

**MODELOWANIE STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ
POWIERZCHNI TEKSTUROWANYCH
ODZWIERCIEDLAJĄCE WARUNKI
POWSTAWANIA NIERÓWNOŚCI NA ETAPACH
TECHNOLOGII I EKSPLOATACJI**

Rafał Reizer

**MODELOWANIE STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ
POWIERZCHNI TEKSTUROWANYCH
ODZWIERCIEDLAJĄCE WARUNKI
POWSTAWANIA NIERÓWNOŚCI NA ETAPACH
TECHNOLOGII I EKSPLOATACJI**



**WYDAWNICTWO
UNIWERSYTETU RZESZOWSKIEGO
RZESZÓW 2019**

Recenzował
prof. dr hab. inż. Michał Wieczorowski

Opracowanie redakcyjne i korekta
WŁADYSŁAW WÓJTOWICZ

Opracowanie techniczne i łamanie
ARKADIUSZ NISZTUK
BEATA NISZTUK

Korekta techniczna
EWA KUC

Projekt okładki
RAFAŁ REIZER

© Copyright by
Wydawnictwo Uniwersytetu Rzeszowskiego
Rzeszów 2019

ISBN 978-83-7996-641-7

1589

WYDAWNICTWO UNIWERSYTETU RZESZOWSKIEGO
35-959 Rzeszów, ul. prof. S. Pigonia 6, tel. 17 872 13 69, tel./fax 17 872 14 26
e-mail: wydaw@ur.edu.pl; <http://wydawnictwo.ur.edu.pl>
Wydanie I; format B5; ark. wyd. 9,9; ark. druk. 10,125; zlec. red. 4/2019

Druk i oprawa: DRUKARNIA UNIWERSYTETU RZESZOWSKIEGO

Spis treści

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW	7
1. WSTĘP	9
2. PRZEGLĄD METOD MODELOWANIA STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI	11
2.1. Wprowadzenie	11
2.2. Modelowanie nieuwzględniające warunków technologicznego lub eksploatacyjnego kształtowania powierzchni	12
2.3. Modelowanie odzwierciedlające rzeczywiste warunki tworzenia powierzchni	22
3. ISTOTNOŚĆ TRIBOLOGICZNA POWIERZCHNI TEKSTUROWANYCH	38
4. MODELOWANIE POWIERZCHNI KSZTAŁTOWANYCH W PROCESIE HONOWANIA PŁASKOWIERZCHOLKOWEGO	45
4.1. Honowanie cylindrów silników spalinowych	45
4.1.1. Wprowadzenie	45
4.1.2. Charakterystyka procesu honowania cylindrów	45
4.1.3. Wymagania dotyczące gładzi cylindrów silników spalinowych	51
4.2. Badania doświadczalne tulei cylindrowych	55
4.3. Modelowanie SGP honowanych tulei cylindrowych	77
4.3.1. Istota modelowania	77
4.3.2. Wyniki modelowania SGP honowanej z zastosowaniem osełek z warstwą diamentową	83
4.3.3. Wyniki modelowania SGP honowanej z zastosowaniem osełek ceramicznych	103
4.4. Wnioski	114
5. MODELOWANIE SGP TEKSTUROWANYCH W TRAKCIE EKSPLOATACJI	117
5.1. Wprowadzenie	117
5.2. Modelowanie struktury geometrycznej zużytej powierzchni tulei cylindra	117
5.2.1. Metodyka i wyniki badań	117
5.2.2. Procedura modelowania powierzchni po zużyciu	118
5.2.3. Wyniki modelowania	120
5.3. Modelowanie SGP teksturowanego pierścienia stalowego w trakcie zużycia w warunkach sztucznie zwiększonego zapylenia	123
5.3.1. Metodyka i wyniki badań	123

5.3.2. Opis topografii teksturowanej powierzchni	125
5.3.3. Modelowanie topografii powierzchni pierścienia	127
5.4. Wnioski	141
6. PODSUMOWANIE	143
LITERATURA	146
STRESZCZENIE	159
ABSTRACT	161

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

- Ra (Pa, Wa) – średnia arytmetyczna rzędnych profilu¹
- Rdq (Pd_q, Wd_q) – średniokwadratowy wznios profilu (średniokwadratowe pochylenie profilu)¹
- Rk (Pk) – głębokość rdzenia chropowatości
- Rku (Pku, Wku) – współczynnik nachylenia profilu¹
- Rmr1, Rmr2 – udział materiałowy (górnny i dolny) profilu
- Rmq (Pmq) – względny udział materiałowy na przecięciu plateau i wgłębień
- Rp (Pp, Wp) – wysokość najwyższego wzniesienia profilu¹
- Rpk (Ppk) – zredukowana wysokość wzniesień
- Rpq (Ppq) – nachylenie prostej regresji w obszarze plateau
- Rq (Pq, Wq) – średnia kwadratowa rzędnych profilu¹
- Rsk (Psk, Wsk) – współczynnik asymetrii profilu¹
- Rt (Pt, Wt) – całkowita wysokość profilu¹
- Rv (Pv, Wv) – głębokość najniższego wgłębienia profilu¹
- Rvk (Pvk) – zredukowana głębokość wgłębień
- Rvq (Pvq) – nachylenie prostej regresji w obszarze wgłębień
- Rz (Pz, Wz) – największa wysokość profilu¹
- Sa – średnia arytmetyczna rzędnych powierzchni; stereometryczny odpowiednik parametru Ra
- Sal – długość autokorelacji
- Sdq – średniokwadratowe nachylenie powierzchni; stereometryczny odpowiednik parametru Rdq
- Sdr – współczynnik rozwinięcia obszaru powierzchni
- Sk – wysokość rdzenia; stereometryczny odpowiednik parametru Rk
- Sku – współczynnik nachylenia powierzchni; stereometryczny odpowiednik parametru Rku
- Smq – względny przestrzenny udział materiałowy na przecięciu plateau i wgłębień; stereometryczny odpowiednik parametru Rmq
- Sr1 – udział materiałowy wierzchołków; stereometryczny odpowiednik parametru Rmr1
- Sr2 – udział materiałowy wgłębień; stereometryczny odpowiednik parametru Rmr2

¹ Parametry chropowatości oznaczono literą R, falistości W, zaś profilu pierwotnego P.

- Sp – maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni; stereometryczny odpowiednik parametru Rp
- Spc – średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołka
- Spd – gęstość wierzchołków
- Spq – średniokwadratowe nachylenie prostej regresji w obszarze plateau; stereometryczny odpowiednik parametru Rpq
- Spk – zredukowana wysokość wierzchołków; stereometryczny odpowiednik parametru Rpk
- Sq – średnia kwadratowa wysokość powierzchni; stereometryczny odpowiednik parametru Rq
- Ssk – współczynnik asymetrii powierzchni; stereometryczny odpowiednik parametru Rsk
- Str – współczynnik kształtu struktury geometrycznej powierzchni
- Sv – maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni; stereometryczny odpowiednik parametru Rv
- Svk – zredukowana głębokość wgłębień; stereometryczny odpowiednik parametru Rvk
- Svq – średniokwadratowe nachylenie prostej regresji w obszarze wgłębień; stereometryczny odpowiednik parametru Rvq
- Sz – największa wysokość powierzchni; stereometryczny odpowiednik parametru Rz
- Vmc – objętość materiału rdzenia powierzchni
- Vmp – objętość materiału wierzchołków powierzchni
- Vvc – objętość pustek rdzenia powierzchni
- Vvv – objętość pustek wgłębień powierzchni
- 2D – analiza w dwóch wymiarach (profil)
- 3D – analiza w trzech wymiarach (powierzchnia)
- SGP – struktura geometryczna powierzchni

1. Wstęp

Obecnie dąży się do uzyskania dobrej jakości wyrobów, powiązanej z jakością warstwy wierzchniej obrobionych przedmiotów. Stan warstwy wierzchniej wpływa na zdolność do spełniania wymagań eksploatacyjnych przez części maszyn. Integralną częścią warstwy wierzchniej jest powierzchnia zewnętrzna. Wszystkie odstępstwa powierzchni rzeczywistej od powierzchni nominalnej określa się mianem struktury geometrycznej powierzchni (SGP), obejmującej odchyłkę kształtu, falistość, chropowatość oraz wady powierzchni. Odchyłki kształtu są odchyłkami dużej – falistości średniej, zaś chropowatości – małej skali.

Struktura geometryczna powierzchni powstaje w procesie technologicznym. Poprawne jej ukształtowanie wpływa w sposób istotny na zagadnienia styku, co jest powiązane ze sztywnością połączeń stykowych, przewodnictwem cieplnym i szczelnością. Struktura geometryczna powierzchni ślizgowych może wywierać istotny wpływ na procesy tarcia i zużycia, a jej stan w głównej mierze może decydować o jakości współpracy w węźle tribologicznym, zwłaszcza w początkowym okresie pracy skojarzenia ciernego, w przypadku dużych różnic twardości współpracujących elementów oraz w warunkach tarcia mieszanego.

Struktura geometryczna powierzchni powstała w procesie technologicznym powinna spełniać wymagania konstrukcyjne. Powstają one na podstawie badań eksploatacyjnych. Ocena SGP części maszyn z wykorzystaniem tylko jednego parametru jest dużym uproszczeniem, występuje konieczność opisu nierówności powierzchni za pomocą zestawu parametrów. Dotyczy to zwłaszcza powierzchni noszących ślady dwóch procesów. Przykładem takich struktur jest powierzchnia cylindrów po gładzeniu płaskowierzchołkowym. Zawiera ona ślady dwóch procesów: honowania wykończeniowego i ostatecznego. W trakcie honowania wykończeniowego nacinane są głębokie rysy smarowe. Podczas gładzenia ostatecznego następuje ścięcie wierzchołków, uzyskuje się strukturę płaskowierzchołkową składającą się z części nośnej o niewielkiej wysokości nierówności poprzecinanej przez głębokie rysy smarowe. Struktura ta jest dodatkowo powierzchnią skrzyżowaną (ślady obróbki są skrzyżowane w dwóch ukośnych kierunkach względem płaszczyzny rzutu powierzchni), co nie ułatwia jej opisu.

Badania technologiczne są długotrwałe i kosztowne. Czas i koszty badań można zmniejszyć przez numeryczne modelowanie powierzchni. Procedury modelowania są narzędziem do przewidywania skutków działań zamierzonych i zakłóceń losowych. Modelowanie topografii powierzchni może uwzględnić warunki jej powstawania lub ich nie uwzględniać. Modelowanie struktury geometrycznej powierzchni odzwierciedlające rzeczywiste warunki jej tworzenia może umożliwić zbadanie wpływu warunków obróbki na jej ukształtowanie; wówczas badania doświadczalne można ograniczyć do najbardziej korzystnego wariantu ukształtowania powierzchni.

Należy dążyć do minimalizacji tarcia i zużycia. Jedną z tańszych możliwości jest optymalne ukształtowanie nierówności powierzchni w procesie technologicznym. Ważną opcją poprawy właściwości tribologicznych skojarzeń trących jest teksturowanie powierzchni ślizgowych, czyli wykonanie miejscowych zagłębień. W ich wnętrzu gromadzi się smar, zmniejszając opory tarcia w warunkach smarowania mieszanego i granicznego oraz zwiększając odporność na zatarcie. Kieszenie smarowe mogą również powodować zjawisko hydrodynamicznego unoszenia i mogą być pułapką na cząstki ściernie, co powoduje wzrost odporności na ścieranie. Przeprowadzono wiele badań z zakresu wpływu teksturowania powierzchni na właściwości eksploatacyjne skojarzeń trących.

W procesie eksploatacji technologiczna warstwa wierzchnia przekształca się w eksploatacyjną warstwę wierzchnią o odmiennych charakterystykach. Dotyczy to również powierzchni. Dlatego badania tribologiczne nie ograniczają się jedynie do badań oporów tarcia, przeprowadza się również badania zużycia, które są żmudne i długotrwałe. Prognozowanie stanu nierówności powierzchni powstałej w trakcie badań zużycia spowoduje znaczną redukcję czasu i kosztów badań tribologicznych.

Modelowanie struktury geometrycznej powierzchni na etapach technologii i eksploatacji ma istotne znaczenie praktyczne. Może również przyczynić się do wyjaśnienia zjawisk zachodzących w węzle ciernym w trakcie badań tribologicznych. Zagadnieniu modelowania SGP poświęcona jest niniejsza praca.

W opracowaniu w rozdziale drugim zamieszczono przegląd metod modelowania nierówności powierzchni z podziałem na metody uwzględniające i nieuwzględniające warunków technologicznego lub eksploatacyjnego kształtowania powierzchni. W rozdziale trzecim opisano istotność tribologiczną powierzchni zawierających kieszenie smarowe oraz metody kształtowania funkcjonalnych nierówności powierzchni.

W pierwszej części rozdziału czwartego omówiono zagadnienia związane z honowaniem cylindrów silników spalinowych. Druga część zawiera prezentację badań doświadczalnych procesu honowania płaskowierzchołkowego. W części trzeciej przedstawiono istotę i wyniki zastosowania autorskiej metody modelowania nierówności powierzchni cylindrów podczas procesu honowania płaskowierzchołkowego, którą wykorzystano m.in. w badaniach przeprowadzonych w ramach grantu NCN nr N N505 487540 pt. *Modelowanie struktury geometrycznej powierzchni ze śladami po kilku sposobach obróbki na przykładzie gładzenia płaskowierzchołkowego*.

W rozdziale piątym opisano modelowanie nierówności tulei cylindrowych oraz powierzchni teksturowanych pierścieni stalowych po badaniach tribologicznych. Rozdział szósty zawiera podsumowanie prac badawczych.

2. Przegląd metod modelowania struktury geometrycznej powierzchni

2.1. Wprowadzenie

Struktura geometryczna powierzchni odgrywa ogromną rolę z punktu widzenia właściwości eksploatacyjnych części maszyn. Jej prognozowanie niejednokrotnie może mieć duże znaczenie ze względu na wiele czynników, takich jak optymalizacja parametrów technologicznych obrabianych części, kontrola jakości procesu lub choćby eliminacja konieczności tworzenia rzeczywistych powierzchni.

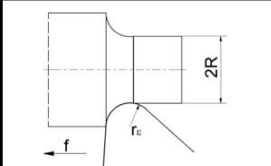
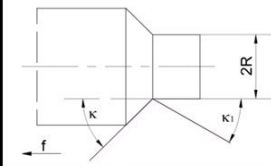
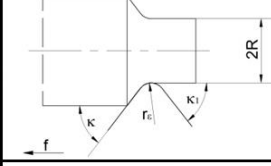
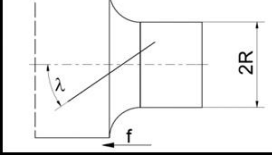
Zasadniczo spośród metod modelowania SGP można wydzielić dwie grupy. Pierwszą z nich stanowią metody, w których nie uwzględnia się warunków technologicznego bądź eksploatacyjnego tworzenia powierzchni, natomiast metody z drugiej grupy warunki takie uwzględniają.

W przypadku powierzchni generowanych przy pomocy metod nieuwzględniających warunków ich powstawania, najczęściej uzyskuje się stosunkowo dobre przybliżenie wartości parametrów powierzchni modelowanych i rzeczywistych. Ponadto, modelowanie tego typu daje możliwość generowania różnych powierzchni o kształcie trudnym do uzyskania w wyniku rzeczywistej obróbki, jednak przydatnych z punktu widzenia analizy różnego typu skojarzeń materiałowych w określonych warunkach.

Metody modelowania powierzchni, w których uwzględniono warunki ich kształtowania, powodują gorsze przybliżenie parametrów powierzchni w porównaniu z metodami z pierwszej grupy, jednak dają możliwość analizy wpływu parametrów kształtowania powierzchni (parametrów obróbki) bądź parametrów eksploatacyjnych na SGP elementów maszyn, dzięki czemu mogą być przydatne np. w optymalizacji procesu technologicznego.

W niektórych przypadkach obie grupy metod mogą się wzajemnie uzupełniać, np. w przypadku modelowania powierzchni powstających jako wynik geometryczno-kinematycznego odwzorowania geometrii ostrza na przedmiocie obrabianym [74, 254]. W tym przypadku kształtowanie obrabianej powierzchni rozpatrywane jest jako algebraiczne odejmowanie kształtu narzędzia wzdłuż jego ścieżki roboczej na obrabianej powierzchni, przez co kontur powierzchni wyznaczany jest poprzez względne przemieszczenie pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym.

Prace [127, 128, 156] opisują trzy elementarne profile teoretyczne, które tworzone są w wyniku obróbki przy pomocy narzędzia o zdefiniowanej geometrii ostrza. Należą do nich profile: trójkątny, promieniowy i hiperboliczny (rys. 2.1.).

Schemat obróbki	Profil powierzchni	Teoretyczna wysokość profilu	Uwagi
	Promieniowy	$H = r_e - \sqrt{4r_e^2 - f^2} = \frac{f^2}{8r_e}$	Obróbka kształtująca i wykończeniowa
	Trójkątny	$H = \frac{f \sin \kappa \cdot \sin \kappa_1}{\sin(\kappa + \kappa_1)}$	Obróbka precyzyjna, w tym powierzchni z określoną SGP
	Trójkątny zaokrąglony	$H = \frac{\sin \kappa \cdot \sin \kappa_1}{\sin(\kappa + \kappa_1)} \left[f - r_e \left(\operatorname{tg} \frac{\kappa}{2} + \operatorname{tg} \frac{\kappa_1}{2} \right) \right]$	Obróbka zgrubna
	Hiperboliczny	$H = 0.5 \sqrt{4r_e^2 - f^2 \operatorname{tg}^2 \lambda} - R$	Obróbka wykończeniowa i precyzyjna, w tym powierzchni optycznych

Rys. 2.1. Zależności dotyczące profili o kształcie trójkątnym, promieniowym i hiperbolicznym [156] (f – posuw, r_e – promień zaokrąglenia ostrza)

Trójkątny kształt profilu uzyskujemy w wyniku obróbki precyzyjnej z wykorzystaniem noży z ostrzami diamentowymi. W rzeczywistości jest to profil trójkątny zaokrąglony. Profil hiperboliczny jest charakterystyczny dla operacji toczenia z wykorzystaniem skośnych noży bezwierzchołkowych. Profil promieniowy stosuje się podczas obróbki kształtującej i wykończeniowej, natomiast profil trójkątny zaokrąglony podczas obróbki wstępnej, kiedy to w procesie skrawania, poza zaokrąglonym narożem, biorą również udział prostoliniowe fragmenty głównej oraz pomocniczej krawędzi skrawającej [27, 156].

2.2. Modelowanie nieuwzględniające warunków technologicznego lub eksploatacyjnego kształtowania powierzchni

Istotą modelowania, które nie uwzględnia rzeczywistych warunków kształtowania powierzchni, jest jak najlepsze przybliżenie parametrów powierzchni wygenerowanej komputerowo do powierzchni rzeczywistej. Dodatkową zaletą

tego typu modelowania jest możliwość generowania powierzchni o kształtach trudnych do wytworzenia w warunkach rzeczywistych, stanowiących podstawę do analizy różnych skojarzeń materiałowych w określonych warunkach.

Najczęściej modeluje się powierzchnie losowe. Pierwsze prace dotyczyły powierzchni o normalnym rozkładzie rzędnych. Przy generowaniu SGP konieczna jest informacja o jej cyfrowej charakterystyce. Stwierdzono, że profil powierzchni losowej o normalnym rozkładzie rzędnych można jednoznacznie opisać za pomocą dwóch parametrów. Są to odchylenie standardowe wysokości nierówności oraz długość korelacji, będąca długością odcinka, na jakiej wartość funkcji autokorelacji spada do wartości 0.1. Istotny jest kształt funkcji korelacji, który w przypadku powierzchni losowych jest rozkładem wykładniczym [231].

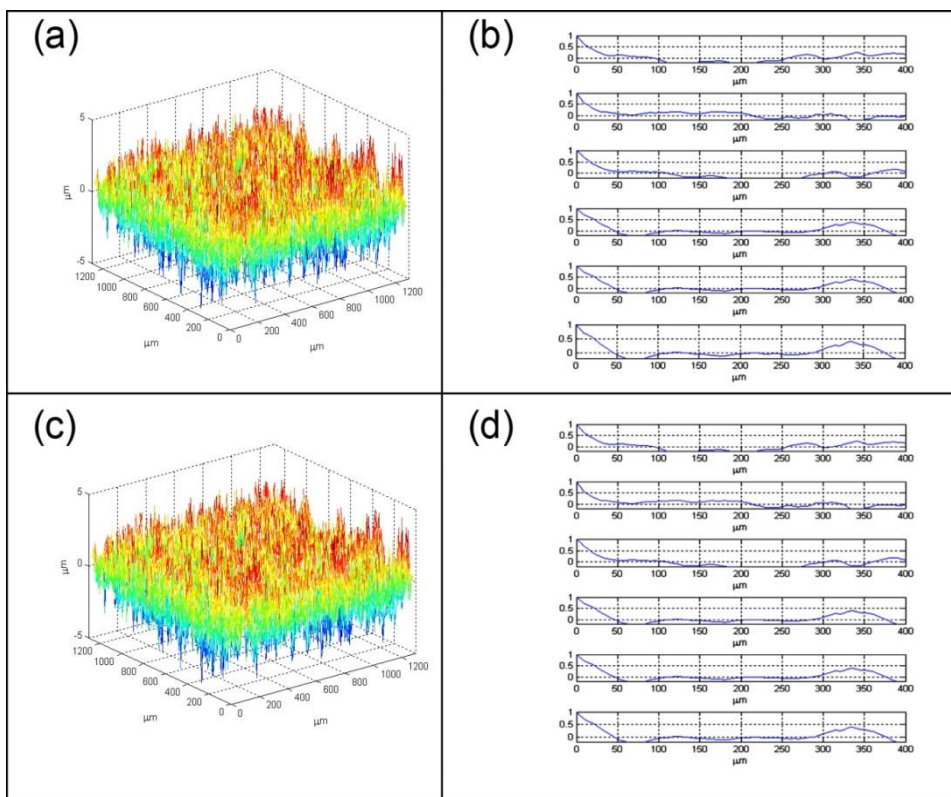
Ponieważ pierwotnie analizowano profile nierówności, dlatego pierwsze prace dotyczyły modelowania profili. Wcześniejsze prace koncentrowały się na analizie szeregów czasowych ARMA (ang. *Autoregressive – moving – average*). Proces autoregresji można traktować jako wyjście filtra liniowego, na którego wejściu jest szum biały [22]. W modelowaniu profili duże znaczenie ma proces autoregresji rzędu drugiego AR(2) [158, 205, 218, 229, 234].

