierzchni mierzonych powstałych podczas szlifowania: a) profile symulowane, b) prawe profile mierzone

Autor pracy [47] prognozował profil poprzeczny i wzdłużny przedmiotu po obróbce szlifowaniem. Uwzględniono ugięcie ziaren ściernych. Autor publikacji [48] do prognozowania SGP powierzchni szlifowanych płaszczyzn zastosował metodę obwiedniową. Autorzy artykułu [49] modelowali proces szlifowania na podstawie pomiaru powierzchni ściernicy. Uwzględnienie warunków obróbki prowadziło do symulacji skrawania ziarnami ściernymi. Inasaki [50] zastosował własną procedurę wyodrębniania krawędzi tnących. W modelu założono tylko występowanie mikroskrawania. Czynniki wyjściowymi modelu jest chropowatość oraz siła szlifowania. Autorzy prac [51-54] symulowali proces mikroskrawania każdego ziarna ściernego generowanej komputerowo powierzchni ściernicy. W celu analizy procesu ścierania określano wartości sił szlifowania wszystkich ziaren współpracujących z przedmiotem obrabianym. W modelu

uwzględniono ugięcia ziaren oraz zachodzenie procesu bruzdowania. Autorzy publikacji [55] przewidywali wysokość chropowatości powierzchni szlifowanej na podstawie grubości wióra. W modelu teoretycznym założono stożkowy kształt ziaren ściernych. Salisbury i inni [56] symulowali proces szlifowania z wykorzystaniem rzeczywistej i symulowanej ściernicy. Model uwzględnia parametry procesu, jak również topografię powierzchni ściernicy. Autorzy pracy [57], zakładając cięcie w momencie zagłębienia ścierniwa w próbkę, symulowali komputerowo proces szlifowania, uwzględniając jego kinematykę. W modelu wzięto dodatkowo pod uwagę zużycie ściernicy.

W pracy [58] badano proces szlifowania śrubowego (ang. *helical scan grinding*) – rys. 14. Taka obróbka pozwala na zmniejszenie wysokości nierówności do 1/7 w porównaniu ze szlifowaniem poprzecznym. W szlifowaniu śrubowym rowki wytwarzane przez ziarna ściernie nie pokrywają się, jak w szlifowaniu poprzecznym. W modelowaniu założono występowanie jedynie cięcia (nie uwzględniono np. ugięć, bruzdowania, zużycia). Założono skrawanie próbki przez ściernicę o losowym rozkładzie wysokości punktów skrawających. Ziarna ściernie modelowano stożkami. Modelowanie powstawania powierzchni i badania eksperymentalne dowodzą, że maksymalna wysokość chropowatości zmniejsza się ze wzrostem kąta śruby.



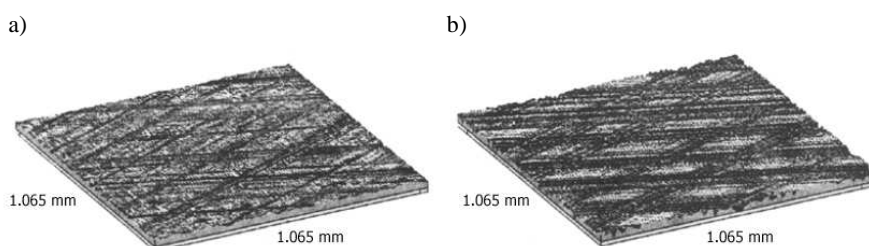
Rys. 14. Schemat szlifowania poprzecznego (a) i śrubowego (b), [1]

Praca [59] dotyczy ultraprecyzyjnego szlifowania materiałów optycznych ściernicami diamentowymi o spoiwie żywicznym. Powierzchnia taka ma strukturę periodyczną, jak powierzchnia luster po toczeniu diamentowym. Powstają profile o zarysie trójkątnym, których kształt zależy od posuwu i kątów ostrza (uzależnionych od wymiarów ziaren, ściernicy, siły normalnej i czasu szlifowania). Generowaniem powierzchni przedmiotu obrabianego podczas procesu szlifowania zajmowali się ponadto autorzy prac [60-65]. Autorzy artykułu [66] zaproponowali model oddziaływania rozpędzonego ziarna na powierzchnię w obróbce strumieniowo-ścierniej. Pokazali efekty symulacji obróbki strumieniowo-ścierniej. Autorzy artykułu [67] symulowali SGP po obróbce strumieniowo-ścierniej. Kowalski [68], modelując powierzchnie powstające przez losowe odci-

śnięcie ziarna ściernego, starał się jak najwierniej odtworzyć warunki rzeczywiste, uwzględniając:

- wielkość ziarna, różną dla poszczególnych zabiegów,
- losowość wyboru miejsca uderzenia ziarna,
- wprowadzenie zakłóceń losowych na powierzchniach modelowych ziaren ściernych,
- losową głębokość penetracji ziaren ściernych,
- losową wielkość ziarna stosowanego w każdym zabiegu.