Metodę szeregów czasowych można również zastosować do symulacji powierzchni w układzie 3D [35, 79, 159, 235]. Powierzchnia o normalnym rozkładzie rzędnych jest charakteryzowana przez odchylenie standardowe wysokości nierówności (parametr Sq) oraz długość korelacji w kierunkach wzajemnie prostopadłych. Generowano powierzchnie izotropowe oraz anizotropowe jednokierunkowe (ortotropowe [155]). W pracy [159] zastosowano liniową transformację macierzy losowych.

Publikacje dotychczas przedstawione generowały powierzchnie o normalnym rozkładzie rzędnych. Do modelowania nierówności powierzchni losowych o innym rozkładzie rzędnych można zastosować metodę translacyjną Johnsona wykorzystującą system Pearsona krzywych częstotliwościowych, co pozwala na otrzymanie nieskorelowanych liczb o zadanej wartości funkcji autokorelacji [78]. System ten był stosowany do generowania rozkładu rzędnych o zadanych wartościach skośności i kurtozy. Stosowanie metody Johnsona umożliwiło modelowanie z użyciem metody szeregów czasowych profili i stereometrii powierzchni o rozkładzie rzędnym różnym od normalnego [70, 148, 217, 221, 230].

Alternatywą do stosowania metody szeregów czasowych jest wykorzystanie szybkiej transformaty Fouriera FFT. Metody te pozwalają na lepszą symulację SGP o znacznych długościach fali w porównaniu z metodami opartymi na autoregresji niskich rzędów [166]. Metodę opartą na FFT zastosowali Hu i Tonder [85]. Wykorzystali oni dolnoprzepustowe filtry 2D uzależnione od zadanej funkcji autokorelacji. Po zastosowaniu metody translacyjnej Johnsona można otrzymać SGP o rozkładzie rzędnych różnym od normalnego. Newland [149] zastosował inną metodę opartą na FFT, co pozwoliło na lepsze przybliżenie

powierzchni anizotropowych w porównaniu do metody Hu i Tondera [174]. Wu [245] zmodyfikował metodę Newlanda, co poprawiło skuteczność przybliżenia parametrów wzdłużnych w przypadku ich większej wartości. W modelowaniu powierzchni izotropowych o długości korelacji $50\ \mu\text{m}$ (rys. 2.2.) średnie błędy określenia długości korelacji sześciu równoległych profili wynosiły około 6% po zastosowaniu metody Wu, zaś około 8% – metody Newlanda [185].

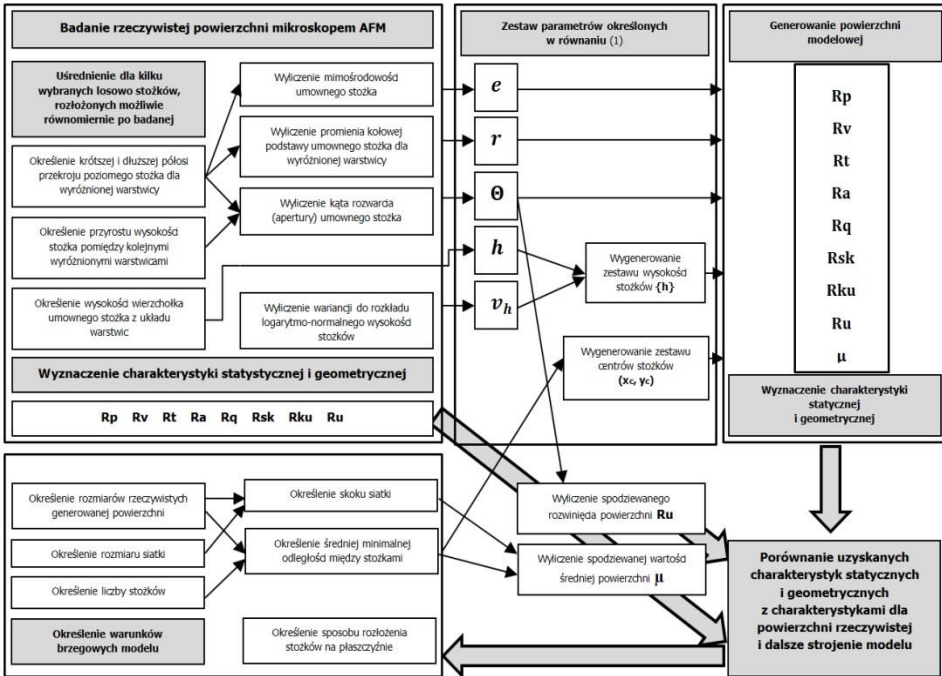


Rys. 2.2. Widoki izometryczne (a, c) oraz funkcje autokorelacji równoległych profili (b, d) powierzchni generowanych komputerowo o założonej długości korelacji $50\ \mu\text{m}$ po zastosowaniu metody Wu (a, b) i Newlanda (c, d) [185]

Wu przedstawił również metodykę generowania komputerowego powierzchni losowej o rozkładzie rzędnych różnym od normalnego [244]. Autorzy publikacji [252] zastosowali jednocześnie metody ARMA i FFT. Liao i inni [122] zmodyfikowali metodę Patira [159], stosując w celu przyspieszenia obliczeń szybkie przekształcenie Fouriera.

Francisco i Brunetiere zmodyfikowali metodę Hu i Tondera, poprawiając jej dokładność i zmniejszając czas obliczeń [44].

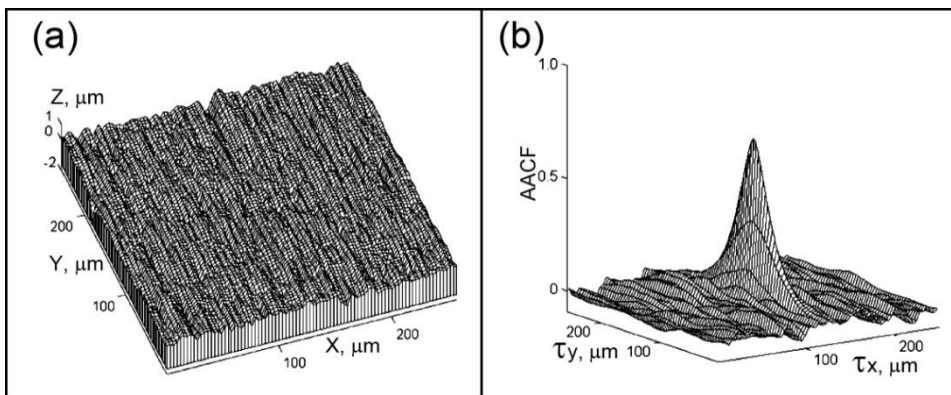
Przykładem publikacji przedstawiającej modelowanie SGP, którego celem jest uzyskanie dobrego odzwierciedlenia powierzchni rzeczywistej, jest artykuł [58]. Przedstawiono w nim algorytm modelowania polerowanej powierzchni stopu magnezu wykorzystujący generowanie i nakładanie na siebie stożków kołowych i eliptycznych, których rozwarcie uzależnione jest od parametrów modelowanej powierzchni. Losowość powierzchni osiągnięto dzięki stosowanym rozkładom prawdopodobieństwa rozkładu stożków na powierzchni oraz ich wysokości. Rys. 2.3. przedstawia schemat generowania SGP.



Rys. 2.3. Schemat generowania SGP (na podstawie [58])

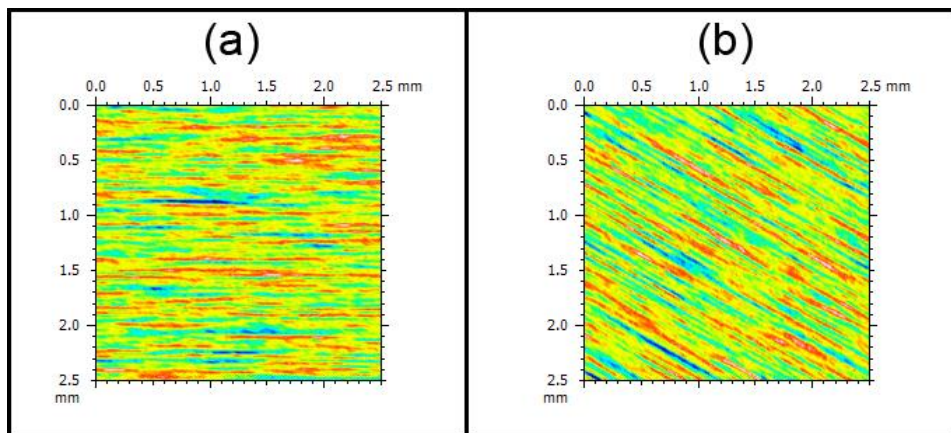
Istnieją problemy dotyczące generowania powierzchni anizotropowych z wykorzystaniem metod ARMA i FFT. Manesh i inni [134] porównywali metodę szybkiej transformaty Fouriera (filtra 2D) [199] oraz metodę nieliniowych gradientów sprzężonych (ang. *Non-linear Conjugate Gradient Method*, NCGM) [85], stwierdzając przydatność drugiej metody w odniesieniu do powierzchni o znacznej długości korelacji. Rys. 2.4. pokazuje wykres izometryczny oraz funkcję autokorelacji powierzchni otrzymanej za pomocą metody NCGM.

Autorzy publikacji [226] zastosowali odmianę metody ARMA – STARIMA (ang. *space-time autoregressive integrated moving average*) do generowania struktury geometrycznej powierzchni.



Rys. 2.4. Wykres izometryczny oraz funkcja autokorelacji powierzchni anizotropowej wygenerowanej z użyciem metody NCGM (za [134])

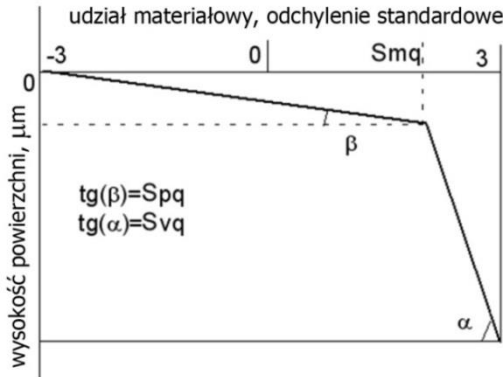
Bakolas [10] opracował metodykę (opartą na pracy Patira [159]) generowania komputerowego powierzchni arbitralnie zorientowanych. Można również zastosować obrót układu współrzędnych [185] – rys. 2.5.



Rys. 2.5. Mapy konturowe powierzchni jednokierunkowej (a), powierzchni obróconej o zadany kąt (b) [185]

Ciekawe jest modelowanie SGP noszących ślady dwóch procesów. Klasycznym przykładem takich powierzchni jest powierzchnia cylindra po gładzeniu płaskowierzchołkowym. Powierzchnie dwuprocesowe mogą być analizowane z wykorzystaniem wykresu krzywej udziału materiałowego w układzie łaplaso-normalnym [30, 133, 163, 173, 184, 189, 232, 260]. Wykres ten w odniesieniu do losowej powierzchni dwuprocesowej zawiera dwa liniowe obszary. Parametr Spq (odchylenie standardowe części plateau) przedstawia nachylenie linii prostej

przechodzącej przez obszar plateau, natomiast Svq (odchylenie standardowe części dolin) – przez obszar dolin. Punkt przecięcia obu tych prostych jest reprezentowany na osi odciętych przez parametr Smq , który przedstawia granicę pomiędzy obszarem plateau i obszarem dolin. Parametry Spq , Svq oraz Smq są rozszerzeniem parametrów Rpq , Rvq i Rmq zdefiniowanych w normie ISO 13565-3. Rys. 2.6. przedstawia graficzną interpretację parametrów Spq , Svq i Smq .

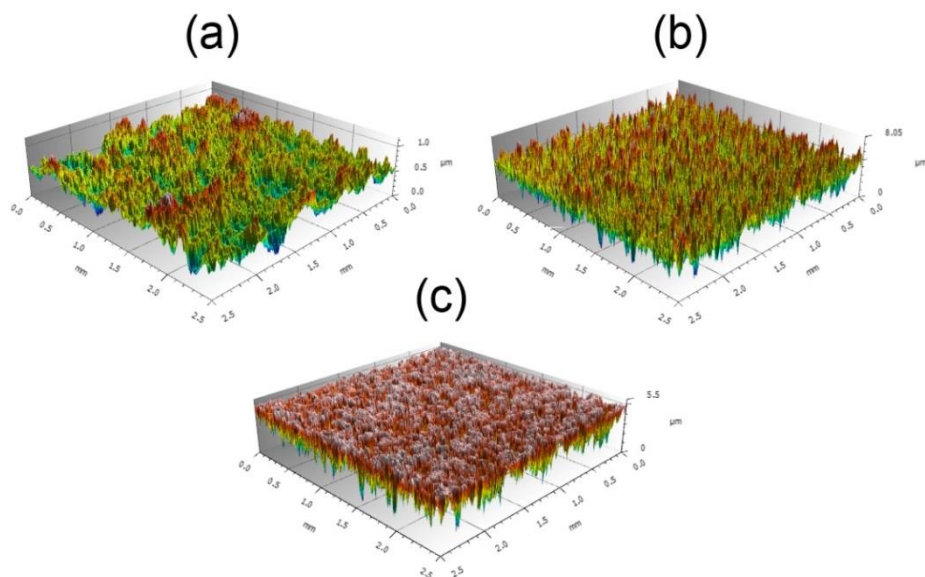


Rys. 2.6. Graficzna interpretacja parametrów Spq , Svq i Smq .

Taki sposób opisu powierzchni losowej dwuprosesowej przydatny jest podczas jej modelowania. Polega ono na nakładaniu na siebie dwóch topografii powierzchni: powierzchni dolin o odchyleniu standardowym nierówności równym wartości parametru Svq powierzchni dwuprosesowej, powierzchni wierzchołkowej o odchyleniu standardowym nierówności równym wartości parametru Spq powierzchni dwuprosesowej. Pionowa odległość tych powierzchni od siebie zależy od wartości parametru Smq powierzchni dwuprosesowej. Rzędna każdego punktu wynikowej powierzchni dwuprosesowej jest równa mniejszej rzędnej obu nakładanych powierzchni. Zarówno powierzchnia dolin, jak i wgłębien charakteryzowana jest długościami korelacji w kierunkach wzajemnie prostopadłych. Rys. 2.7. przedstawia przykład powstawania powierzchni dwuprosesowej izotropowej.

Taka procedura modelowania była stosowana przez innych badaczy, między innymi przez autorów publikacji [84].

Procedura ta zapewnia lepsze dopasowanie powierzchni rzeczywistej do mierzonej w przypadku małych (ujemnych) wartości parametru Ssk (dużych wartości stosunku Svq/Spq). Stosując procedurę iteracyjną, można zapewnić dobre dopasowanie długości korelacji wynikowej powierzchni dwuprosesowej [81, 183, 184].



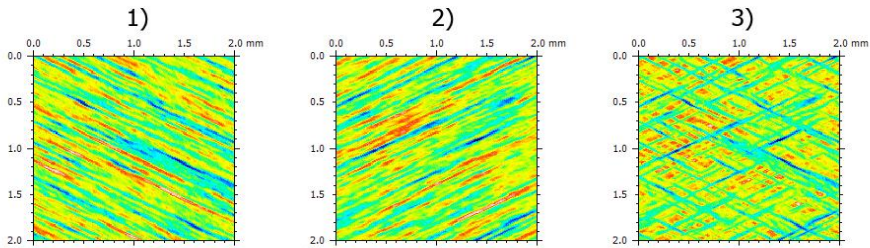
Rys. 2.7. Przykład generowania komputerowego izotropowej powierzchni dwuprosocowej: powierzchnia dolin: $S_q = 1 \mu\text{m}$, długość korelacji = $250 \mu\text{m}$ (a), powierzchnia wierzchołkowa: $S_q = 1 \mu\text{m}$, długość korelacji = $50 \mu\text{m}$ (b), powierzchnia dwuprosocowa: $S_{pq} = 0.1 \mu\text{m}$, $S_{vq} = 1 \mu\text{m}$, $S_{mq} = 84.13\%$ [171]

Można nakładać na siebie powierzchnie modelowane, rzeczywiste lub rzeczywistą na modelowaną. Oprócz modelowania dwuprosocowych powierzchni obrabianych metoda ta może być przydatna do modelowania powierzchni o wartościach zużycia nieprzekraczających początkowej wysokości chropowatości. Takie powierzchnie są bowiem strukturami dwu- lub wieloprosocowymi [61, 63, 64, 82, 83, 84, 90, 118, 154]. We wcześniejszych pracach [135, 207, 208, 209, 210] modelowano strukturę geometryczną powierzchni zużytych przez odcinanie części wierzchołkowej równoległe do linii (płaszczyzny) średniej. Taka procedura nie zapewniła jednak dobrego przybliżenia parametrów SGP, zwłaszcza charakteryzującego część wierzchołkową powierzchni.

Zauważono pewną własność niektórych powierzchni, która polega na podobieństwie ich mikronierówności, niezależnie od skali powiększenia. Takie powierzchnie nazywane są powierzchniami fraktalnymi. Fraktale samopodobne można opisać jednym parametrem, niebędącym liczbą naturalną. Natomiast fraktale samoafiniczne mają różne współczynniki zmniejszania w różnych kierunkach. Uważa się, że powierzchnie inżynierskie mogą być samoafiniczne [131, 187]. Powierzchnie o strukturze deterministycznej nie mają charakteru fraktalnego. Whitehouse [233] ostrzega przed bezkrytycznym stosowaniem opisu fraktalnego. Zwłaszcza zastosowanie analizy fraktalnej do powierzchni po

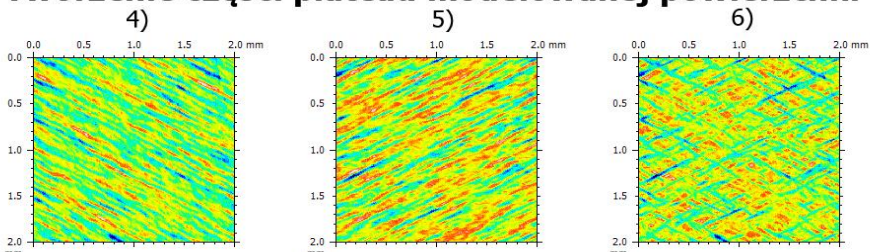
obróbce ściernej może budzić wątpliwości, bowiem ziarna ściernie mają ściśle określony geometryczny kształt. Pomimo to analiza fraktalna jest nadal popularna. Stosuje się również generowanie topografii powierzchni fraktalnych [54, 98, 132, 147, 187, 258]. Modelowanie powierzchni fraktalnych jest szczególnie przydatne w mechanice styku [147, 258], ponieważ parametry styku zależą od stosowanego kroku próbkowania.

Tworzenie części dolin modelowanej powierzchni



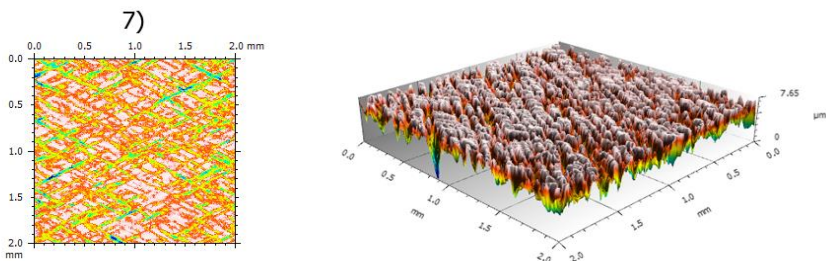
1. Komputerowe generowanie powierzchni ukierunkowanej, obróconej o kąt ϕ
2. Komputerowe generowanie powierzchni ukierunkowanej, obróconej o kąt $180^\circ - \phi$
3. Wynik składania powierzchni 1 i 2 ($S_q = S_{vq}$)

Tworzenie części plateau modelowanej powierzchni



4. Komputerowe generowanie powierzchni ukierunkowanej, obróconej o kąt ϕ
5. Komputerowe generowanie powierzchni ukierunkowanej, obróconej o kąt $180^\circ - \phi$
6. Wynik składania powierzchni 4 i 5 ($S_q = S_{pq}$)

Tworzenie powierzchni dwuprosocowej



7. Powierzchnia 6 nałożona na powierzchnię 3; odległość pomiędzy ich płaszczyznami średnimi wynosi: $SPd = S_{mq}(S_{pq} - S_{vq})$

Rys. 2.8. Procedura generowania komputerowego SGP cylindra po gładzeniu płaskowierzchołkowym [182]

Autor publikacji [160] do modelowania SGP o danych parametrach zastosował sieci neuronowe. Metoda ta jest przydatna podczas analizy wpływu parametrów procesu na parametry topografii powierzchni.

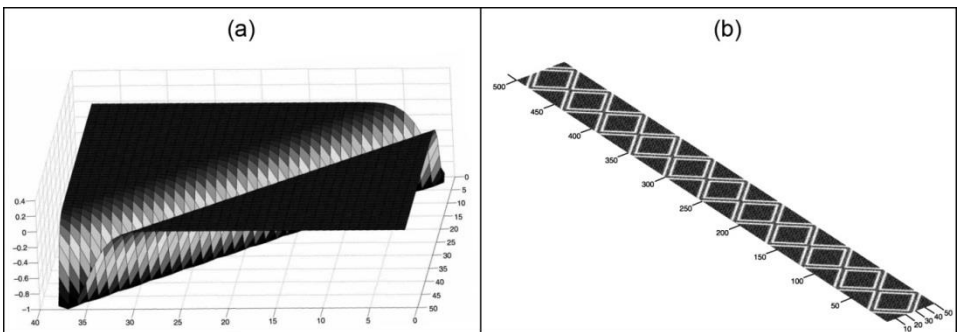
Opisane powyżej metody modelowania są utrudnione w przypadku powierzchni cylindrów po gładzeniu płaskowierzchołkowym. Proponowana procedura polega na nakładaniu powierzchni skrzyżowanych o normalnych rozkładach rzędnych. W pierwszym etapie powstaje struktura obrócona (taka jak na rys. 2.5.), o kąt φ równy połowie kąta gładzenia. Następnie początkową powierzchnię anizotropową obraca się o kąt $180^\circ - \varphi$, po czym nakłada się otrzymane struktury. W ten sposób tworzona jest powierzchnia części dolin oraz części wierzchołkowej – plateau. Obie powierzchnie również są na siebie nakładane. Procedurę generowania komputerowego powierzchni cylindra przedstawia rys. 2.8.

Ciekawą propozycją jest tworzenie stereometrii powierzchni gładzonych cylindrów na podstawie pomiaru profili osiowych [186]. Jabłoński [88] generował komputerowo powierzchnie cylindrów gładzonych płaskowierzchołkowo poprzez nakładanie powierzchni fraktalnej na głębokie rysy.

W celu analizy smarowania modeluje się powierzchnię skrzyżowaną cylindrów po gładzeniu. Autorzy prac [3, 13, 14, 15, 21, 76, 91, 138, 140, 141, 157, 202, 206] w celu analizy smarowania układu pierścieni tłokowy – cylinder modelowali kształt rys, przyjmując gładką strukturę między rysami. Jocsak i inni [91] oraz Spencer i inni [202] zastosowali wielomian do modelowania SGP cylindra zawierającej rysy gładzenia, otrzymując struktury skrzyżowane. Autorzy publikacji [202] zastosowali następujące równanie:

$$h_T(x, y) = 10^{-\omega(x+ky)^2} \cos[2\pi(x + ky)]$$

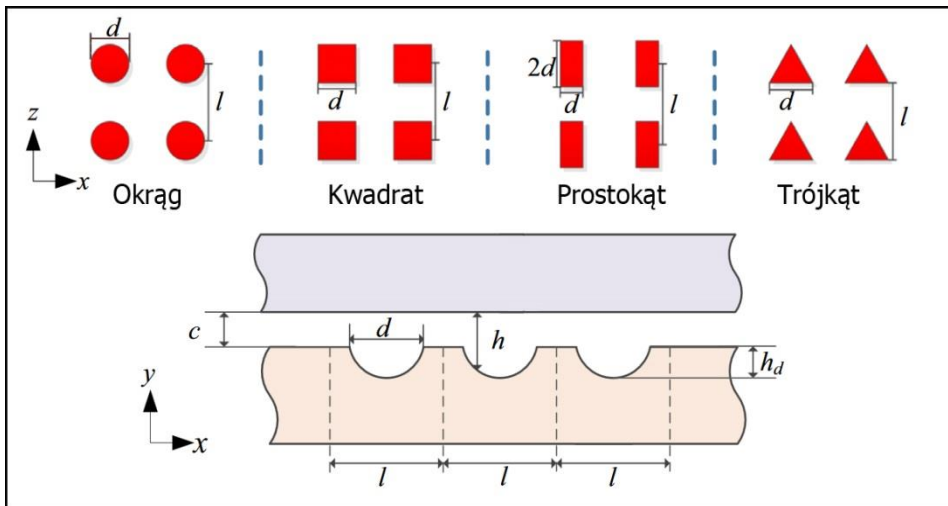
gdzie h_T jest wysokością nierówności, ω opisuje szerokość rys gładzenia, zaś k jest funkcją kąta gładzenia. Powyższe równanie opisuje rysę pokazaną na rys. 2.9a.



Rys. 2.9. Kształt generowanej rysy (a), generowana SGP według [202]

Podobne podejście zastosowali Biboulet i inni [15, 21] oraz Mezghani i inni [138]. Natomiast Michail i Barber zastosowali kosinusoidalną falistą powierzchnię do modelowania powierzchni cylindra po gładzeniu [140, 141].

Wielu badaczy w celu analizy wpływu nierówności powierzchni na smarowanie modelowało powierzchnie teksturowane. Przykładowo Zhang i inni [259] generowali komputerowo powierzchnie zawierające kieszenie smarowe o różnych kształtach (rys. 2.10.).



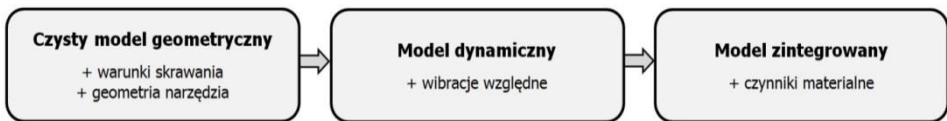
Rys. 2.10. Geometryczny model powierzchni teksturowanych (na podstawie [259])

Stosowanie modelowania nieuwzględniającego warunków tworzenia powierzchni ma znaczenie praktyczne. Może ono pozwalać na przewidywanie kształtu topografii powierzchni zapewniającej korzystniejsze parametry eksploatacyjne od powierzchni obrobionych. Jest stosowane do modelowania smarowania [3, 13, 14, 15, 21, 76, 91, 138, 140, 141, 157, 202, 206], styku powierzchni chropowatych [147, 258] lub zużycia [84, 135, 208]. Modelowanie wykorzystuje się w metrologii powierzchni. Przykładem mogą być wzorce programowe [2, 236, 237]. SGP modelowanych służy ponadto do badań wpływu błędów pomiarów na niepewność pomiaru struktury geometrycznej powierzchni [170]. Topografie wirtualne mogą być również przydatne w badaniach emisyjności, refleksyjności optycznej, odporności korozyjnej, przyczepności powłok itp. Ten rodzaj modelowania jest stosowany przede wszystkim do powierzchni losowych lub okresowo-losowych. Wydaje się, że modelowanie powierzchni losowych jednoprosesowych zostało już gruntownie przeanalizowane. Pewnym problemem jest modelowanie powierzchni jednokierunkowych o dużej długości korelacji w jednym kierunku. Niewiele jest prac dotyczących modelowania powierzchni

skrzyżowanych, a zwłaszcza powierzchni o warstwowych właściwościach funkcjonalnych (taką powierzchnią jest powierzchnia cylindra po honowaniu płaskowierzchołkowym). W większości publikacji analizuje się jedynie wpływ kształtu rys honowniczych i kąta honowania na opory tarcia, bez analizy powierzchni między wgłębieniami. Może to prowadzić do znacznych błędów. Tendencją rozwojową jest modelowanie powierzchni zawierających niepołączone ze sobą kieszenie smarowe. Należy tu uwzględnić również chropowatość powierzchni między wgłębieniami.

2.3. Modelowanie odzwierciedlające rzeczywiste warunki tworzenia powierzchni

Wśród metod prognozowania chropowatości powierzchni po obróbce skrawaniem istnieją metody opierające się na teorii skrawania (uwzględniające kinematykę procesu, narzędzia tnące, powstawanie wiórów itd.) oraz metody oparte na eksperymencie, badające wpływ różnych czynników na chropowatość powierzchni [13]. Wśród tych ostatnich należy wyróżnić metody sztucznej inteligencji (wykorzystujące najczęściej sieci neuronowe). Generowanie topografii powierzchni jest przydatne do zrozumienia mechanizmu powstawania powierzchni, przewidywania chropowatości powierzchni oraz optymalizacji parametrów obróbki przy zmniejszeniu kosztów badań doświadczalnych. Należy uwzględniać nie tylko geometrię narzędzia i powierzchni, ale również dynamikę procesu z uwzględnieniem drgań [257] – rys. 2.11. Modele pokazane na rys. 2.11., uwzględniające jedynie posuw i promień zaokrąglenia ostrza, nie są dokładne – należy uwzględnić inne czynniki.

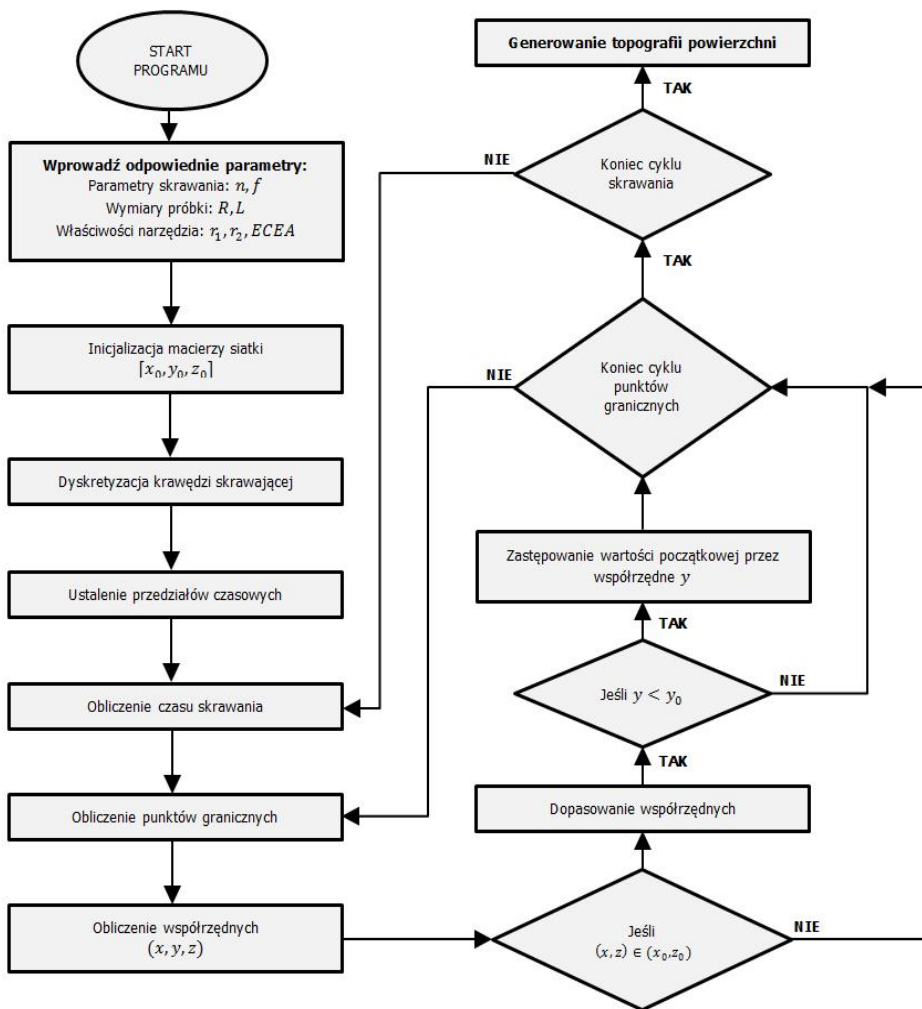


Rys. 2.11. Rozwój generowania powierzchni po dokładnej obróbce wiórowej (na podstawie [257])

Dodatkową korzyścią modelowania nierówności powierzchni po procesach obróbkowych jest możliwość wyboru warunków pomiarów rzeczywistej SGP wraz z parametrami chropowatości [28].

Wielu badaczy zajmowało się modelowaniem struktury geometrycznej powierzchni uzyskanych podczas toczenia i frezowania.

Zhang i Liu [256] modelowali strukturę geometryczną powierzchni toczo-nych na podstawie równań ruchu krawędzi tnącej. Rys. 2.12. pokazuje schemat modelowania.

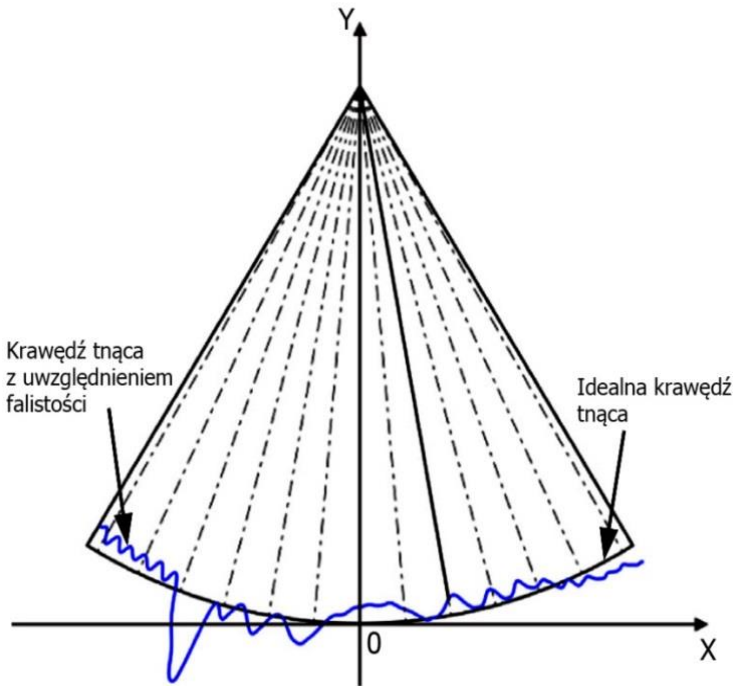


Rys. 2.12. Schemat modelowania topografii powierzchni tocznej [256]

He i inni [75] w modelowaniu SGP po procesie toczenia diamentem uwzględnili między innymi falistość krawędzi tnącej (rys. 2.13.).

Grzesik [69] zastosował mechaniczno-molekularną teorię tarcia do przewidywania wysokości chropowatości po procesie toczenia. Autor publikacji [111] uwzględnił podczas modelowania SGP po precyzyjnym toczeniu takie zakłócenia procesu, jak drgania lub defekty krawędzi skrawającej. Błędy wrzeczona prowadzące do przemieszczeń pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym były uwzględnione w modelu opisanym w pracy [250]. Prognozowaniem wpływu błędów procesu toczenia na kształt nierówności zajmował się Boryczko [19,

20], generując komputerowo profile powierzchni toczonych zawierające zakłócenia przemieszczeń z procesu obróbkowego. Autorzy pracy [106] wykazali, że w warunkach dokładnego toczenia konieczne jest w prognozowaniu wysokości nierówności uwzględnienie głębokości szczyrбатыości krawędzi skrawającej.



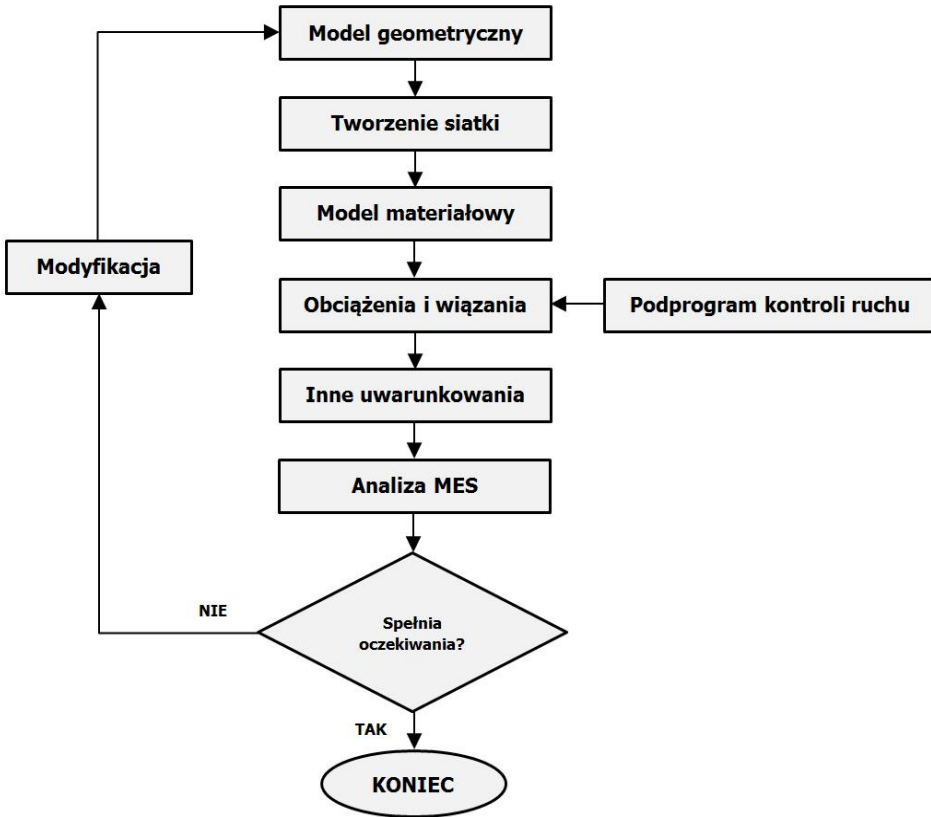
Rys. 2.13. Rzeczywisty i idealny kształt krawędzi tnącej (ang. *cutting edge*), na podstawie [75]

Autorzy publikacji [248] modelowali chropowatość sferycznych powierzchni po procesie toczenia z użyciem narzędzia diamentowego. Do modelowania zastosowano metodę elementów skończonych (MES). W modelu uwzględniono drgania układu: narzędzie – przedmiot obrabiany. Rys. 2.14. przedstawia schemat symulacji.

Autorzy artykułu [124] modelowali powierzchnię po toczeniu z uwzględnieniem kinematyki procesu i kształtu narzędzia tnącego. Model posłużył do analizy wpływu drgań na chropowatość powierzchni.

Kolejny zespół naukowców podczas generowania powierzchni toczonej uwzględnił następujące czynniki: parametry skrawania i geometrię krawędzi tnącej, drgania oraz pozostałe czynniki, biorąc po uwagę między innymi deformację plastyczną oraz zużycie narzędzia [6].

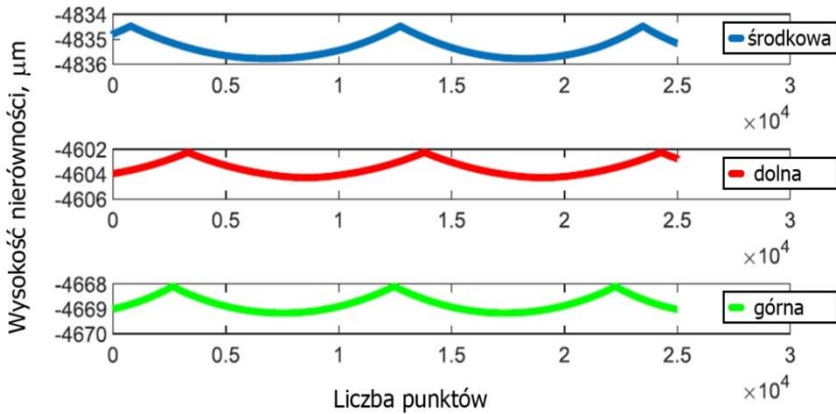
Autorzy pracy [32] prognozowali profile powierzchni po toczeniu z zastosowaniem szybkiej transformaty Fouriera.



Rys. 2.14. Schemat symulacji procesu toczenia [248]

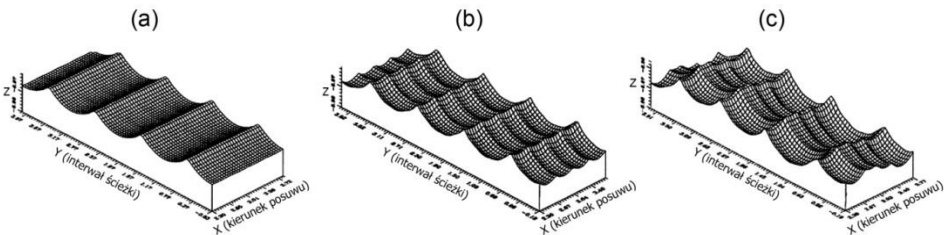
Pontes i inni [176] zastosowali sieci neuronowe RBF do prognozowania wartości parametru Ra powierzchni po toczeniu. Autorzy pracy [1] prognozowali wartość parametru Ra powierzchni po toczeniu z wykorzystaniem wielowymiarowej regresji liniowej i sztucznych sieci neuronowych. Agrawal i inni [4] do prognozowania parametru chropowatości stali po toczeniu zastosowali trzy modele regresji wielowymiarowej. Autorzy publikacji [139] prognozowali wartość parametru chropowatości Ra po toczeniu w zależności od parametrów procesu z użyciem sieci neuronowych. Suresh i inni [212] zastosowali procedurę dwuetapową do prognozowania wysokości nierówności powierzchni po toczeniu. Początkowo otrzymali wielomian 2. stopnia określający wpływ czynników na chropowatość powierzchni. Czynniki wejściowymi były parametry procesu: prędkość, głębokość skrawania, posuw i promień zaokrąglenia ostrza. Zastosowano program kompletny, obejmujący 3^4 czyli 81 doświadczeń. Następnie wykorzystano algorytmy genetyczne w celu otrzymania warunków obróbki dla zadanej nierówności powierzchni.

W pracy [222] modelowano proces powstawania powierzchni próbki w procesie frezowania z wykorzystaniem frezów segmentowych o kształcie kołowym, uwzględniając trajektorie krawędzi tnących narzędzia. Otrzymano profile charakterystyczne dla obróbki skrawaniem (rys. 2.15.).



Rys. 2.15. Modelowane profile nierówności przedmiotu obrabianego w różnych miejscach kontaktu z narzędziem po frezowaniu (na podstawie [222])

Autorzy prac [109, 110] uwzględnili w modelowaniu stereometrii powierzchni frezowanej ślady freza (ang. *cutter mark*) oraz bicie (rys. 2.16.).