Rysunek 15. podaje przykład rzeczywistej i modelowej powierzchni cylindra po gładzeniu płaskowierzchołkowym [68].



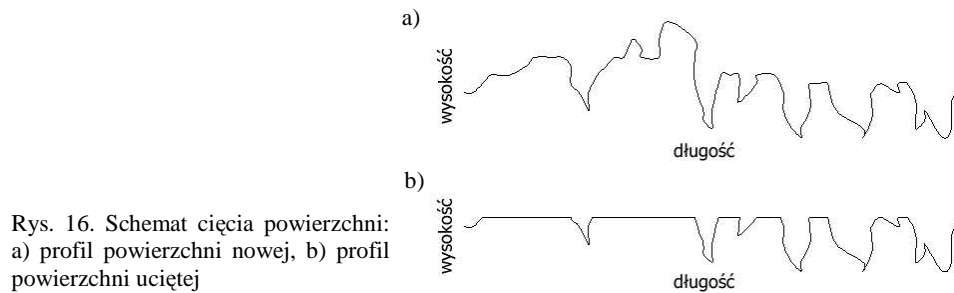
Rys. 15. Widoki rzeczywistej (a) i modelowej (b) powierzchni cylindra

Autorzy prac [69-72] proponują cięcie (rys. 16.) powierzchni cylindrów, co odpowiada działaniu pierścieni tłokowych. Jednakże SGP otrzymane po użyciu tego modelu różniły się znacznie od powierzchni rzeczywistych. Autorzy pracy [69] uważają, że przyczyną tych różnic jest niejednorodna struktura materiału cylindra (żeliwa). Natomiast Rosen i inni [70] utrzymują, że przyczyną rozbieżności jest brak możliwości wnikania końcówki pomiarowej w najgłębsze doliny podczas pomiaru SGP oraz tworzenie warstwy ochronnej na powierzchni cylindra w wyniku reakcji chemicznych podczas smarowania.

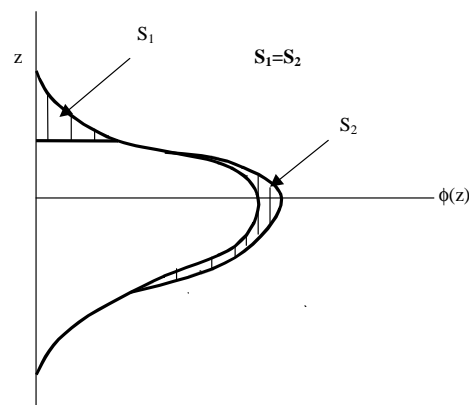
Model uwzględniający odkształcenia plastyczne jest alternatywą do stosowanego powszechnie modelu cięcia. Model ten, oparty na pracy Sugimury [73], bierze pod uwagę zmianę rozkładu rzędnych podczas zużycia. Analizowano zużycie powierzchni równoważnej. Badano zużycie profili prostopadłych do kierunku tarcia. Wyniki porównywano z modelem cięcia. Stwierdzono podobne tendencje zmiany parametrów R_{sk} i R_q , przy różnych ich wartościach podczas zużycia z wykorzystaniem dwóch modeli. Zmiany parametrów zależą od rozkładu wielkości cząstek zużycia. Rysunek 17. pokazuje ideę zmiany rozkładu rzędnych.

Lepszą alternatywą od modelu cięcia jest nakładanie SGP o rozkładzie Gaussa na powierzchnię obrabianą [74, 75]. W modelach tego typu stosuje się

również pierwsze podejście, tzn. nakłada się powierzchnię modelową na powierzchnię obrabianą. Natomiast parametry powierzchni modelowej zależą od tendencji zaobserwowanych podczas analizy zużycia. Przykładowo symulowano zużycie profili osiowych powierzchni cylindra przez nakładanie profilu o normalnym rozkładzie rzędnych na profil po gładzeniu [1, 76, 77]. Rysunek 18. przedstawia profil powierzchni cylindra oraz profile symulowane otrzymane za pomocą różnych metod. Podobną procedurę zastosowano do symulowania zużycia cylindra w układzie 3D.