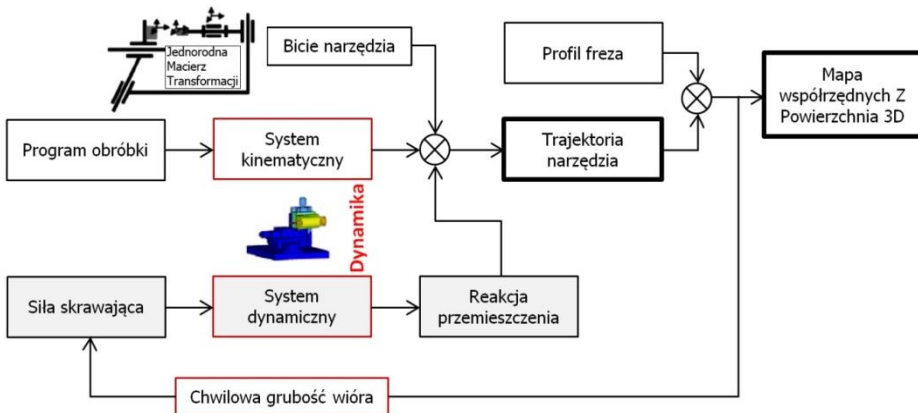


Rys. 2.16. Stereometria powierzchni po frezowaniu: podejście klasyczne (a), uwzględnienie śladu freza (b), uwzględnienie śladu freza i bicie (c)

Chen i inni [26] opracowali proces generowania komputerowego stereometrii powierzchni po mikrofrezowaniu, uwzględniając różne czynniki, w tym kinematykę i dynamikę procesu oraz bicie (rys. 2.17.). Otrzymano dużą zgodność powierzchni modelowanych z rzeczywistymi, dlatego model może służyć do prognozowania topografii powierzchni przy danych parametrach procesu.

Muñoz-Escalona oraz Mauropulos zaprezentowali geometryczny model prognozowania chropowatości powierzchni po frezowaniu czołowym z wykorzystaniem kwadratowych płytek skrawających [127].

W publikacji [126] przedstawiono metodę prognozowania wartości parametru Ra dla powierzchni frezowanych frezami palcowymi w zależności od mocy skrawania niezbędnej do usunięcia 1 mm^3 obrabianego materiału (SCEC). W proponowanej metodzie wartość SCEC (ang. *Specific Cutting Energy Consumption*), rozumianej jako energia skrawania zużywana przez ostrze narzędzia w celu usunięcia 1 mm^3 materiału, obliczono m.in. na podstawie głębokości skrawania, wartości posuwu, prędkości obrotowej wrzeciona oraz wartości składowych sił skrawających.



Rys. 2.17. Idea metody symulacji powierzchni po mikrofrezowaniu [26]

Autorzy pracy [34] symulowali topografię powierzchni po frezowaniu końcówką kulistą, biorąc pod uwagę kinematykę procesu oraz zakłócenia przez dodawanie powierzchni stochastycznej. Wojciechowski i inni [240] modelowali wpływ różnych czynników, w tym grubości wióra i bicia narzędzia na maksymalną wysokość profilu chropowatości po frezowaniu końcówką kulistą. W pracy [239] uwzględnili zmiany siły skrawania i związane z nimi przemieszczenia narzędzia w modelowaniu chropowatości powierzchni po frezowaniu cylindrycznym. Jest to istotne, ponieważ dotychczasowe modele brały pod uwagę tylko bicie statyczne [45, 192].

Autorzy pracy [42] zastosowali model frezowania czołowego oparty na kinematyce procesu i kształcie krawędzi skrawającej. Modelowano kształt profili nierówności, osiągając dobre przybliżenie parametrów chropowatości profilu symulowanego do rzeczywistego.

Autorzy publikacji [72] modelowali topografię powierzchni po frezowaniu czołowym, uwzględniając parametry procesu oraz kształt narzędzia. Badania prowadzono w celu optymalizacji parametrów procesu oraz przewidywania kształtu tekstury powierzchni. Modelowanie przeprowadzono w środowiskach Matlab i CAD.

Miko w modelu chropowatości powierzchni frezowanych walcowo uwzględnili: stereometryczno-kinematyczne odwzorowanie ostrzy freza, nieusuwalną część nadkładu obróbkowego, przemieszczenia względne freza i materiału obrabianego, bicie promieniowe ostrzy freza i zużycie ostrzy skrawających [144].

Zastosowano sieci neuronowe w celu prognozowania wysokości chropowatości powierzchni (parametru Ra) po frezowaniu czołowym [14].

Analizowano wpływ parametrów procesu na wartości parametru Ra powierzchni po frezowaniu szybkościowym (ang. *high-speed flat end milling*) [157] z wykorzystaniem rotatabilnego planu kompozycyjnego eksperymentu.

Podobnie jak w przypadku obróbki skrawaniem, badania dotyczące prognozowania kształtowania SGP po obróbce ścierniej można podzielić na analityczne i doświadczalne.

Wiele uwagi poświęca się modelowaniu procesu szlifowania. W odróżnieniu od obróbki narzędziem o zdeterminowanej geometrii ostrza stosuje się rozkłady odległości między ziarnami ściernymi lub rozkłady wymiarów ziaren. Symulacja procesu obróbki najczęściej polega na komputerowym generowaniu ściernicy oraz analizie kinematycznej obróbki [37]. Można również modelować oddziaływanie rzeczywistej (mierzonej) powierzchni ściernicy na topografię powierzchni szlifowanej [86].

Podczas modelowania powierzchni ściernicy należy wyodrębnić opisujące ją parametry. Nguyen i Butler [150] analizowali wpływ parametrów ściernicy na strukturę geometryczną powierzchni obrabianej. Do parametrów charakteryzujących ściernicę zaliczyli: Spd , Spc i Sq . Kacalak i inni [101] przedstawili metodę modelowania powierzchni czynnej narzędzi ściernych. Zawiera ona między innymi algorytmy generowania rozmieszczenia ziaren. Metoda uwzględnia współzależności położenia ziaren sąsiadujących z użyciem funkcji autokorelacji. Dla modelu topografii powierzchni ściernicy powinny być znane położenie i cechy geometryczne każdego ziarna na jej powierzchni, co umożliwia analizowanie kontaktów poszczególnych ziaren w strefie szlifowania [11, 100]. W pracy [17] rozważano zastosowanie metody MOTIF do analizy powierzchni ściernicy. Z kolei autorzy publikacji [123] analizowali związek wymiaru fraktalnego profilu ściernicy z jej zdolnością do skrawania. Bazan [12] w swojej pracy doktorskiej opracowała równania regresji wiążące parametry procesu oraz wyselekcjonowane parametry topografii powierzchni ściernicy z cBN z wartościami parametru Sdq powierzchni obrabianej.

Czynniki wpływające na topografię powierzchni w procesie szlifowania dzielimy na geometryczne, zakłócenia i mieszane [188].

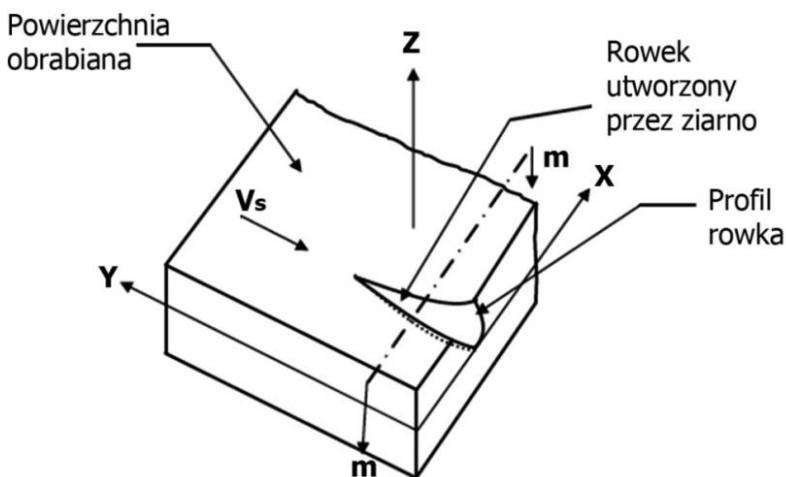
Do celów modelowania kształtowania obrabianej powierzchni w procesie szlifowania należy między innymi:

- wyznaczenie zmian stereometrii powierzchni obrabianej dla parametrów procesu wykraczających poza standardowe,

- wyznaczenie wpływu cech narzędzi, a także parametrów i warunków obróbki na wartości parametrów stereometrii powierzchni obrabianej,
- wyznaczenie wpływu zakłóceń procesu na przebieg i wynik procesu szlifowania.
- analiza procesów z wykorzystaniem nowych typów narzędzi [11, 102, 104].

Autorzy publikacji [96] modelowali proces cylindrycznego szlifowania przelotowego, uwzględniając falistość powierzchni obrabianej.

Agarwal i Rao prognozowali chropowatość powierzchni wykonanej z ceramiki po szlifowaniu, uwzględniając współdziałanie ziaren ściernych z powierzchnią obrabianą (rys. 2.18.) [3]. Przyjęto stochastyczny charakter procesu szlifowania (losową geometrię i losowy rozkład krawędzi tnących). Podobne założenia zastosowano w pracy [108], uzyskując podobne wartości parametru Ra powierzchni modelowanych i symulowanych.



Rys. 2.18. Schematyczny widok próbki w kartezjańskim układzie współrzędnych (na podstawie [3])

Kacalak i inni [99] opracowali metodykę modelowania procesu szlifowania płaszczyzn z zastosowaniem ściernic o stożkowej powierzchni czynnej.

Autorzy artykułu [8] modelowali profile nierówności powierzchni po szlifowaniu, uwzględniając termomechaniczną deformację materiału obrabianego. Modelowano SGP ściernicy na podstawie jej pomiaru. Otrzymano zgodność profili mierzonych z symulowanymi.

W artykule [97] przedstawiono metodykę generowania topografii powierzchni szlifowanej z wykorzystaniem randomizowanego kumulowania wartości składowych o różnym wymiarze fraktalnym.

Haifeng i inni modelowali chropowość powierzchni kół zębatych po szlifowaniu. Założono działanie wielu ziaren o stożkowym kształcie i o losowym rozkładzie wysokości [73].

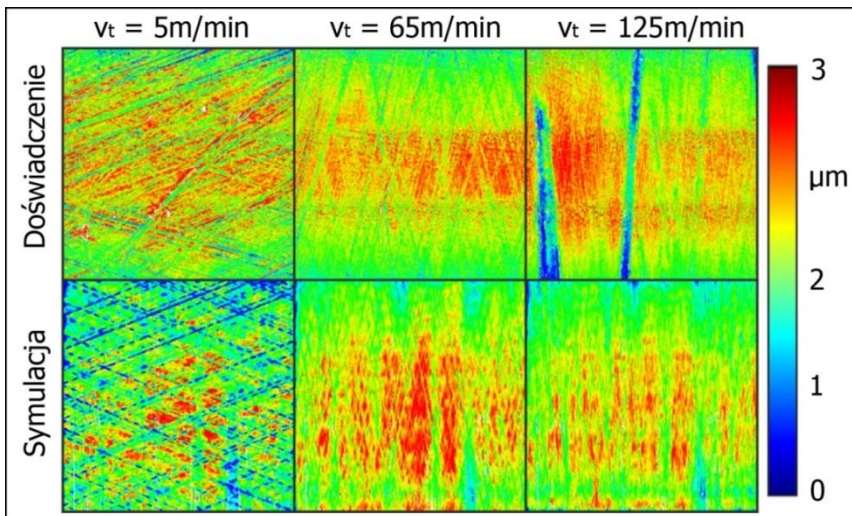
Autorzy pracy [228] modelowali chropowości powierzchni kół walcowych po szlifowaniu. Założono występowanie jedynie mikroskrawania. Ziarna o tym samym rozmiarze były rozłożone równomiernie na powierzchni ściernicy.

W modelowaniu powierzchni po obróbce ścierniczej przydatny jest system oceny struktury geometrycznej powierzchni uwzględniający współzależności pomiędzy parametrami [103, 220].

Zastosowano sieci neuronowe do prognozowania wartości parametru S_a powierzchni szlifowanej w zależności od parametrów procesu [125].

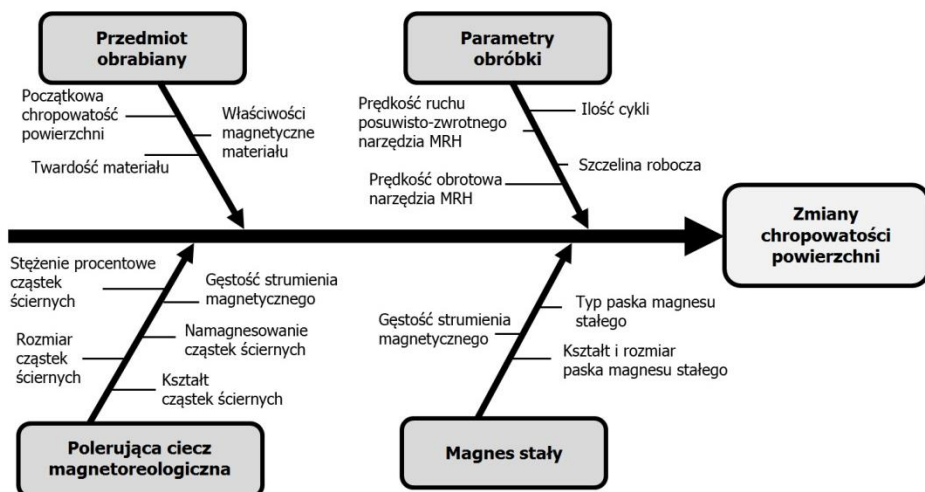
Nieco bardziej skomplikowane jest generowanie komputerowe powierzchni powstałej w procesie gładzenia cylindrów. Proces ten został opisany w rozdziale czwartym niniejszej pracy.

Autorzy prac [94, 107] modelowali proces gładzenia, analizując zmienne w czasie pozycje narzędzia i próbki. W zależności od nacisków jednostkowych korygowano promień narzędzia. Rys. 2.19. pokazuje mapy konturowe modelowanych i mierzonych topografii powierzchni przy różnych prędkościach stycznych.



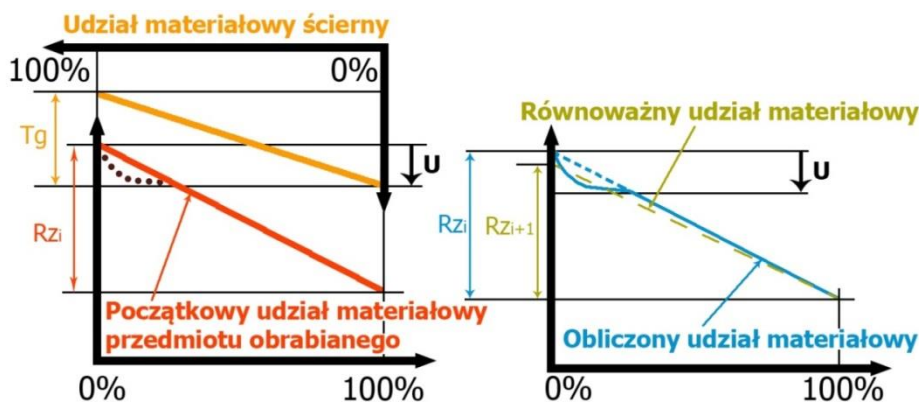
Rys. 2.19. Mapy konturowe modelowanych i mierzonych topografii powierzchni przy różnych prędkościach stycznych (na podstawie [107])

Grover i Singh modelowali zmianę parametru Ra powierzchni cylindrycznej po magnetoreologicznym gładzeniu (ang. *magnetorheological honing*, MRH), biorąc pod uwagę parametry obróbki (rys. 2.20.).



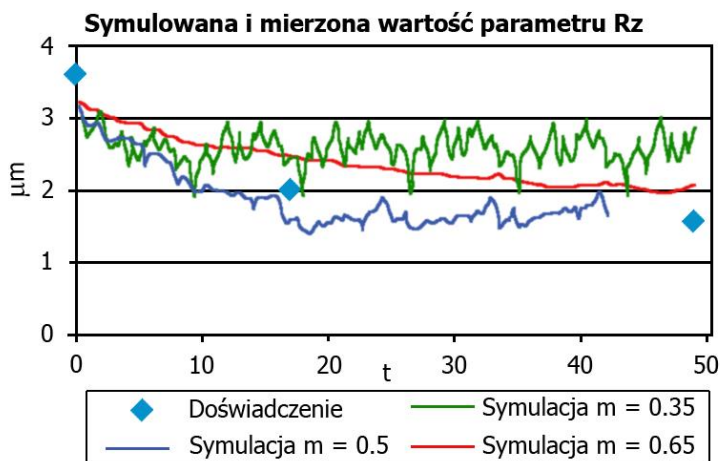
Rys. 2.20. Parametry procesu wpływające na chropowatość powierzchni po gładzeniu MRH (na podstawie [68])

Goedel i inni [56] modelowali zmianę topografii powierzchni cylindra podczas procesu gładzenia. Zastosowano linearyzację wykresu udziału materiałowego (rys. 2.21.).



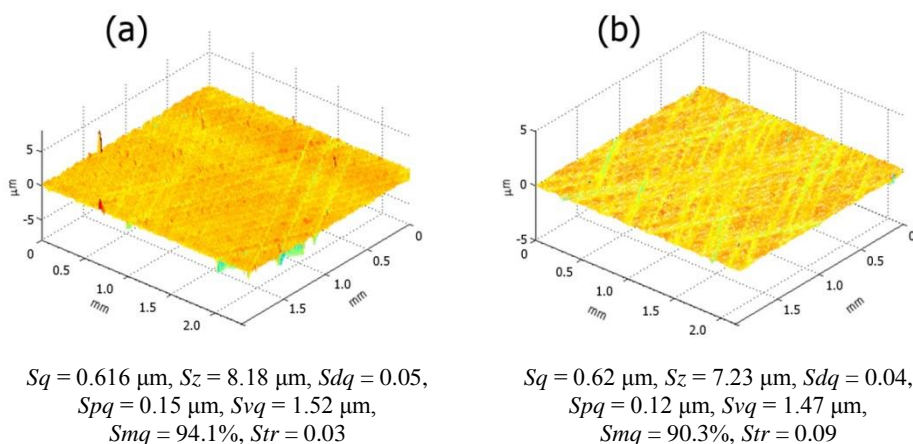
Rys. 2.21. Modyfikacja wykresu udziału materiału podczas gładzenia. (a) Nakładanie powierzchni oselki na powierzchnię cylindra, (b) nowy wykres udziału materiału (na podstawie [56])

Joliet i inni [94, 95] modelowali powstawanie powierzchni w procesie honowania przy nastawnej sile, zakładając usuwanie materiału w punkcie przecięcia oselki i przedmiotu obrabianego. Rys. 2.22. pokazuje symulowane i mierzone wartości parametru Rz SGP cylindra (parametr m jest powiązany z naciskami jednostkowymi podczas honowania).



Rys. 2.22. Mierzone i symulowane wartości parametru Rz SGP cylindra w czasie (na podstawie [94])

Autorzy artykułu [181] przeprowadzili proces gładzenia płaskowierchołkowego tulei cylindrowych. Zmieniane były 2 parametry procesu: ciśnienie układu rozprężania głowicy podczas gładzenia wykończeniowego p_v oraz czas gładzenia ostatecznego t . Badania przeprowadzono zgodnie z ortogonalnym selekcyjnym planem eksperymentu. Na podstawie zależności otrzymano równania regresji wiążące parametry procesu z parametrami nierówności powierzchni cylindrów. Na tej podstawie modelowano topografie powierzchni tulei (rys. 2.23.).



Rys. 2.23. Widoki izometryczne zmierzonej (a) i modelowanej (b) topografii powierzchni tulei cylindrowych dla następujących parametrów procesu: $p_v = 4.5 \text{ MPa}$, $t = 15.3 \text{ s}$ (na podstawie [181])

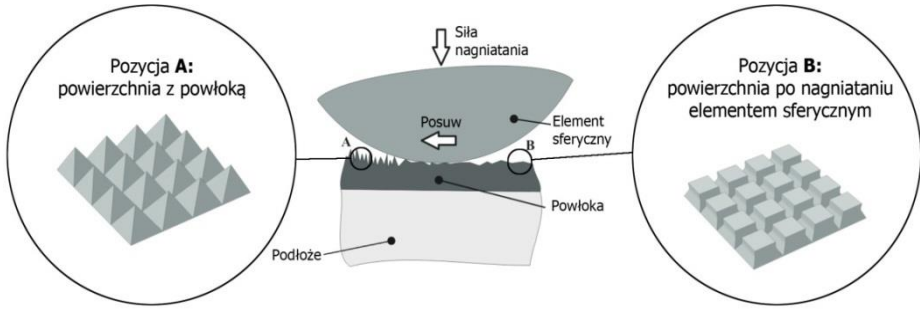
W pracy [197] prognozowano chropowatość powierzchni kół zębatych skonycznych po honowaniu elektrochemicznym. Ubytek materiału w związku z mechanicznym aspektem procesu modelowano zgodnie z równaniem Archarda (określającym objętość materiału usuniętego wskutek zużycia). Po każdym cyklu obliczano wartość parametru Rz próbki.

Buj-Corral i inni [23] na podstawie wyników badań procesu gładzenia modelowali wpływ parametrów tego procesu na wartości parametrów Ra i Rt chropowatości powierzchni cylindrów. W badaniach zastosowano centralny plan kompozycyjny. Autorzy publikacji [200] prognozowali wartości parametrów chropowatości: Rk , Rpk i Rvk z wykorzystaniem sieci neuronowych. Podobne badania przeprowadzili autorzy publikacji [43].

Stosuje się modelowanie nierówności powierzchni po innych rodzajach obróbki ścierniej. Autorzy publikacji [145] zaproponowali model prognozowania nierówności powierzchni po obróbce ścierniej wykończeniowej wspomaganą drganiem ultradźwiękowymi. Założono, że stopień zmiany SGP próbki obrabianej będzie proporcjonalny do prędkości usuwania materiału oraz do objętości materiału na powierzchni próbki. Określono również minimalną chropowatość próbki. Schwartztruber i inni [193] modelowali nierówności powierzchni (w układach 2D i 3D) po obróbce erozyjnej (ang. *abrasive waterjet machining*) w zależności od parametrów procesu. Autorzy artykułów [167, 169] zastosowali ortogonalny plan selekcyjny w celu analizy związków pomiędzy parametrami obróbki strumieniowo-ścierniej a parametrami struktury geometrycznej powierzchni próbek. Na tej podstawie modelowali profile i stereometrię powierzchni obrabianych.