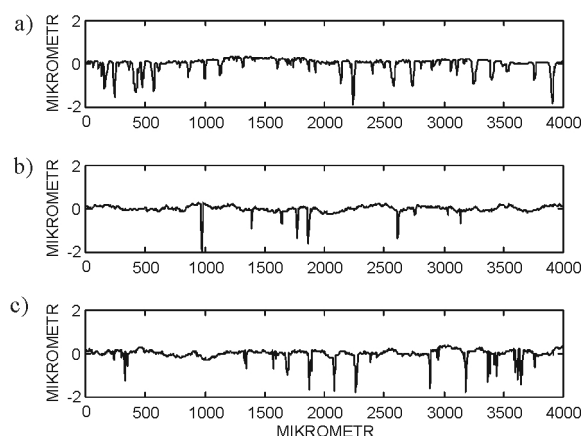


Rys. 16. Schemat cięcia powierzchni:
a) profil powierzchni nowej, b) profil
powierzchni uciętej



Rys. 17. Zmiany rozkładu rzędnych SGP
w trakcie zużycia zgodnie z modelem de-
formacji plastycznej [1]

W podobny sposób symulowano zużycie zerowe profili powierzchni płaszczy tłoków [77, 78]. Podobnie jak w przypadku modelowania procesu szlifowania, symuluje się zużycie ściernie elementów maszyn. Przykładowo autorzy publikacji [79, 80] uwzględnili jedynie występowanie mikroskrawania. W modelach opisanych w artykułach [81, 82] rozważono ponadto zachodzenie deformacji plastycznej.



Rys. 18. Wykres profilu powierzchni dotartej (a), powierzchni symulowanej w wyniku nakładania profilu symulowanego na profil rzeczywisty (b) oraz nakładania profilu symulowanego na profil symulowany (c), [1]

5. Podsumowanie

Ze względu na możliwość symulacji procesów obróbki, tarcia i zużycia rola modelowania struktury geometrycznej powierzchni stale wzrasta. Można wyróżnić dwa podejścia do modelowania: uwzględniające oraz nieuwzględniające warunków technologicznego lub eksploatacyjnego kształtowania powierzchni. Stwierdzono, że nakładanie się dwóch powierzchni pozwala na poprawne modelowanie struktury geometrycznej powierzchni o warstwowych właściwościach funkcjonalnych. W modelach uwzględniających zachodzenie zużycia lub obróbki ścierniej jest rozważany proces ubytku materiału (mikroskrawania) lub deformacji plastycznej. Tendencjami rozwojowymi jest modelowanie stereometrii powierzchni oraz łączenie obu podejść. W przypadku uwzględniania deformacji plastycznej powierzchni podczas obróbki lub zużycia często jest wykorzystywana metoda elementów skończonych.

Literatura

1. Pawlus P.: Topografia powierzchni. Pomiar, analiza, oddziaływanie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2006.
2. Bernardos P.G., Vosniakos G.-C.: Predicting surface roughness in machining: a review. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 43/8, 2003, 833-84.
3. Boryczko A.: Measurement of relative tool displacement to the workpiece for the assessment of influences of machining errors on surface profiles. *Measurement*, 31, 2002, 93-105.
4. Ehmann K.F.: Machining process modelling: a review. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 119, 1997, 655-663.
5. Grzesik W.: Surface finish assessment using a tribo-mechanical coupled model of the cutting process. *Tribologia*, 6, 1995, 726-744.