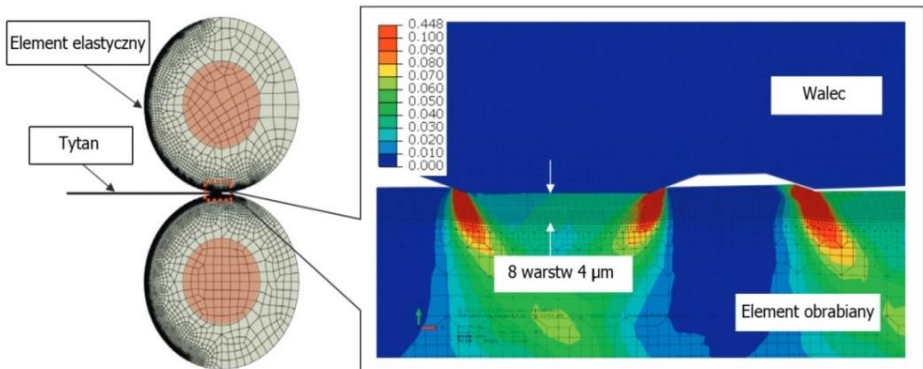
Wprowadzenie drgań wysokoczęstotliwościowych powoduje zmniejszenie wysokości chropowatości powierzchni. Jest to stosowane między innymi w procesach przeróbki plastycznej, obróbce ścierniej i przyrostowej. Autorzy pracy [249] prognozowali zmniejszenie wysokości nierówności z wykorzystaniem mechaniki styku, stosując model kontaktu sprężysto-plastycznego CEB (skrót pochodzi od pierwszych liter nazwisk autorów modelu: Chang – Etsion – Body) [25].

Stosuje się ponadto generowanie powierzchni po nagniataniu. Autorzy pracy [9] modelowali SGP po kulkowaniu (ang. *shot peening*) z użyciem metody elementów skończonych. Taro i inni [105] prognozowali chropowatość powierzchni po kulkowaniu na podstawie odkształceń wywołanych kontaktem sprężysto-plastycznym. W pracy [216] prognozowano wartość parametru Ra na podstawie głębokości wgnieceń powstałych na skutek działania drobin w procesie kulkowania. Autorzy artykułu [77] opracowali analityczny model zmiany wysokości nierówności powierzchni powłoki po nagniataniu ślizgowym elementem sferycznym (rys. 2.24.). Zmiana wysokości nierówności jest powiązana z naciskami jednostkowymi.



Rys. 2.24. Nagniatanie kulką powierzchni powłoki (według [77])

Fujii i inni prognozowali profile powierzchni blach po walcowaniu z użyciem metody elementów skończonych [46] – rys. 2.25.

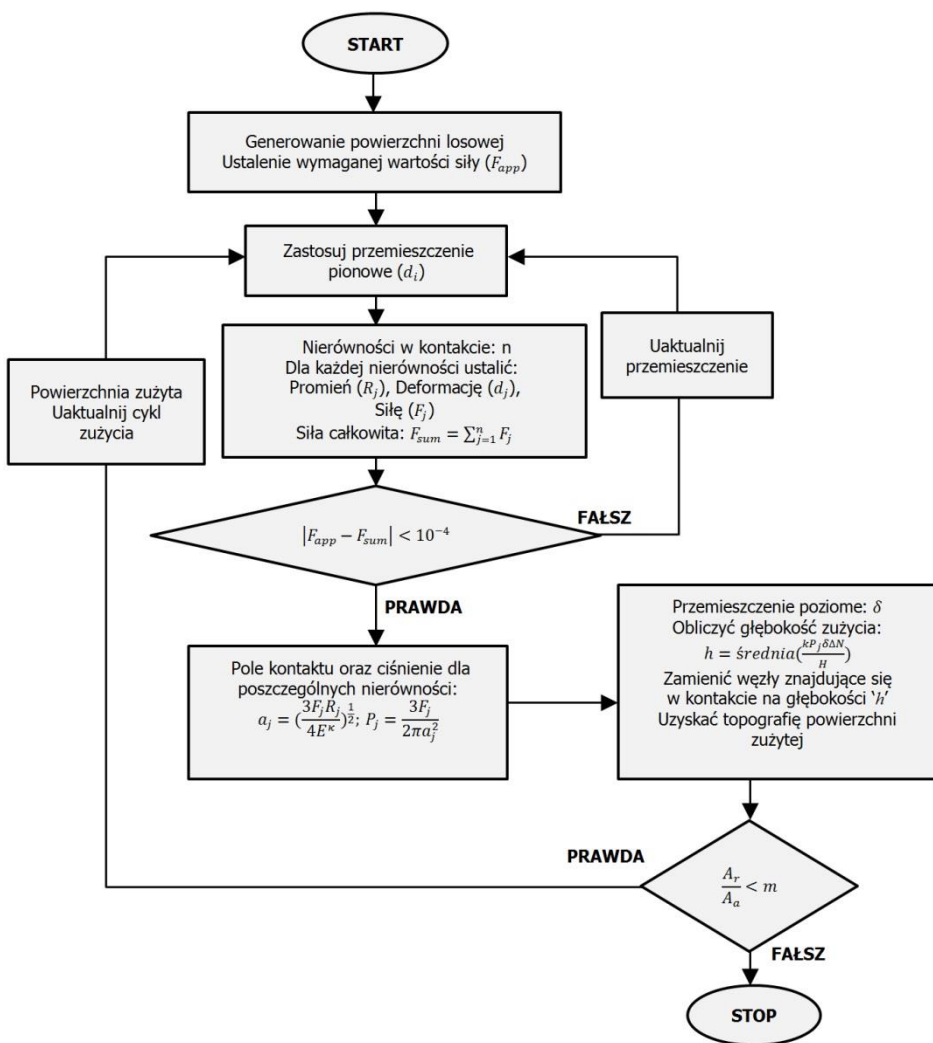


Rys. 2.25. Model MES procesu walcowania [46]

Symuluje się powierzchnie powstałe w wyniku zużycia (przy niewielkich wartościach zużycia) w zależności od czasu badań i parametrów pracy.

Modelowano proces zużycia powierzchni chropowatych z wykorzystaniem mechaniki styku [55]. Dla każdego wierzchołka obliczano parametry styku sprężystego oraz określano zużycie, korzystając ze wzoru Archarda. Zużycie było proporcjonalne do nacisków jednostkowych. Następnie uśredniano wartości zużycia dla poszczególnych wierzchołków i ucinano powierzchnię. Rys. 2.26. przedstawia procedurę generowania powierzchni zużytej. Autorzy prac [76, 206] uwzględnili w prognozowaniu SGP zużytej deformację powierzchni.

Mezghani i inni [137] w celu modelowania wpływu SGP cylindrów po gładzeniu płaskowierzchołkowym na ich tarcie w kontakcie z pierścieniami tłokowymi zastosowali dekompozycję powierzchni na część wierzchołkową i dolin z wykorzystaniem filtrów morfologicznych [33].



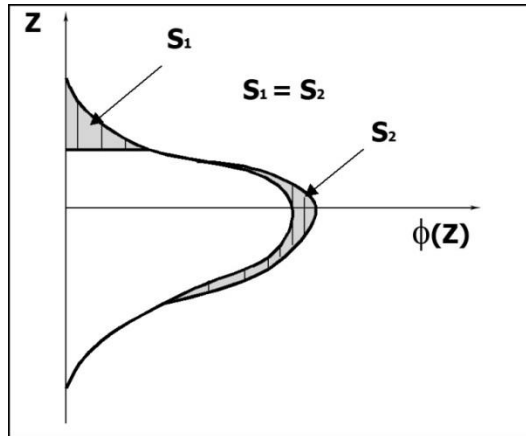
Rys. 2.26. Procedura modelowania powierzchni zużytej (według [55])

W przypadku zachodzenia wyłącznie odkształcenia plastycznego (bez utraty objętości materiału) zakłada się zmianę rozkładu rzędnych (rys. 2.27.). Model ten zapewnił korzystniejsze wyniki w porównaniu z modelem cięcia [89].

Stosuje się również nakładanie profilu lub stereometrii powierzchni o rozkładzie normalnym rzędnych na strukturę geometryczną powierzchni obrabianej [115, 161]. Wysokość nakładanej powierzchni zależy od parametrów pracy.

Modelowanie odzwierciedlające rzeczywiste warunki tworzenia powierzchni umożliwia zbadanie wpływu warunków obróbki na cechy struktury geometrycznej powierzchni. Może uwzględniać wiele różnych czynników, w tym ki-

nematykę ruchów narzędzia względem przedmiotu obrabianego, dynamikę, zakłócenia procesu i inne. Pozwala na zmniejszenie kosztów i czasu badań technologicznych. Można również prognozować zmianę struktury geometrycznej powierzchni w trakcie badań tarcia i zużycia w zależności od parametrów procesu (obciążenia, prędkości, temperatury i innych). Stosowanie modelowania powierzchni zużytych może przynieść znaczne korzyści, ponieważ badania zużycia są żmudne i czasochłonne.



Rys. 2.27. Zmiany rozkładu rzędnych SGP w trakcie zużycia zgodnie z modelem deformacji plastycznej (na podstawie [89])

Modelowanie powierzchni po obróbce skrawaniem opiera się zwykle na geometryczno-kinematycznym odwzorowaniu geometrii ostrza na przedmiocie obrabianym. Ten rodzaj modelowania jest stosowany głównie do powierzchni po toczeniu i frezowaniu. Trudniejsze jest modelowanie powierzchni po obróbce ścierniej. Konieczne jest wówczas modelowanie narzędzia ściernego z wykorzystaniem rozkładów losowych wymiarów ziaren ściernych i odległości między nimi. Dużo prac z tego zakresu dotyczy modelowania procesu szlifowania. Trudniejsze jest modelowanie procesu honowania cylindrów, zwłaszcza honowania płaskowierzchołkowego. Niewiele zamieszczono prac dotyczących modelowania wpływu parametrów honowania na strukturę geometryczną powierzchni cylindrów.

Istotne znaczenie praktyczne ma również modelowanie powstawania powierzchni w trakcie zużycia. Często stosuje się odcinanie części wierzchołkowej powierzchni, chociaż ta metoda zapewnia niedokładne przybliżenie parametrów związanych z wierzchołkami. Mimo że uważa się, że korzystniejsze jest nakładanie powierzchni o normalnym rozkładzie rzędnych na powierzchnię obrabianą, opublikowano dotychczas niewiele prac prezentujących wyniki stosowania

tego rodzaju modelowania. Przy modelowaniu powinno się uwzględnić dominujący charakter zużycia.

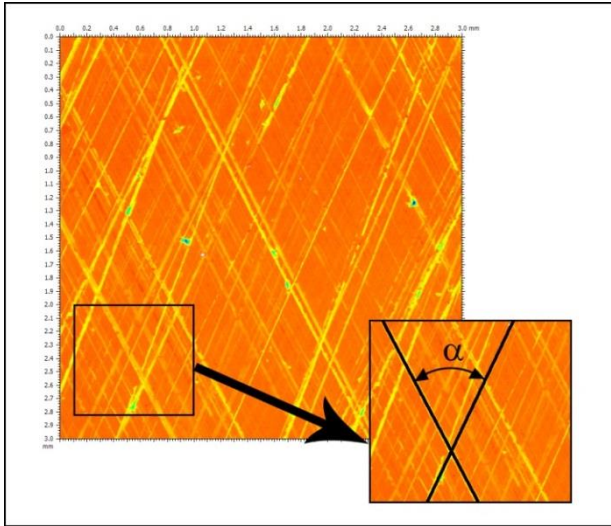
Powierzchnie zawierające kieszenie smarowe mogą zapewniać korzystniejsze właściwości tribologiczne skojarzeń trących w porównaniu do powierzchni gładkich. Dlatego modelowanie powstawania tego rodzaju powierzchni na etapach technologii i eksploatacji ma duże znaczenie praktyczne. Znaczenie tribologiczne powierzchni teksturowanych zostanie omówione w następnym rozdziale.

3. Istotność tribologiczna powierzchni teksturowanych

Teksturowanie powierzchni jest technologią inżynierii powierzchni służącą do zmniejszenia tarcia i zużycia i polegającą na wykonywaniu wgłębień na elementach trących. Wgłębienia mogą być oddzielne lub połączone ze sobą. W ich wnętrzu gromadzi się smar, mogą więc wpływać na powstanie zjawiska hydrodynamicznego unoszenia, które powoduje zmniejszenie oporów tarcia w warunkach smarowania i zwiększenie odporności na zatarcie. Mogą być również pułapką na cząstki ściernie, co powoduje wzrost odporności na ścieranie [49, 152, 253].

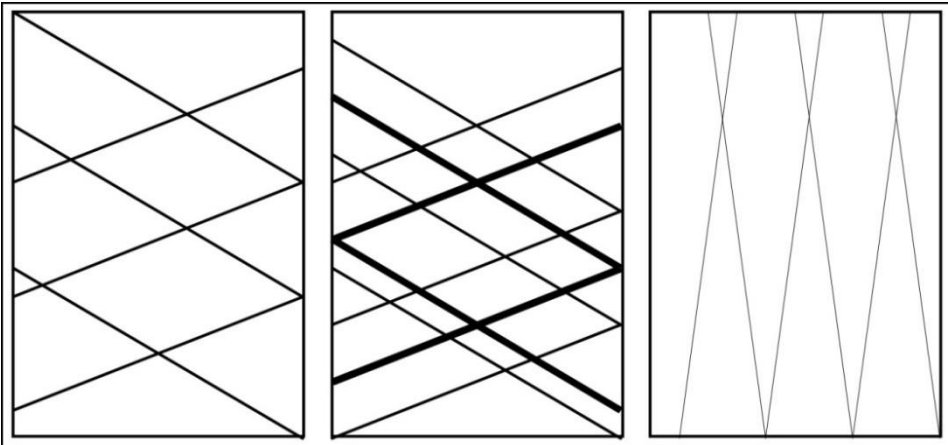
Uważa się, że pierwszym zastosowaniem teksturowania było gładzenie cylindrów silników spalinowych [41]. Struktura skrzyżowana na powierzchni cylindra pojawiła się w latach 40. XX wieku [49]. Uważa się, że warunki tarcia pierścieni tłokowych o gładź cylindra należą do najtrudniejszych ze wszystkich układów tribologicznych silnika spalinowego, szczególnie w okolicy zwrotnego zewnętrznego położenia pierwszego pierścienia tłokowego. Początkowo, ze względu na małe zużycie w warunkach smarowania, SGP cylindrów była gładka [211], stwierdzono jednak, że cechuje się skłonnością do zatarcia [238]. Poszukiwano więc optymalnej wysokości nierówności tulei cylindrowej. Przykładowo autor publikacji [238] uznał, że wartość parametru Ra powierzchni cylindra powinna wynosić $0.8 \mu\text{m}$. Inną metodą było poszukiwanie powierzchni łączącej dobre właściwości ślizgowe powierzchni gładkich z dużą zdolnością do utrzymywania oleju przez powierzchnie porowate. Tak powstały powierzchnie cylindrów po gładzeniu płaskowierzchołkowym. Stwierdzono, że gładzenie płaskowierzchołkowe zapewnia skrócenie procesu docierania oraz mniejsze zużycie liniowe w tym okresie [24, 172, 190, 203].

Powierzchnie te są szeroko stosowane. Stwierdzono, że zużycie cylindrów gładzonych płaskowierzchołkowo jest mniejsze w porównaniu ze zużyciem cylindrów gładzonych jednozabiegowo, przy tej samej wartości parametru Sq [61]. Nowsze publikacje [62, 63, 64] potwierdzają to spostrzeżenie. Autorzy prac [93, 136, 204] stwierdzili, że wzrost wysokości nierówności powierzchni cylindra powoduje zwiększenie współczynnika tarcia systemu tribologicznego: pierścień tłokowy – cylinder. Wzrost wysokości nierówności cylindra wywołuje wzrost zużycia oleju oraz wzrost emisji składników toksycznych [93]. Stwierdzono, że zmniejszenie zużycia oleju, bez pogorszenia innych właściwości eksploatacyjnych silnika, jest możliwe przy znacznym zmniejszeniu wysokości mikronierówności, zmniejszeniu głębokości rys gładzenia i wygładzeniu powierzchni nośnej, czyli podczas stosowania tzw. gładzenia ślizgowego (ang. *slide honing*). Istotne znaczenie ma również kąt gładzenia α (rys. 3.1.).



Rys. 3.1. Kąt gładzenia α

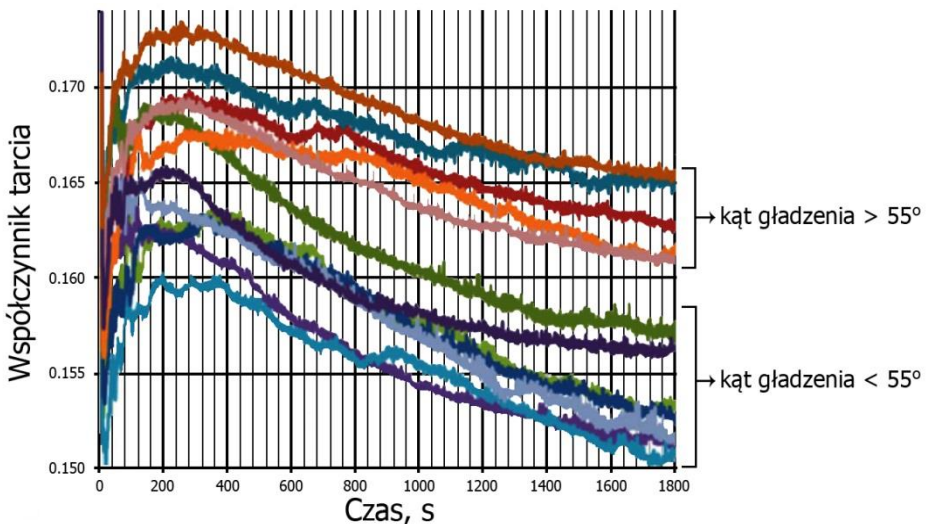
Próbowano zwiększać kąt gładzenia z około $45\text{--}55^\circ$ do 140° (honowanie spiralne) w celu zmniejszenia zużycia oleju [71, 191]. Rys. 3.2. pokazuje schematycznie powierzchnię cylindra po gładzeniu zwykłym, płaskowierzchołkowym oraz spiralnym.



Rys. 3.2. Schematyczne przedstawienie różnych wariantów powierzchni cylindrów, od lewej: gładzenie zwykłe, płaskowierzchołkowe, spiralne

Opinie na temat zasadności zwiększenia kąta gładzenia są jednak podzielone. Autorzy pracy [138] uważają na podstawie obliczeń numerycznych kontaktu cylindra z pierścieniem tłokowym w warunkach smarowania hydrodynamiczne-

go, że kąty gładzenia $40\text{--}55^\circ$ i $115\text{--}130^\circ$ prowadzą do najmniejszych oporów tarcia. Johansson i inni [93] nie zauważyli korzyści płynących ze wzrostu kąta gładzenia do 140 stopni z punktu widzenia tarcia i zużycia. Autorzy prac [18, 92, 141, 201] na podstawie badań numerycznych uważają, że wzrost kąta gładzenia powoduje wzrost oporów tarcia. Sugestie te są zgodne z wynikami badań doświadczalnych przeprowadzonych na stanowisku do badań tribologicznych w ruchu posuwisto-zwrotnym. Stwierdzono, że współczynnik tarcia był mniejszy w odniesieniu do próbek wykonanych z tulei cylindrowych przy kącie gładzenia mniejszym niż 55° (badano tuleje o kątach w zakresie $25\text{--}125^\circ$) – rys. 3.3.



Rys. 3.3. Wpływ kąta gładzenia na opory tarcia układu pierścieni tłokowy – tuleja cylindrowa (na podstawie [63])

Największa zmiana SGP cylindra dokonuje się w pierwszych minutach jego pracy [64].

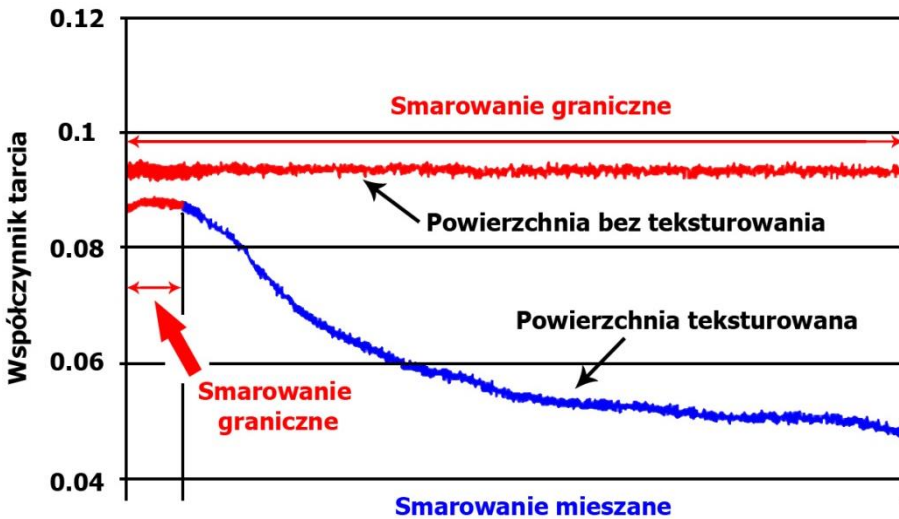
Ogólnie topografia powierzchni cylindrów wywiera znaczący wpływ na parametry eksploatacyjne silników, szczególnie w początkowym okresie ich pracy (zużycie w okresie docierania, zużycie oleju, czas docierania, parametry pracy silnika). W celu zapewnienia podobieństwa powierzchni po obróbce do powierzchni dotartej stosuje się gładzenie płaskowierzchołkowe zapewniające przede wszystkim skrócenie okresu docierania. Z punktu widzenia właściwości eksploatacyjnych istotny jest również kąt gładzenia.