6. Lin W.S., Lee B.Y., Wu C.L.: Modelling the surface roughness and cutting force in turning. *Journal of Material Processing Technology*, 108, 2001, 286-293.
7. Lipski J., Nieszczeta W., Warmiński J., Zaleski K.: Wpływ nierówności powierzchni obrabianej na siły skrawania i chropowatość powierzchni po toczeniu. III Ogólnokrajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Postępy w technice wytwarzania maszyn”. Politechnika Krakowska, Kraków 1999, 153-160.
8. Lee K.Y., Kang M.C., Jeong Y.H., Lee D.W., Kim J.S.: Simulation of surface roughness and profile in high-speed end milling. *Journal of Material Processing Technology*, 113, 2001, 410-415.
9. Miko E.: Chropowatość powierzchni frezowanych walcowo. *Przegląd Mechaniczny*, 11, 2002, 30-36.
10. Box G.E.P., Jenkins G.M.: Analiza szeregów czasowych. Prognozowanie i sterowanie. PWN, Warszawa 1983.
11. Whitehouse D.J.: Handbook of surface metrology. Bristol and Philadelphia: Inst. of Physics, 1994.
12. Watson Q., King T.G., Spedding T.A., Stout K.J.: The machined surface – time series modelling. *Wear*, 57, 1979, 195-205.
13. Watson W., Spedding T.A.: The time series modelling of non-Gaussian engineering processes. *Wear*, 83, 1992, 215-231.
14. DeVries W.R.: A three-dimensional model of surface asperities developed using moment theory. *ASME Journal of Engineering for Industry*, 104, 1982, 342-348.
15. Stauffert G.: Characterization of random profiles – a comparison of AR-modeling technique and profile description by means of commonly used parameters. *CIRP Annals*, 28/1, 1979, 431-435.
16. Patir N.: A numerical procedure for random generation of rough surfaces. *Wear*, 45, 1977, 263-277.
17. Gu X., Huang Y.: The modelling and simulation of rough surface. *Wear*, 137, 1990, 275-285.
18. Uchida M., Shimizu T., Iwabuchi A., Yanagi K.: Generation of reference data of 3-D texture using the non-casual 2-D AR model. 9th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces. Halmstad University, Szwecja 2003.
19. Nemoto K., Yanagi K., Aketagawa M., Kanda D., Yoshida I., Uchida M.: A study on surface material measures for areal surface texture measuring instruments – measuring conditions for the areal profiling. *Proceedings of ISTMI 2007 Congress*, Sendai, Japan, 801-804.
20. Uchida M., Yanagi K., Yoshida I., Shimizu T., Iwabuchi A.: Generation of 3-D random topography datasets with periodic boundaries for surface metrology algorithms and measurement standards. *Proceedings of the 12th Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces*. Rzeszów 2009, 71-75.
21. Wieczorowski M., Cellary A., Ehmann K.F.: Trójwymiarowa analiza chropowatości powierzchni za pomocą autoregresji. *Materiały konferencji „Metrologia w technikach wytwarzania*, Rzeszów 1995, 101-109.
22. Hu Y.Z., Tonder K.: Simulation of 3-D random surface by 2-D digital filter and Fourier analysis. *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, 32, 1992, 82-90.
23. Ao Y., Wang Q.J., Chen P.: Simulating the worn surface in a wear process. *Wear*, 252, 2002, 37-47.

24. Manesh K.K., Ramamoorthy B., Singaperumal M.: Numerical calculation of anisotropic 3D Gaussian engineering surfaces. 9th International Symposium on Measurement and Quality Control (9th ISMQC), 2007, Madras (Indie), 48-53.
25. Wu J.-J.: Simulation of rough surfaces with FFT. *Tribology International*, 33, 2000, 47-58.
26. Newland D.E.: An introduction to random vibration and spectral analysis. 2nd ed, Longman, London 1984.
27. Bakolas V.: Numerical generation of arbitrary oriented non-Gaussian three-dimensional rough surfaces. *Wear*, 254/5-6, 2003, 546-554.
28. Reizer R.: Simulation of 3D Gaussian surface topography. 12th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Rzeszów 2009, 77-82. (w druku).
29. Rosen B.-G.: Mathematical machining – a way to control the surface engineering cycle. *Proceedings of the Workshop of Engineered Surfaces*, Corps la Salette, 1998.
30. Michalski J., Pawlus P.: Modelowanie komputerowe topografii powierzchni cylindrów po gładzeniu. *Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatyzacji, Politechnika Wrocławska*, t. 82, z. 39, 2002, 261-266.
31. Reizer R.: Modelowanie struktury geometrycznej powierzchni kształtowanych procesami ściernymi. Praca doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2009.
32. Malburg M.C., Raja J.: Characterization of surface texture generated by plateau-honing process. *CIRP Annals*, 42/1, 1993, 637-640.
33. Whitehouse D.J.: Assessment of surface finish profiles produced by multi-process manufacture. *Proceeding of the Inst. Mech. Engrs*, 199/4, 1985, 263-270.
34. Pawlus P., Reizer R.: Modelling of cylinder surface topography. *ASPE 2008 Annual Meeting and the 12th ICPE*.
35. Kumar K.S., Stathopoulos T.: Synthesis of non-Gaussian wind pressure time series on low building roofs. *Engineering Structures*, 21, 1999, 1086-1100.
36. Wu J.-J.: Simulation of non-Gaussian surfaces with FFT. *Tribology International*, 27, 2004, 339-346.
37. Tayebi N., Polycarpou A.A.: Modeling the effect of skewness and kurtosis on the static friction coefficient of rough surfaces. *Tribology International*, 37, 2004, 491-505.
38. Hasegawa M., Liu J., Okuda K., Nunobiki M.: Calculation of the fractal dimension of machined surface profiles. *Wear*, 192, 1996, 40-45.
39. Ganti S., Bhushan B.: Generalized fractal analysis and its application to engineering surfaces. *Wear*, 180 1995, 17-34.
40. Russ J.C.: *Fractal Surfaces*. Plenum Press, New York 1994.
41. Majumdar A., Tien C.L.: Fractal characterization and simulation of rough surfaces. *Wear*, 136, 1990, 313-327.
42. Blackmore D., Zhou G.: A new fractal model for anisotropic surfaces. *Transactions of 7th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces*. Gothenburg, Sweden, 1997, 147-153.
43. Jabłoński J., Pawłowski S.: 3-D fraktalny model powierzchni honowanej typu plateau. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, 19/2, Poznań 1999, 83-91.
44. Jabłoński J.: Digital generation of surface of asymmetrical height distribution. *Measurement*, 34, 2003, 187-191.

45. Jabłoński J., Pawłowski S., Liubimov W.: 3D-numerical model of surface after laser machining. Proceedings of the 4th International Conference „Measurement 2003”, Bratysława, Słowacja, 451-454.
46. Koshy P., Ives L.K., Jahanmir S.: Simulation of diamond-ground surfaces. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 39, 1999, 1451-1470.
47. Pandit S.M., Sathyanarayan G.: Data-dependent systems approach to surface generation in grinding. Transaction of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 106, 1984, 205-212.
48. Bhateja C.P.: An enveloping profile approach for the generation of ground surface texture. CIRP Annals, 26, 1977, 333-337.
49. König W., Steffens K.: A numerical method to determine the kinematics of grinding. CIRP Annals, 31/1, 1982, 201-204.
50. Inasaki I.: Grinding process simulation based on wheel topography measurement. CIRP Annals, 45, 1996, 347-350.
51. Chen X., Rowe B.: Analysis and simulation of the grinding process. Part I: Generation of the grinding wheel surface. Int. J. of Machine Tools & Manufacture, 36/8, 1996, 871-892.
52. Chen X., Rowe B.: Analysis and simulation of the grinding process. Part II: Mechanics of grinding. Int. J. of Machine Tools & Manufacture, 36/8, 1996, 883-89.
53. Chen X., Rowe B.: Analysis and simulation of the grinding process. Part III: Comparison with experiment. Int. J. of Machine Tools & Manufacture, 36/8, 1996, 897-906.
54. Chen X., Rowe B.: Analysis and simulation of the grinding process. Part IV: Effects of wheel wear. Int. J. of Machine Tools & Manufacture, 38/1,2, 1998, 41-49.
55. Hecker R.L., Liang S.L., Woodruff G.W.: Predictive modelling of surface roughness in grinding. Int. J. of Machine Tools and Manufacture, 43/8, 2003, 755-761.
56. Salisbury E.J., Domala K.V., Moon K.S., Miller M.H., Sutherland D.W.: A three-dimensional model for the surface texture in surface grinding. Part I. Surface generation model. ASME J. of Manufacturing Science and Engineering, 123, 2001, 576-581.
57. Zhou X., Xi F.: Modeling and predicting surface roughness of the grinding process. Int. J. of Machine Tools & Manufacture, 42, 2002, 969-977.
58. Zhang B., Uematsu T.: Surface generation mechanism in helical scan grinding: an analytical study. Journal of Material Processing Technology, 91, 1999, 206-214.
59. Namba Y., Shiokawa M., Yu J.: Surface roughness generation mechanism of ultra-precision grinding of optical materials with a cut-type resinoid-bonded diamond wheels. CIRP Annals, 1997, 46/1, 253-256.
60. Ali Y.M., Zhang L.C.: Surface roughness predictions of ground components using a fuzzy logic approach. Journal of Material Processing Technology, 89-90/1999, 561-568.
61. Storz G.E., Dow T.A.: Virtual modelling of contour grinding. Proceedings of the ASPE, 1993, 193-196.
62. Warnecke G., Zitt U.: Kinematic simulation for analyzing and predicting high-performance grinding process. CIRP Annals, 47/1, 1998, 265-270.
63. Porzycki J.: Modelowanie szlifowania osiowego zewnętrznych powierzchni walcowych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2004.