Znaczny rozwój teksturowania powierzchni rozpoczął się od 1990 roku. Pierwsze zastosowania dotyczyły elementów pamięci magnetycznych [177] i uszczelnień mechanicznych [40]. Oddzielne kieszenie wykonywano metodą laserową [40, 177], choć stosuje się także inne metody ich wykonywania, jak

nagniatanie [50, 162], trawienie elektrochemiczne, obróbkę elektroerozyjną i obróbkę strumieniowo-ścierną [241, 243]. Metody te zależnie od możliwości i obrabianych materiałów mogą być stosowane zamiennie w celu polepszenia warunków współpracy węzłów ciernych.

Obecne zastosowania obejmują ponadto: pierścienie tłokowe, tarcze hamulcowe, sworznie tłokowe, łożyska ślizgowe, łożyska wzdłużne i inne [41].

Wpływ kieszeni smarowych na właściwości tribologiczne skojarzeń trących dotyczy przede wszystkim styku rozłożonego i jest widoczny bardziej w przypadku tarcia mieszanego niż płynnego. Wprowadzenie kieszeni smarowych powoduje zmniejszenie współczynnika tarcia i zmianę rodzaju smarowania [5, 52, 113, 114, 178] – rys. 3.4.



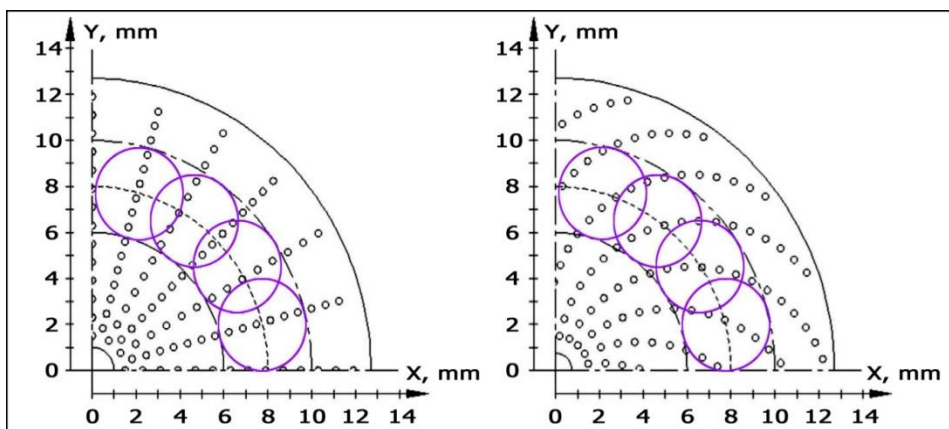
Rys. 3.4. Wpływ teksturowania powierzchni na zmianę rodzaju smarowania (na podstawie [114])

Kieszenie smarowe mogą zwiększać znacząco czas pracy w warunkach niedoboru smaru. Blatter i inni [16] otrzymali 10-krotny wzrost trwałości skojarzenia trącego dzięki wykonywaniu niewielkich rys (o głębokości mikrometrycznej) na jednej ze współpracujących powierzchni. Należy unikać ostrych krawędzi, co może zwiększać zużycie. Dumitru i inni [38] zwiększyli czas pracy skojarzenia trącego dzięki teksturowaniu powierzchni. Autorzy pracy [121] wskutek wykonywania wgłębień o średniej gęstości doprowadzili do dwukrotnego zmniejszenia współczynnika tarcia i trzykrotnego wzrostu trwałości. Jednakże nie każdy kształt kieszeni smarowych prowadzi do zwiększenia odporności na zatarcie [51].

Zazwyczaj stosuje się kieszenie smarowe o jednakowych kształtach i geometrii. Spotyka się próby stosowania wgłębień o różnych wymiarach [113]

i kształcie [194, 195, 227]. Może to prowadzić do poprawy właściwości tribologicznych w różnych warunkach współpracy skojarzeń trących. Hsu i inni [80] zastosowali głębokie wgłębienia o niewielkiej szerokości w celu poprawy właściwości tribologicznych w warunkach smarowania granicznego oraz szerokie i płytkie kieszenie smarowe – smarowania płynnego.

Zazwyczaj powierzchnie teksturowane opisuje się względną powierzchnią przez nie zajmowaną (stopniem pokrycia) i wymiarami (szerokością i głębokością) [41, 49, 152, 253]. Okazało się, że układ (szyk) kieszeni smarowych jest również bardzo istotny. Stwierdzono, że tarcze ze spiralnymi kieszeniami smarowymi zapewniają korzystniejsze właściwości tribologiczne (mniejsze wartości i zmienność siły tarcia) w porównaniu z szykiem promieniowym w kontakcie z trzpieniem [241, 243]. Przyczyną jest prawdopodobnie bardziej równomierny kontakt tarczy z przeciwną – w przypadku szyku promieniowego liczba kieszeni kontaktujących się z trzpieniem wynosi 5–10, zaś w przypadku szyku spiralnego 6–8 – rys. 3.5. Korzystne są również układy wgłębień wzorowane na powierzchniach występujących w biologii [129, 130].



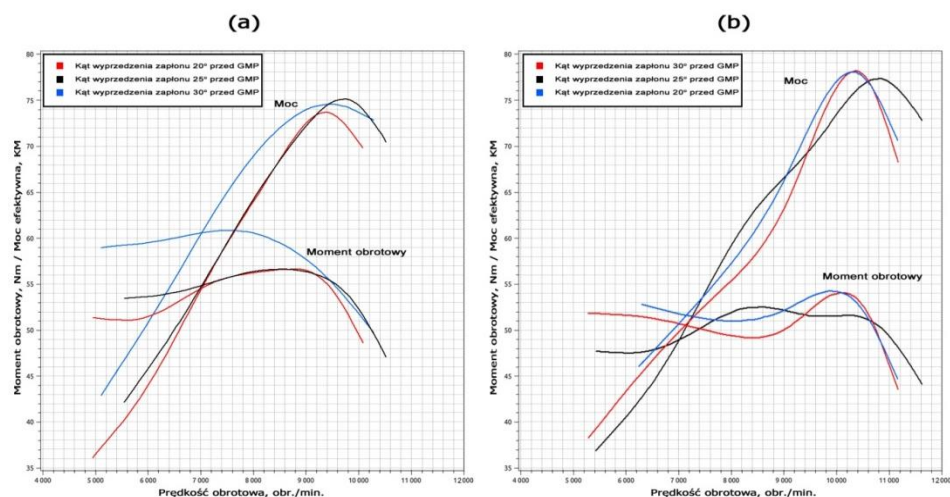
Rys. 3.5. Wizualizacja kontaktu teksturowanych tarcz z powierzchnią trzpienia, przy stopniu pokrycia równym 17% (na podstawie [241])

Początkowe prace w dziedzinie teksturowania powierzchni dotyczyły kieszeni sferycznych. Przeprowadzono również badania dla innych kształtów, na przykład kwadratowego [67], w kształcie trapezu, jodełki (ang. *chevron*) [198], naboju i ryby [255]. Z ostatnio opublikowanych badań [242] wynika, że wgłębienia w kształcie jodełki są najbardziej uniwersalne, zapewniające zmniejszenie siły tarcia zarówno w przypadku promieniowego, jak i spiralnego szyku.

Dotychczas opisywano wyniki badań zrealizowanych w warunkach smarowania. Teksturowanie powierzchni może być przydatne również podczas tarcia technicznie suchego. W tych warunkach w kieszeniach mogą gromadzić się

cząstki ściernie, co może doprowadzić do zmniejszenia zużycia [246, 247]. Zmniejszają się również opory tarcia [31, 120, 151, 214, 247]. Zwykle istotny wpływ na właściwości tribologiczne skojarzeń trących mają wymiary kieszeni smarowych i stopień pokrycia nimi powierzchni. Gachot i inni [47, 48] stwierdzili, że ustawienie kieszeni w kierunku ruchu jest również istotne (najlepsze właściwości tribologiczne otrzymano przy prostym ustawieniu wgłębień w stosunku do kierunku ruchu). W przypadku zachodzenia frettingu (zużycie przy bardzo małych przemieszczeniach współpracujących powierzchni) wpływ teksturowania powierzchni zależy od dominującego mechanizmu zużycia. W przypadku tendencji do zużycia ściernego zachodzi pozytywny, zaś do zużycia adhezyjnego – negatywny wpływ obecności kieszeni smarowych na właściwości funkcjonalne skojarzeń trących [119, 224].

Jak wspomniano, istnienie struktury skrzyżowanej na powierzchniach cylindrów silników spalinowych zapewnia korzystne właściwości funkcjonalne układu: pierścieni tłokowy – tuleja cylindrowa. Dalszą poprawę można osiągnąć przez wprowadzenie dodatkowych kieszeni smarowych. Na podstawie badań numerycznych [215, 223, 251] oraz eksperymentalnych [59, 225] otrzymano zmniejszenie oporów tarcia dzięki wprowadzeniu wgłębień na powierzchni tulei cylindrowych.



Rys. 3.6. Charakterystyki silnika bez (a) oraz z dodatkowym teksturowaniem powierzchni cylindra połączonym z nakładaniem powłoki DLC (b) [112]

Wprowadzenie kieszeni smarowych na powierzchniach gładzonych cylindrów silników motocykli żużlowych spowodowało (poprzez zmniejszenie tarcia) wzrost mocy silnika. Jeszcze lepsze efekty otrzymano przez połączenie teksturowania powierzchni cylindra z nakładaniem powłoki DLC. Otrzymano wów-

czas wzrost mocy o około 6% i dodatkowo zwiększenie możliwych do osiągnięcia prędkości obrotowych silnika spalinowego o 1000 obrotów na minutę [112]. Rys. 3.6. przedstawia charakterystyki silnika bez i z dodatkowym teksturuowaniem powierzchni cylindra wraz z nakładaniem powłoki DLC.

Na podstawie przeanalizowanej literatury można stwierdzić, że wykonywanie kieszeni smarowych na współpracujących powierzchniach może doprowadzić do znaczącej poprawy właściwości tribologicznych skojarzeń trących.

4. Modelowanie powierzchni kształtowanych w procesie honowania płaskowierzchołkowego

4.1. Honowanie cylindrów silników spalinowych

4.1.1. Wprowadzenie

Honowanie jest obróbką ścierną, w której usuwanie materiału odbywa się za pomocą narzędzi ściernych lub luźnych ziaren. Orientacja ziaren względem głównych kierunków kinematycznych w chwili zetknięcia z materiałem ma charakter losowy. Podczas honowania poza usuwaniem nadmiaru następuje także odkształcenie materiału (sprężyste i plastyczne). Grubość warstwy usuwanej wynosi od dziesiątych części do kilku mikrometrów. Honowanie zapewnia uzyskanie elementów maszyn często w sposób automatyczny, o dogodnych cechach, ze względu na ich właściwości użytkowe. Cechy geometryczne powierzchni i fizyczne własności warstwy wierzchniej są z góry określone.

Obecnie pojęcie honowanie zostało rozszerzone i obejmuje honowanie elektrochemiczne, elektrolityczne, oscylacyjne, w tym ultradźwiękowe, laserowe oraz honowanie masą ścierną. Zastosowanie procesu honowania jest bardzo szerokie – między innymi obróbka wykończeniowa otworów wtryskiwaczy aparatury paliwowej, otworów hydrauliki i pneumatyki sterującej i siłowej, przewodów lufowych, otworów korbowodów, przewodników zaworowych, łożysk ślizgowych, otworów cylindrów i tulei cylindrowych silników spalinowych i sprężarek.

Honownice, zwłaszcza sterowane numerycznie, należą do najbardziej dynamicznie rozwijających się obrabiarek o dużym udziale automatyzacji. Wynika to z bardzo wysokich wymagań, jakie stawia się obrabiarkom, oraz bardzo wysokich cen tych maszyn. Wysoka cena maszyny wymusza konieczność wysokiej wydajności. Obrabiarki do honowania mogą być indywidualnymi maszynami, elementami układów automatyzacji produkcji oraz wysoko zautomatyzowanymi centrami obróbkowymi.

4.1.2. Charakterystyka procesu honowania cylindrów

Honowanie wewnętrznych powierzchni (gładzi) cylindrów (tulei cylindrowych) stosowane jest w celu poprawienia dokładności wymiaru, kształtu, położenia, bicia oraz kształtowania struktury geometrycznej powierzchni (przede wszystkim wysokości nierówności powierzchni, kierunkowości struktury) oraz jakości warstwy wierzchniej. Charakterystyka techniczna honowania zawarta jest w normie [36].

Honowanie charakteryzuje się skojarzeniem zwykle trzech ruchów, zazwyczaj narzędzia (rys. 4.1.):

– obrotowego z prędkością obrotową n_o i obwodową:

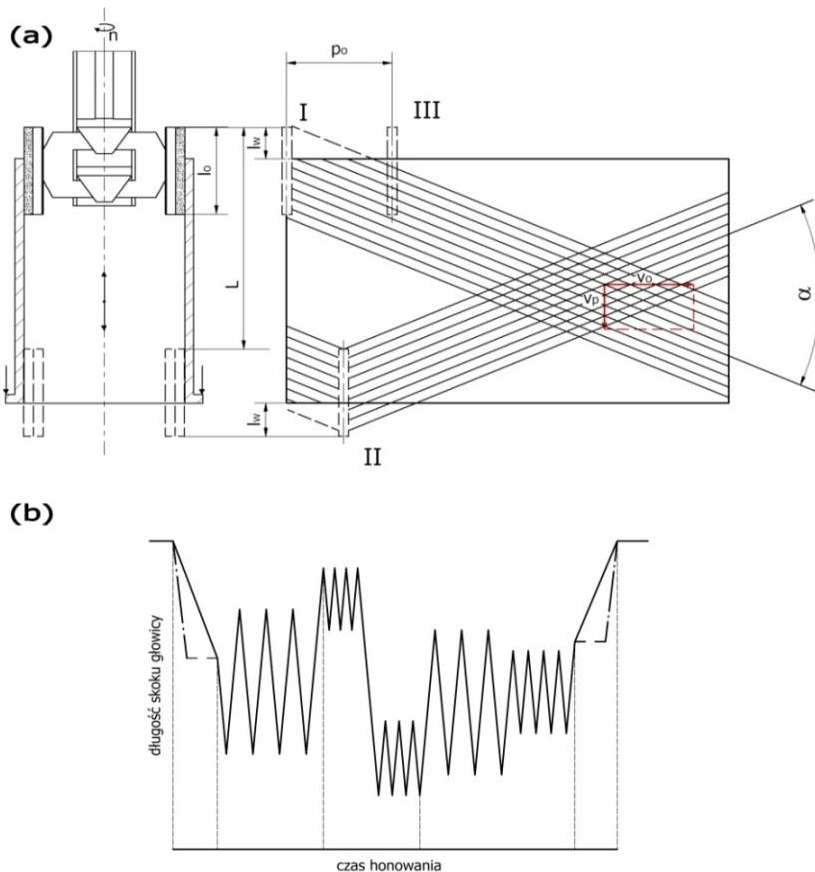
$$v_o = (\pi \cdot d \cdot n_o) / 60000, \text{ m/s,}$$

– prostoliniowo-zwrotnego o częstości skoków n_p i średniej prędkości liniowej:

$$v_w = v_p = 2 \cdot L \cdot n_p, \text{ m/s,}$$

(gdzie: d – średnica otworu, mm, L – długość skoku narzędzia, mm),

– promieniowego, czyli prędkości rozpięcia – dosuwu v_r lub docisku p osełek do powierzchni obrabianej.



Rys. 4.1. Kinematyka procesu honowania: a) stały skok głowicy, b) zmienna długość skoku głowicy w kolejnych cyklach honowania, wynikająca z dążenia do uzyskania małej walcowości otworu i stosowana w honownicach firmy NAGEL [164]

Kinematyka procesu przedstawiona została na rys. 4.1. Poszczególne oznaczenia to: I, III – położenie zwrotne górne głowicy, II – położenie zwrotne dolne głowicy, l_o – długość osełek, L – długość skoku narzędzia, l_w – długość wybiegu osełek, p_o – przesunięcie obwodowe osełek na średnicy cylindra po wykonaniu jednego podwójnego skoku głowicy, v_o – składowa obwodowa prędkości skrawania, v_p – składowa posuwisto-zwrotna prędkości skrawania, n – prędkość obrotowa, α – kąt skrzyżowania rys honowania.

W wyniku ruchu obrotowego i prostoliniowo-zwrotnego powstaje na powierzchni obrobionej charakterystyczna struktura skrzyżowana topografii powierzchni. Kąt przecięcia śladów α jest wyznaczany z zależności:

$$\operatorname{tg}\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{v_p}{v_o}.$$

Prędkość skrawania v_s w honowaniu jest geometryczną sumą prędkości v_o i v_p , czyli:

$$v_s = \sqrt{v_o^2 + v_p^2}.$$

Wartości liczbowe parametrów tych ruchów są zróżnicowane zwłaszcza w zależności od rodzaju narzędzi ściernych. Wynoszą najczęściej: $v_o = 0.33 - 1.50 \text{ m/s}$, $v_p = 0.08 - 0.50 \text{ m/s}$. Kąt honowania ma najczęściej wartość $\alpha = 30^\circ - 60^\circ$. Stosowana jest także większa jego wartość, $\alpha = 115^\circ - 140^\circ$, w honowaniu spiralnym.

W niektórych przypadkach występuje dodatkowy ruch oscylacyjny osiowy lub/i obwodowy o bardzo zróżnicowanej amplitudzie, często 1–4 mm, niekiedy kilka mikrometrów i częstotliwości kilku lub kilkunastu podwójnych skoków na sekundę [142]. Rzadko jest stosowana kinematyka honowania tylko z prędkością obwodową v_o (rysy honowania są prostopadłe do osi otworu) lub tylko z prędkością osiową v_p (rysy honowania są równoległe do osi otworu).

Zazwyczaj z wrzecionem honownicy, poprzez przegub podwójny Kardana, połączona jest specjalna głowica, w której zamocowane są osełki ścierne. Przedmiot obrabiany zamocowany w uchwycie obróbkowym jest nieruchomy. Rzadziej stosowane są inne układy ustalenia przedmiotu obrabianego i napędu głowicy. Istotne jest dobranie takich parametrów, aby prędkość obrotowa głowicy n_o nie była wielokrotnością częstości podwójnych skoków n_p (rys. 4.1.).

Wówczas linia śrubowa każdego z ziaren nie będzie, dla jednego cyklu pracy, linią zamykającą się w początkowym i końcowym punkcie pracy, a ziarna nie będą przemieszczać się stale po tych samych śladach, powodując powstawanie rys o znacznej (niekorzystnej) głębokości na powierzchni obrabianej. Dru-

gim istotnym czynnikiem wpływającym na powstawanie śladów podczas honowania jest drobne wykruszanie się ostrzy poszczególnych ziaren oselek. Zjawisko to spowodowane jest zmiennym kierunkiem siły skrawania przy suwie głowicy w dół i w górę. Występujące zmiany kierunku obciążenia ziaren powodują ich samoostrzenie i powstawanie ciągle nowych krawędzi i wierzchołków skrawających [143].

W czasie honowania występują: mikroskrawanie, wygładzanie i rysowanie.

Mikroskrawanie zachodzi w warunkach samoostrzenia oselek. Pozwala usunąć duży naddatek rzędu 0.2–1.2 mm wraz z odchyłkami kształtu. Zapewnia zwiększenie dokładności kształtu i uzyskanie wysokości chropowatości powierzchni określanej parametrem $Ra = 0.16 - 0.32 \mu\text{m}$.

Wygładzanie występuje w procesie bruzdowania, podczas którego zachodzi odkształcenie plastyczne nierówności powierzchni. Można uzyskać wysokość chropowatości powierzchni rzędu $Ra = 0.02 - 0.04 \mu\text{m}$. Wygładzaniu towarzyszy intensywny zgniot warstwy wierzchniej.

Rysowanie to połączenie mikroskrawania z wygładzaniem. Występuje często w procesie honowania. Zwykle po początkowym mikroskrawaniu występuje ono samoistnie lub wskutek zmniejszenia nacisku jednostkowego, prędkości dosuwu lub zwiększenia prędkości obwodowej. W zależności od wymaganych właściwości obrobionego elementu dążymy, by w honowaniu występowało tylko mikroskrawanie, mikroskrawanie połączone z wygładzaniem (otwory cylindrów silników spalinowych) lub tylko wygładzanie.

Honowanie jest stosowane do obróbki większości materiałów konstrukcyjnych, zwłaszcza stali, żeliw, metali nieżelaznych, węglików spiekanych, stopów kobaltu, niklu i tytanu, ceramiki, kompozytów oraz tworzyw sztucznych, powłok galwanicznych, powłok PVD, CVD (np. TiN, TiAlN, CrN, Ni, Fe, Mo, Cr-Mo, stal+molibden, TiO₂, Cr₃C₂ 25) [39, 143].

Właściwości podstawowych materiałów stosowanych na bloki cylindrowe i tuleje cylindrowe zamieszczono w tabeli 4.1., natomiast wybrane parametry ekologiczne i operacyjne silników o kadłubie ze stopu aluminium-krzem w tabeli 4.2.

Honowanie wykonywane jest po wstępnej obróbce wytaczaniem, szlifowaniem, rozwiercaniem, a także bezpośrednio po obróbce plastycznej lub po wstępnym pokryciu galwanicznym, natrysku plazmowym lub powłoce PVD i CVD. Stosowanie pomiędzy zabiegami honowania obróbki strumieniowości umożliwia zmniejszenie odchyłki kołowości i walcowości o 40% oraz zwiększenie o 60% stopnia odsłonięcia płatków grafitu [213].

Tabela 4.1. Właściwości materiałów stosowanych na bloki cylindrowe i tuleje cylindrowe [164]

Właściwości materiałów	Stopy Al			Stopy Mg	Żeliwa EN-		
	AlSi17Cu4Mg	A380	AlSi9Cu3	AJ62	GJL-300	GJL-350	GJV-450
Wytrzymałość na rozciąganie R _m , MPa	230-295	320	240	234	300-400	350-450	450-525
Granica plastyczności R _e , Mpa	220-265	160	140	140	180	228-285	315-365
Wydłużenie A ₅ , %	0.50-1.00	3.50	<1	7	0	0.3-0.8	1.0-2.5
Moduł sprężystości E, Mpa	77000-83000	71000	76000	45000	115000	123000-143000	145000-155000
Współczynnik Poissona ν _v	0.33	0.33	0.45	0.33	0.26	0.26	0.26
Twardość HB, -	110-120	80	80	61	215-255	200-300	215-255
Masa właściwa ρ, g/cm ³	2.73	2.72	2.76	1.80	7.10	7.36	7.10
Masowy wskaźnik wytrzymałości, Mpa/g·cm ⁻³	84-108	118	87	128	42-56	48-61	63-74
Przewodność właściwa cieplna (100–400 C°), W/m·K	134-117	125-115	120-110	77	47-43	46-42	44-40

Tabela 4.2. Dane techniczne silników o kadłubie ze stopu Al-Si: BMW 3.0 dm³ powstałych na podstawie konstrukcji M52 oraz silnika Mercedes-Benz 3 dm³ V6 OM642 320 CDI, Mercedes AMG-6.3V8 [164]

Dane techniczne	BMW M52 (2000-2004)	BMW N52 (2004-2006)	BMW N52 (2006-)	BMW N52 (2006-)	BMW 3,0 dm ³ Twin Turbo (2006-)	Mercedes-Benz V6 OM642 320 CDI	Mercedes AMG-6.3 V8
1	2	3	4	5	6	7	8
Objętość skokowa, cm ³	2979 ZI	2996 ZI	2996 ZI	2996 ZI	2979 ZI	2987 ZS	6208 ZI
Srednica cylindra x skok tłoka, mm	84.0×89.6	85.0×88.0	85.0×88.0	85.0×88.0	84.0×89.6	83×92	102.2×94.6
Stopień sprężania	10.2	10.7	12.0	12.0	10.2	18.0	11.3
N _{max} , kW przy prędkości obrotowej, obr/min	170/5900	190/6600	160/6100	200/6700	225/5800	165/3800	375/6800

1	2	3	4	5	6	7	8
M _{max} , N·m przy prędkości obrotowej, obr/min	300/ 3500- 4000	300/ 2500- 4000	270/ 2400- 4000	320/ 2750- 4000	400/ 1300- 5000	510/ 1600- 2800	630/ 5200
Materiał kadłuba	AlSi17Cu4Mg	Al-Si17Cu4Mg / AlSi12 / AJ62, gładź z powłoką Nikasil	Al-Si17Cu4Mg / AlSi12 / AJ62, gładź z powłoką Nikasil	Al-Si17Cu4Mg / AlSi12 / AJ62, gładź z powłoką Nikasil	A380 (AlSi9Cu3Zn3Fe) / tuleja z żeliwa szarego EN-GJL-300	AlSi8Cu3 / tuleja z żeliwa szarego EN-GJL-300	AlSi7 / natrysk plazmowy cylindrów AlSi17
Masa silnika (kadłuba), kg	201	161	161	161	170 (77)	208	199
Objętościowy wskaźnik mocy, kW/dm ³	57.1	63.4	53.4	66.8	75.5	55.2	60.4
Masowy wskaźnik mocy, kW/kg	0.85	1.18	0.99	1.24	1.32	0.79	1.88
Czas rozpędzania 0–100, km/h	6.5 s BMW 330i	6.3 s BMW 330i	6.7 s BMW 325i	6.1 s BMW 330i	9.1 s BMW 335i	6.6 s Mercedes-Benz E320 CDI (W211)	3.8 s Mercedes SLS AMG
Średnie zużycie paliwa, dm ³ /100 km (NEDC)	9.1	8.7	7.1	7.2	9.1	7.3	13.2
Średnia emisja CO ₂ , g/km (NEDC)	218	208	170	173	218	215	308

Przebieg i wyniki procesu honowania zależą od wielu czynników, które są związane z:

1. Narzędziem, zwykle z ośką ścierną, rzadziej z segmentem ściernym, taśmą ścierną, folią ścierną czy szczotką ścierną. Powierzchnia czynna osełek jest najczęściej ciągła, rzadziej nieciągła, przerywana lub o strefowo zróżnicowanej budowie [87, 142]. Materiałem ściernym są: czarny i zielony węgiel krzemu, zwykły, półszlachetny i szlachetny tlenek aluminium, elektrokorund stopowy, elektrokorund sferyczny, monokryształy węgla krzemu i elektrokorundu, trójfazowe i czterofazowe elektrokorundy stopowe powlekane warstwami metalicznymi lub dewitryfikatami, elektrokorund ferromagnetyczny, monokrystaliczne ziarna ściernie diamentu syntetycznego o nowych postaciach krystalograficznych – specjalnie zorientowanych na określone zastosowanie, polikrystaliczne ziarna ściernie diamentu syntetycznego lub regularnego azotku boru, spiekany submikrokryształiczny i nanokryształiczny korund, nowe odmiany alotropowe znanych dotychczas materiałów ściernych (np. fullereny), sub-

mikrokrystaliczne twarde materiały ściernie strukturalnie wzmocnione wiskerami, ziarna ściernie z wiskerów Al_2O_3 , ziarna ściernie z węglikoborków metali przejściowych, ścierniwa beztlenowe, ścierniwa spiekane z płytek lub dendrytów oraz ścierniwa hybrydowe [164]. Spoiwo jest często ceramiczne, metalowe, galwaniczne, żywiczne, rutytowe, grafitowe, rzadziej szklane i mikrokrystaliczne szklane [153, 213].

2. Głowicą honowniczą, która może być jedno- lub wieloosełkowa, trzpieniowa z tulejami lub segmentami ściernymi lub trzpieniowa z galwanicznie nałożoną warstwą ścierną.

3. Przedmiotem obrabianym (rodzaj materiału, struktura, wielkość naddatku, chropowatość powierzchni, sztywność, zdolności tłumienia drgań).








4. Obrabiarką (rodzaj rozpięcia osełek, sposób zamocowania głowicy i przedmiotu, położenia przestrzennego i liczby wrzecion, właściwości dynamicznych i kinematycznych napędów ruchu i konstrukcji obrabiarki, czynnej kontroli średnicy otworu podczas honowania, systemu sterowania i regulacji, korekcji długości, liczby skoków, ich zakresu i czasu zatrzymania, niezmienności i stabilizacji stałości prędkości skrawania i kąta honowania).

5. Warunkami obróbki (prędkością, naciskiem jednostkowym czy prędkością dosuwu, wybiegiem, długością skoku, rodzajem i ilością cieczy chłodząco-smarującej).

4.1.3. Wymagania dotyczące gładzi cylindrów silników spalinowych

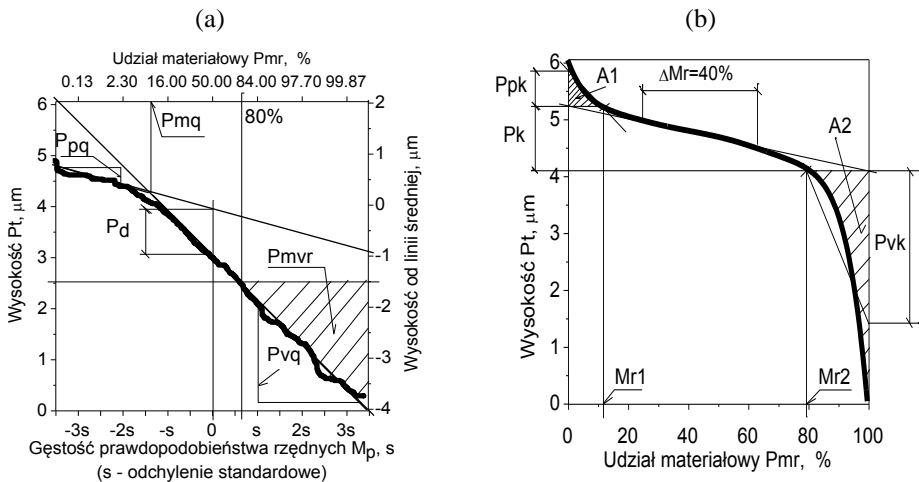
Charakterystyczne ukierunkowanie struktury geometrycznej powierzchni gładzi cylindra zamieszczono w tabeli 4.3.

Tabela 4.3. Obrazy powierzchni i charakterystyka struktury geometrycznej powierzchni otworu wewnętrznego tulei cylindrowych wykonanych odmiennymi technologiami [165],
 Rz – maksymalna wysokość profilu, Rpk – zredukowana wysokość wierzchołków,
 Rk – wysokość chropowatości rdzenia, Rvk – zredukowana głębokość dolin

Rodzaj technologii	Hartowanie indukcyjne	Hartowanie laserowe	Honowanie i docieranie	Honowanie płaskowierzchołkowe	Honowanie slide	Honowanie spiralne	Honowanie i obróbka cieplna UV laserem
Obraz powierzchni							
Rz, μm	7	7	7.5	7	2.8	2.9	4.99
Rpk, μm	0.4	0.4	0.8	0.4	0.08	0.1	0.99
Rk, μm	1.5	1.5	2.0	1.5	0.33	0.5	1.42
Rvk, μm	2	2	1.3	2	1.03	1.8	1.05
Kąt honowania	33°	33°	35°	33°	40°-60°	140°-150°	45°

Są to przede wszystkim skrzyżowane topografie powierzchni uzyskane metodą honowania ściernego oraz dodatkowo docierane ściernie, obrobione ciepłnie UV laserem lub teksturowane laserowo. Rzadziej uzyskuje się je metodą hartowania indukcyjnego lub laserowego, a następnie poddaje honowaniu lub dodatkowo nagniataniu czy kulkowaniu strumieniowemu. Honowanie slide (ślizgowe) powstało w celu zmniejszenia wysokości nierówności powierzchni. Wykonuje się je ośkami z warstwą diamentową. Dodatkowe korzyści to większa wydajność i równomierność procesu [29].

Do oceny profili nierówności powierzchni gładzi cylindrowej przydatny jest wykres udziału materiału (nośności). Podstawą do oceny może być trzyczęściowy model powierzchni (kształt S wykresu nośności), przy czym oddzielnie oceniane są wzniesienia, rdzeń i wgłębienia (norma ISO 13565-2) – rys. 4.2b. Natomiast producenci amerykańscy korzystają z opisu wysokości chropowatości profilu przy pomocy krzywej nośności w układzie laplaso-normalnym (norma ISO 13565-3). Opis takiej krzywej zawiera parametry: Ppq – odchylenie standardowe wysokości wierzchołków (nachylenie prostej regresji w obszarze powierzchni nośnej), Pvq – odchylenie standardowe głębokości dolin (nachylenie prostej regresji w obszarze wgłębień), Pmq – względny udział materiałowy na przecięciu plateau i wgłębień (rys. 4.2a). Trójwymiarowe odpowiedniki parametrów Ppq , Pvq i Pmq pokazane są na rys. 2.6.

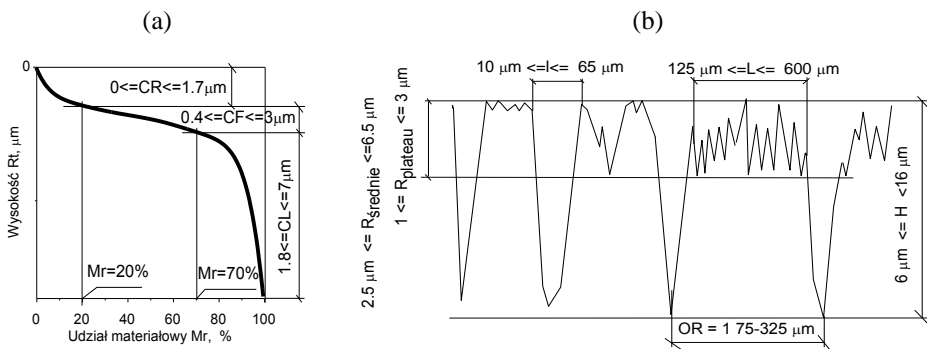


Rys. 4.2. Parametry krzywej udziału materiałowego otrzymane na podstawie normy ISO 13565-3 (a) i ISO 13565-3 (b), $Pmvr$ i $A2$ – pola powierzchni wgłębień, $A1$ – pole powierzchni wierzchołków, Pd – głębokość „plateau” [165]

Z uwagi na bardzo silne skorelowanie parametrów tych dwu opisów krzywej Abbotta należy uznać je za zbliżone, lecz nie są one równoważne [7, 168]. Opis wysokości za pomocą linearyzacji krzywej udziału materiałowego (norma ISO

13565-2 – rys. 4.2b) nie jest jednoznaczny i niezależny. Natomiast jednoznaczność opisu wysokości ma miejsce za pomocą parametrów Ppq , Pvq i Pmq (norma ISO 13565-3). Dodatkowo opis krzywej nośności w układzie laplaso-normalnym ma interpretację technologiczną: parametr Pvq – jest z honowaniem wykończeniowym, zaś parametr Ppq związany z honowaniem ostatecznym. Istnieją trudności dotyczące obliczenia parametrów zawartych w normie ISO 13565-3 [65].

Pierwsze wymagania powierzchni plateau w tulei cylindrowej produkowanej w Polsce sformułowała firma BERLIET (rys. 4.3.). Dotyczyły one tulei cylindrowych suchych silnika SW680, wykonywanych z żeliwa szarego perlitycznego z dodatkowo chromowanym otworem wewnętrznym. Norma BERLIET 01.10.4002 wprowadziła wymagania geometryczne krzywej nośności, równomierność honowania oraz wymagania geometryczne profilu chropowatości powierzchni. Uważano, że parametr CR powiązany jest z okresem docierania, parametr CF z okresem normalnej eksploatacji, zaś wymagana wartość parametru CL zapewniała poprawne smarowanie. Rys. 4.3a przedstawia wymagania dla: udziału materiałowego od 0% do 20% – CR o wartości $0 \leq CR \leq 1.7 \mu\text{m}$, dla udziału materiałowego od 20% do 70% – CF o wartości $0.4 \leq CF \leq 3 \mu\text{m}$ oraz dla udziału materiałowego od 70% do 100% – CL o wartości $1.8 \leq CL \leq 7 \mu\text{m}$. Rys. 4.3b wymagania dla: średniej głębokości chropowatości powierzchni – $R_{\text{średnie}}$ o wartości $2.5 \mu\text{m} \leq R_{\text{średnie}} \leq 6.5 \mu\text{m}$, głębokości chropowatości plateau – R_{plateau} o wartości $1 \mu\text{m} \leq R_{\text{plateau}} \leq 3 \mu\text{m}$, głębokości rys honowania – H o wartości $6 \mu\text{m} \leq H \leq 16 \mu\text{m}$, szerokości plateau – L o wartości $125 \mu\text{m} \leq L \leq 600 \mu\text{m}$, szerokości rowków – l o wartości $10 \mu\text{m} \leq l \leq 65 \mu\text{m}$ oraz odstępów rys honowania – OR o wartości $175 \mu\text{m} \leq OR \leq 325 \mu\text{m}$.



Rys. 4.3. Wymagania dla powierzchni honowanego cylindra firmy BERLIET [165]

Wymagania konstrukcyjne topografii powierzchni gładzi cylindrowej, z lat 2005–2011, silników o pojemności 13 dm^3 zamieszczono w tabeli 4.4. Przedstawiono tam wymaganą wartość średnią z trzech pomiarów profilu wzdłuż two-

rzącej otworu cylindra. Podano także dopuszczalną wartość jednego z trzech pomiarów. Pomiar chropowatości był przeprowadzany na trzech wysokościach tulei cylindrowej 50, 90 i 120 mm rozmieszczonych na obwodzie tulei, co 120°.

Tabela 4.4. Historyczny przebieg wymagań parametrów chropowatości gładzi tulei cylindrowych przeznaczonych do dużych 13 dm³ silników o zapłonie samoczynnym [165]

Parametry krzywej Abbotta	Zapis na rysunku konstrukcyjnym	Dopuszczalna wartość jednego z trzech pomiarów		Wymagana wartość średnia z trzech pomiarów		Zdolność procesu
		min	Max	min	Max	
1*	2*	3*	4*	5*	6*	7*
Gładź po honowaniu płaskowierzchołkowym. Norma z roku 2005						
<i>Rpk</i> , μm	<0.30	0	0.36	0	<0.30	
<i>Rk</i> , μm	0.50-1.10	0.40	1.32	0.50	1.10	
<i>Rvk</i> , μm	1.40-2.80	1.12	3.36	1.40	2.80	-
<i>Rmr1</i> , %	<10	0	12	0	<10	
<i>Rmr2</i> , %	65-85	52	100	65	85	
Gładź po honowaniu slide. Norma z roku 2005						
<i>Rpk</i> , μm	<0.30	0	0.36	0	<0.30	
<i>Rk</i> , μm	0.15-0.65	0.12	0.78	0.15	0.65	
<i>Rvk</i> , μm	1.40-2.80	1.12	3.36	1.40	2.0	-
<i>Rmr1</i> , %	<10	0	12	0	<10	
<i>Rmr2</i> , %	65-85	52	100	65	85	
Gładź po honowaniu płaskowierzchołkowym. Norma z roku 2007						
<i>Rpk</i> , μm	<0.30	0	0.36	0	<0.30	
<i>Rk</i> , μm	0.40-1.00	0.32	1.20	0.40	1.00	
<i>Rvk</i> , μm	1.40-2.80	1.12	3.36	1.12	3.36	-
<i>Rmr1</i> , %	<10	0	12	0	<10	
<i>Rmr2</i> , %	65-85	52	100	65	85	
Gładź po honowaniu slide. Norma z roku 2007						
<i>Rpk</i> , μm	<0.30	0	0.36	0	<30	
<i>Rk</i> , μm	0.25-0.75	0.12	0.78	1.15	0.65	
<i>Rvk</i> , μm	1.40-2.80	1.12	3.36	1.40	2.80	-
<i>Rmr1</i> , %	<10	0	12	0	<10	
<i>Rmr2</i> , %	65-85	52	100	65	85	
Gładź po honowaniu płaskowierzchołkowym. Norma z roku 2008						
<i>Rpk</i> , μm	<0.30	0	0.36	0	<0.30	
<i>Rk</i> , μm	0.50-1.20	0.40	1.44	0.50	1.20	
<i>Rvk</i> , μm	1.40-2.80	1.12	3.36	1.12	3.36	-
<i>Rmr1</i> , %	<10	0	12	0	<10	
<i>Rmr2</i> , %	65-85	52	100	65	85	
Gładź po honowaniu płaskowierzchołkowym, HDE13 Eu6. Norma z roku 2011						
<i>Rpk</i> , μm	<0.25	0	0.30	0	<0.25	Cpk>0.9
<i>Rk</i> , μm	0.15-0.65	0.12	0.78	0.15	0.65	
<i>Rvk</i> , μm	1.10-2.80	0.88	3.36	1.10	2.80	
<i>Rmr1</i> , %	<10	0	12	0	<10	
<i>Rmr2</i> , %	65-85	52	100	65	85	

* Wartości średnie z 3 pomiarów, na wysokości 50, 90 i 120 mm rozmieszczonych na obwodzie tulei co 120°, tj. *Rpk*, *Rk*, *Rvk*, *Rmr1*, *Rmr2* muszą się mieścić w zakresach podanych w rubryce 2 oraz 3 i 4. Dopuszcza się dla jednego z trzech pomiarów tworzących wartości średnie odstępstwo ±20% (patrz rubryka 5 i 6). Odcinek pomiarowy 17.5 mm, filtr zgodny z ISO 3565-1. Parametry zgodne z ISO 13565-2

Cechą wspólną tych wymagań dla powierzchni gładzi cylindrowej było dążenie do zmniejszenia wartości parametrów *Rpk* i *Rk*, ograniczenia wartości parametru *Rvk* przy niezmiennych wartościach udziału materiałowego *Rmr1*

i *Rmr*2. Dążenie do spełnienia norm ekologicznych EURO 5 i EURO 6 spowodowało skoncentrowanie się na zmniejszeniu wysokości chropowatości powierzchni.

Rysy honowania, tworzące powierzchnię nośną i powierzchnię wgłębień, muszą być ostro nacięte (bez odkształceń plastycznych) na całej powierzchni otworu tulei. Sprawdzenia dokonuje się na podstawie obrazu optycznego stereometrycznego powierzchni gładzi cylindra, repliki negatywowej powierzchni tzw. fax-filmu obserwowanej w świetle przechodzącym w mikroskopie biologicznym lub próbki wyciętej z cylindra w mikroskopie skaningowym. Wymagania dla powierzchni honowanych cylindrów silników spalinowych firma GÖETZE AG opublikowała w normie D-5093 w roku 1988 [57]. Norma ta zawierała dwie niezależne oceny: wyglądu powierzchni i profilu chropowatości i falistości powierzchni wzdłuż tworzącej. Ocena powierzchni honowanego cylindra na podstawie wyglądu powierzchni oraz ocena wyglądu poprzecznego zglądu metalograficznego zawierała pięć kryteriów:

1. Kąt honowania,
2. Orientacja rys honowania,
3. Ukształtowanie powierzchni plateau,
4. Skazy strefy podpowierzchniowej warstwy wierzchniej,
5. Odchylenie od prostoliniowości krawędzi zglądu metalograficznego oraz jej nieciągłości, szczyrbości i wykruszenia.

Rozpatrywane kryteria (wskaźniki jakości) mają oceny w skali od 1 do 10 oraz każde z nich znaczenie (wagę, współczynnik ważności).

4.2. Badania doświadczalne tulei cylindrowych

Badania doświadczalne przeprowadzono, korzystając z tulei cylindrowych dla silników o zapłonie samoczynnym stosowanych w samochodach ciężarowych. Materiałem tulei było żeliwo szare perlityczne z wyraźnie ukształtowaną eutektyką fosforową, którego minimalna wytrzymałość na rozciąganie wynosiła 320 MPa, natomiast twardość 218 HB.