64. Kacalak W.: Metody i zastosowania sztucznej inteligencji do diagnostyki, optymalizacji i sterowania w procesach szlifowania. XIX Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Łódź 1996, 231-246.
65. Królikowski T., Kacalak W., Białasz B.: Wybrane problemy generowania modeli topografii ściernicy. XXII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Gdańsk 1999, 179-184.
66. Jain R.K., Jain V.K.: Simulation of surface generated in abrasive flow machining process. *Robotics and Computer Integrated Manufacturing*, 15, 1999, 403-312.
67. Pawlus P., Reizer R., Dzierwa A.: Surface topography of chromium coatings after pneumatic ball peening. *Key Engineering Materials*, 381-382, 2008, 635-638.
68. Kowalski M.: Metodyka wyboru parametrów chropowatości do opisu topografii powierzchni. Praca doktorska, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2005.
69. Mathia T.G., Zahouani T., Schissler J.M., Rakowski W.: Analysis of cylinder bores – the relationship between metallurgical structure, manufacture and wear characterization. *Proc. Int. Congress on Tribology*, Vol. 4, 1993, 311-316.
70. Rosen B.-G., Ohlsson R., Thomas T.R.: Wear of cylinder bore microtopography. *Wear*, 198, 1996, 271-279.
71. Stout K.J., Davis E.J., Sullivan P.J.: *Atlas of Machined Surfaces*. Chapman and Hall, London 1990.
72. Stout K.J., Davis E.J.: Surface topography of cylinder bores – the relationship between manufacture, characterization and function. *Wear*, 95, 1984, 111-125.
73. Sugimura J., Kimura Y., Amino K.: Analysis of the topography changes due to wear – geometry of the running-in process. *JSLE*, 31/11, 1986, 813-820.
74. King T.G., Watson W., Stout K.J.: Modelling the micro-geometry of lubricated wear. [In:] *Proceedings of the 4th Leeds-Lyon Symposium on Tribology*. MEP, London 1978, 333-343.
75. Nonogaki M., Morimoto T., Nakahara T.: Method of determination of truncation parameters from measured surface profile. *Tribology International*, 36/10, 2003, 745-752.
76. Pawlus P., Michalski J.: Simulation of cylinder “zero-wear” process. *Wear*, 266, 2009, 208-13.
77. Pawlus P.: Simulation of stratified surface topographies. *Wear*, 264, 2008, 457-63.
78. Krzyżak Z.: Modelowanie topografii powierzchni eksploatowanych płaszczy tłoków silników spalinowych. Rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2005.
79. Jacobson S., Wallen P., Hogmark S.: Correlation between groove size, wear rate and topography of abraded surfaces. *Wear*, 115, 1987, 83-93.
80. Jacobson S., Wallen P., Hogmark S.: Fundamental aspects of abrasive wear studied by a new numerical simulation model. *Wear*, 123, 1988, 207-223.
81. Jiang J., Sheng F., Ren F.: Modelling of two-body abrasive wear under multiple contact conditions. *Wear*, 217, 1998, 35-45.
82. Fang L., Cen Q., Sun K., Liu W., Zhang X., Huang Z.: FEM computation of groove ridge and Monte Carlo simulation in two-body abrasive wear. *Wear*, 258, 2005, 265-274.

REVIEW OF METHODS OF SURFACE TOPOGRAPHY MODELING**S u m m a r y**

Two fundamental approaches to surface topography modeling are presented. Modeling not taking into consideration surface creation during technological or operational processes is the first of them. The second approach takes into account real condition of surface creation. The authors presented the results of own investigations in relation to works of other scientists.

Złożono w redakcji w lipcu 2010 r.