Pierwszym etapem obróbki gładzi cylindrowej było wytaczanie zgrubne, a następnie tuleje były honowane wstępnie na maszynie SZS-250 firmy WMW z wykorzystaniem osełek diamentowych D151 oznaczonych jako $5 \times 5 \times 75/3/$ D151/112/x44/35, gdzie:

- $5 \times 5 \times 75/3$ – szerokość \times wysokość \times długość / wysokość warstwy diamentowej w mm,
- D – rodzaj materiału ściernego (diament),
- 151 – numer wielkości ścierniwa diamentowego (rozmiar ziarna 150/125 μm),
- 112 – typ ziarna diamentowego wg producenta,

- x44 – rodzaj spoiwa – (x44 – spoiwo brązowe o średniej twardości),
- 35 – koncentracja ziarna (ilość diamentu w karatach w 1 cm³ warstwy diamentowej – 2.2 kt/cm³).

Po gładzeniu wstępnym wartość parametru chropowatości powierzchni otworu Rz(DIN) wynosiła 19 μm. Kryteriami gładzenia wstępnego były: duża wydajność objętościowa skrawania i duża dokładność wymiarowo-kształtowa otworu. Chłodzenie strefy skrawania podczas honowania realizowano z wykorzystaniem syntetycznej cieczy chłodząco-smarującej – HON 15. Zmiana średnicy wewnętrznej tulei podczas honowania wstępnego wynosiła 0.05 mm, przy zastosowaniu jednego wrzeciona.

Kolejnym etapem obróbki tulei było honowanie wykończeniowe i ostateczne, które zrealizowano na maszynie Gehring model SZS150.M. W trakcie honowania wykończeniowego nacięto głębokie rysy smarowe. Powstała struktura jednoprosowa. Podczas gładzenia ostatecznego nastąpiło ścięcie wierzchołków, uzyskano strukturę płaskowierzchołkową.

Na potrzeby badań tuleje po honowaniu wstępnym podzielono na dwie grupy. Pierwsza grupa tulei została poddana honowaniu wykończeniowemu oraz ostatecznemu z użyciem osełek z warstwą diamentową.

W procesie honowania wykończeniowego zastosowano osełki D76 (D75/112/x44/25), natomiast w procesie honowania ostatecznego osełki D15 (D15/118/x44/75).

Proces honowania wykończeniowego i ostatecznego tulei z drugiej grupy przeprowadzono z wykorzystaniem osełek ze spoiwem ceramicznym. Honowanie wykończeniowe realizowano przy pomocy osełek 8×10×150 GS150-60GV4S, natomiast ostateczne – 8×10×100 YC500-R_5-V.

W procesie honowania wykończeniowego zastosowano 2 wrzeciona, natomiast honowania ostatecznego – 3 wrzeciona. Zmiana średnicy wewnętrznej tulei cylindrowych podczas honowania wykończeniowego wynosiła 0.04 mm, zaś ostatecznego około 0.005 mm. Jako chłodziwo zastosowano także ciecz HON 15.

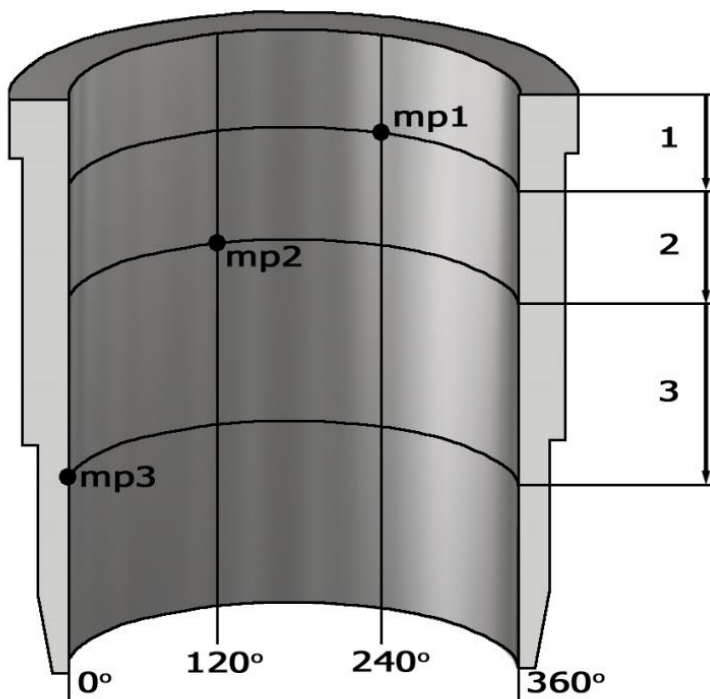
Dla obu grup tulei cylindrowych podczas honowania wykończeniowego stosowano 3 wartości dosuwu. Honowanie ostateczne realizowane było dla różnych czasów obróbki.

Pomiar struktury geometrycznej powierzchni tulei po honowaniu wykończeniowym i ostatecznym wykonano z wykorzystaniem profilometru stykowego Perthometer S8P. Obszar pomiaru wynosił 4 mm × 4 mm, przy kroku 5 μm w kierunkach wzajemnie prostopadłych.

Pomiar każdej tulei wykonano w trzech miejscach we wzrastającej odległości od czoła tulei, przy różnym ustawieniu kątowym w punktach mp1, mp2 i mp3 (rys. 4.4.). Zarys kształtu aproksymowano wielomianem stopnia trzeciego.

Analizowano powierzchnię po odjęciu aproksymowanego zarysu kształtu. Nie stosowano filtracji cyfrowej.

Powierzchnie po honowaniu wykończeniowym wykonanym z użyciem osełek z warstwą diamentową przy wzrastającej wartości dosuwu nazwano zgodnie z oznaczeniem przedstawionym w tabeli 4.5. Analizę struktury geometrycznej powierzchni wykonano w oprogramowaniu AltiMap Premium 6.2. Wyniki pomiarów SGP tulei cylindrowych w jednym punkcie pomiarowym (mp1) przedstawiono poniżej. Oprócz parametrów Sk , Spk , Svk , $Sr1$ i $Sr2$ będących trójwymiarowymi odpowiednikami parametrów Rk (Pk), Rpk (Ppk), Rvk (Pvk), $Rmr1$ ($Pmr1$) i $Rmr2$ ($Pmr2$) oraz w przypadku powierzchni po honowaniu ostatecznym parametrów Spq , Svq i Smq zastosowano wybrane parametry zgodnie z normą ISO 25178-2. Parametry te opisano w monografii [117].



Rys. 4.4. Miejsca pomiaru struktury geometrycznej powierzchni tulei cylindrowych

Parametry wysokości

- średnia kwadratowa wysokość powierzchni Sq ; wartość parametru to wartość odchylenia standardowego rozkładu wysokości powierzchni; dla profilu chropowatości odpowiednikiem tego parametru jest Rq ,

- średnia arytmetyczna rzędnych powierzchni Sa ; parametr jest silnie skorelowany z parametrem Sq (na ogół przyjmuje się, że $Sq = 1.25 \cdot Sa$); dla profilu chropowatości odpowiednikiem tego parametru jest Ra ,
- współczynnik asymetrii powierzchni Ssk ; skośność rozkładu wysokości powierzchni; ujemna wartość parametru świadczy o płaskim obszarze w części wierzchołkowej oraz występowaniu głębokich dolin, natomiast dodatnia wartość parametru cechuje powierzchnie z dużą ilością wierzchołków na płaszczyźnie; dla profilu chropowatości odpowiednikiem tego parametru jest Rsk ,
- współczynnik nachylenia powierzchni Sku ; kurtoza, parametr określa płaskość rozkładu wysokości powierzchni; dodatnia wartość parametru świadczy o ostrym, natomiast ujemna o stępionym kształcie nierówności powierzchni; dla profilu chropowatości odpowiednikiem tego parametru jest Rku ,
- maksymalna wysokość wzniesienia powierzchni Sp ; wysokość pomiędzy najwyższym szczytem a płaszczyzną średnią powierzchni; dla profilu chropowatości odpowiednikiem tego parametru jest Rp ,
- maksymalna głębokość wgłębienia powierzchni Sv ; głębokość pomiędzy płaszczyzną średnią a najgłębszą doliną powierzchni; dla profilu chropowatości odpowiednikiem tego parametru jest Rv ,
- największa wysokość powierzchni Sz ; odległość pomiędzy najgłębszą doliną a najwyższym szczytem powierzchni; stanowi sumę wartości bezwzględnych parametrów Sp i Sv ; dla profilu chropowatości odpowiednikiem tego parametru jest Rz .

Parametry przestrzenne

- długość autokorelacji Sal ; odległość pozioma funkcji autokorelacji, dla której obserwuje się najszybszy spadek do wartości wynoszącej 0.2 (w przypadku profilu chropowatości – 0.1); duża wartość parametru świadczy o dużej długości fali SGP,
- współczynnik kształtu struktury geometrycznej powierzchni Str ; stosunek odległości poziomej, dla której funkcja autokorelacji osiąga najszybszy – do odległości poziomej, dla której funkcja autokorelacji osiąga najwolniejszy – spadek do wartości 0.2; wartość parametru bliska 1 przyjmują powierzchnie izotropowe, natomiast bliska 0 – powierzchnie anizotropowe.

Parametry hybrydowe

- średniokwadratowe nachylenie powierzchni Sdq ; parametr reprezentuje średnią kwadratową przyrostu wartości nachylenia pomiędzy sąsiednimi wartościami rzędnych powierzchni w prostopadłych kierunkach; dla profilu chropowatości odpowiednikiem tego parametru jest Rdq ,
- współczynnik rozwinięcia obszaru powierzchni Sdr ; parametr charakteryzuje złożoność powierzchni, jego wartość zawiera się najczęściej w przedziale

0–10% – dla powierzchni idealnie płaskiej i gładkiej wartość tego parametru wynosi 0%.

Parametry funkcyjne (związane z objętością)

- objętość pustek wgłębień powierzchni V_{vv} ; parametr charakteryzuje objętość pustych obszarów dla udziału materiałowego p (domyślnie $p = 80\%$),
- objętość pustek rdzenia powierzchni V_{vc} ; parametr charakteryzuje objętość pustych obszarów pomiędzy udziałami materiałowymi q i p (domyślnie $q = 10\%$, a $p = 80\%$),
- objętość materiału wierzchołków powierzchni V_{mp} ; parametr charakteryzuje objętość materiału dla udziału materiałowego q (domyślnie $q = 10\%$); parametr określa objętość, która może zostać usunięta na skutek interakcji z inną powierzchnią,
- objętość materiału rdzenia powierzchni V_{mc} ; parametr charakteryzuje objętość materiału pomiędzy udziałami materiałowymi p i q (domyślnie $p = 80\%$, a $q = 10\%$); parametr określa część objętości materiału, która w przypadku kontaktu z inną powierzchnią nie wchodzi z nią w interakcję.

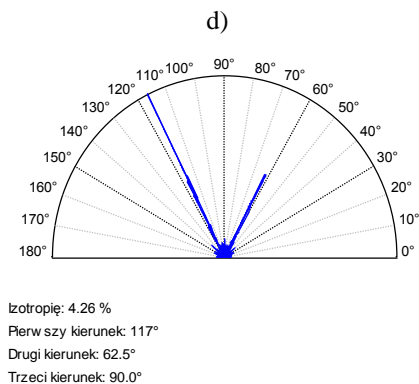
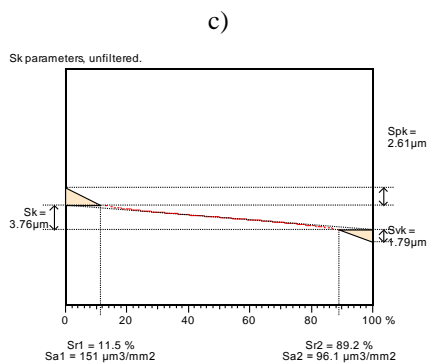
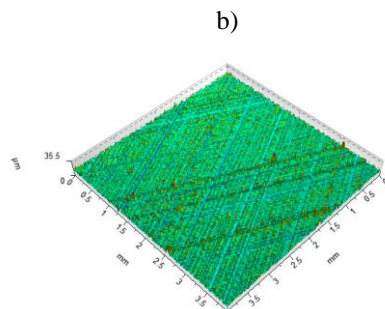
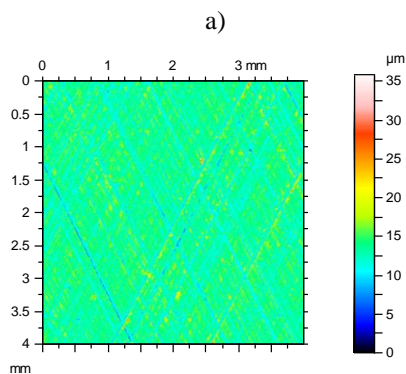
Parametry związane z cechami

- gęstość wierzchołków Spd ; parametr charakteryzuje liczbę wierzchołków powierzchni występujących na określonym obszarze,
- średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołka Sp_c ; parametr charakteryzuje średnią arytmetyczną krzywizny głównych wierzchołków występujących w obszarze mierzonym; duża wartość parametru świadczy o małym promieniu krzywizny, czyli o ostrych wierzchołkach na powierzchni mierzonej, natomiast mała wartość – o dużych wartościach promienia krzywizny, który jest charakterystyczny dla powierzchni o szerokim kształcie wierzchołków.

Tabela 4.5. Oznaczenia grup powierzchni cylindrów honowanych za pomocą oselek z warstwą diamentową w zależności od rodzaju honowania

Rodzaj honowania	Oznaczenie powierzchni		
Wykończeniowe	DK1.2	DK1.3	DK1.4
Ostateczne	DK1.2.5	DK1.3.8	DK1.4.11
	DK1.2.6	DK1.3.9	DK1.4.12
	DK1.2.7	DK1.3.10	DK1.4.13

Rysunki 4.5., 4.6. i 4.7. przedstawiają wyniki pomiarów SGP tulei cylindrowych po gładzeniu wykończeniowym z użyciem oselek z warstwą diamentową.



e)

Parametry wysokości

Sq	1.74 μm
Ssk	0.865
Sku	7.47
Sp	22.5 μm
Sv	13.4 μm
Sz	35.8 μm
Sa	1.29 μm

Parametry przestrzenne

Sal	0.0195 mm
Str	0.0353

Parametry hybrydowe

Sdq	0.286
Sdr	3.93%

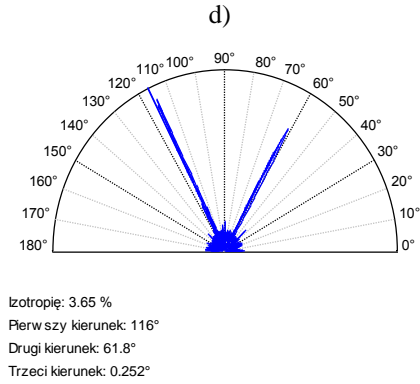
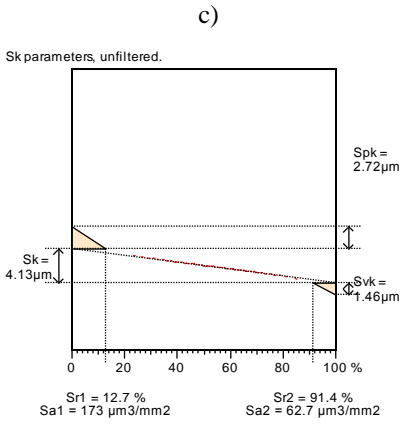
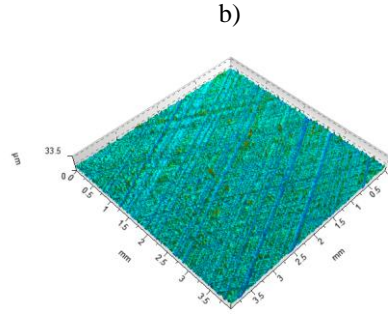
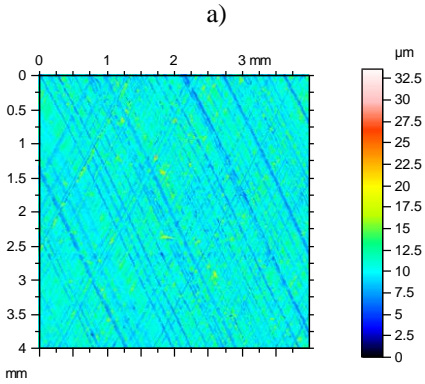
Parametry funkcyjne (objętość)

Vmp	0.000136 mm^3/mm^2
Vmc	0.00135 mm^3/mm^2
Vvc	0.00195 mm^3/mm^2
Vvv	0.000187 mm^3/mm^2

Parametry związane z cechami

Spd	156 $1/\text{mm}^2$
Spc	0.136 $1/\text{mm}$

Rys. 4.5. Powierzchnia DK1.2. a) mapa konturowa, b) widok izometryczny, c) wykres udziału materiałowego, d) kierunkowość powierzchni, e) parametry wg normy ISO 25178-2



e)

Parametry hybrydowe

Sdq 0.331
Sdr 5.22%

Parametry funkcyjne (objętość)

Vmp 0.00014 mm^3/mm^2
Vmc 0.00146 mm^3/mm^2
Vvc 0.00222 mm^3/mm^2
Vvv 0.000166 mm^3/mm^2

Parametry wysokości

Sq 1.82 μm
Ssk 0.903
Sku 5.80
Sp 23.4 μm
Sv 10.2 μm
Sz 33.6 μm
Sa 1.38 μm

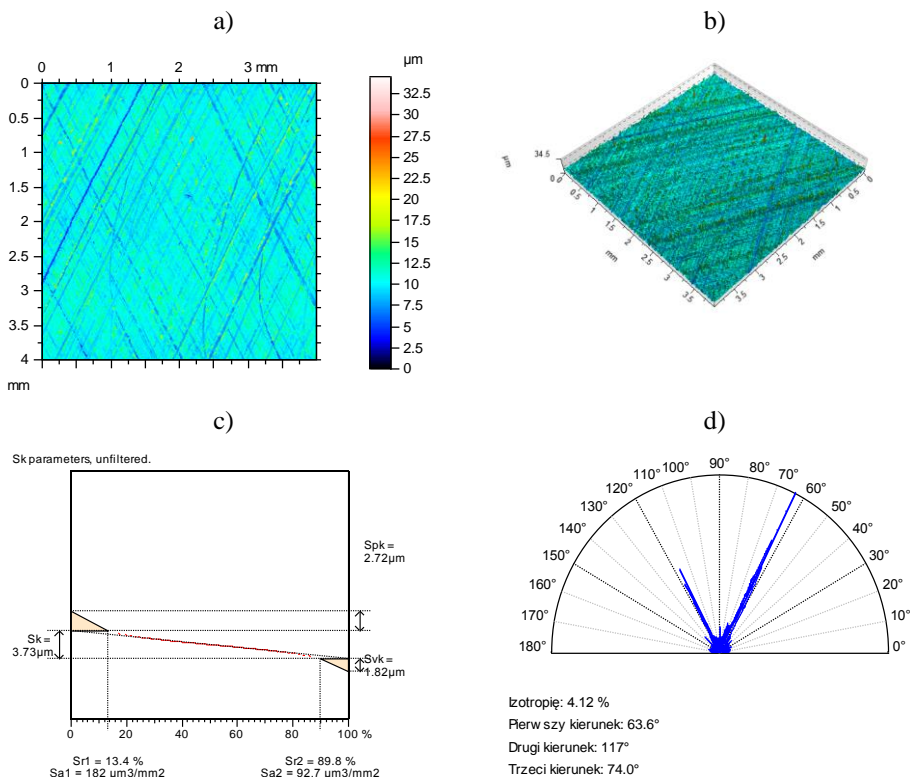
Parametry przestrzenne

Sal 0.0195 mm
Str 0.0332

Parametry związane z cechami

Spd 236 $1/\text{mm}^2$
Spc 0.159 $1/\text{mm}$

Rys. 4.6. Powierzchnia DK1.3. a) mapa konturowa, b) widok izometryczny, c) wykres udziału materiałowego, d) kierunkowość powierzchni, e) parametry wg normy ISO 25178-2



Parametry wysokości

Sq	1.79 μm
Ssk	0.790
Sku	6.71
Sp	24.1 μm
Sv	10.4 μm
Sz	34.5 μm
Sa	1.32 μm

Parametry przestrzenne

Sal	0.0156 mm
Str	0.0346

e)

Parametry hybrydowe

Sdq	0.319
Sdr	4.85%

Parametry funkcyjne (objętość)

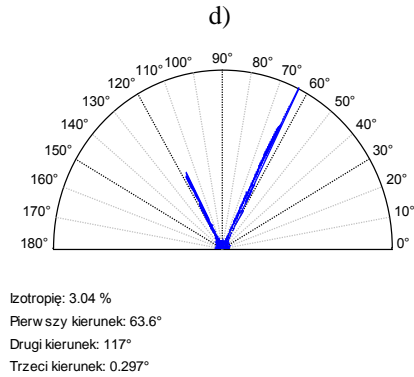
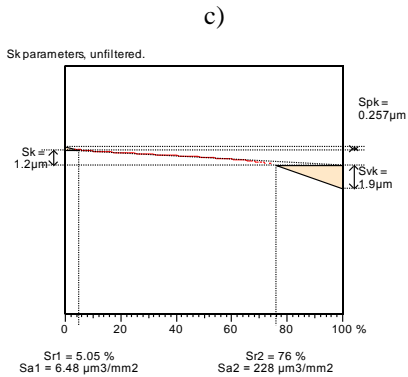
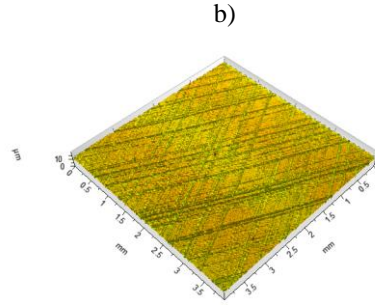
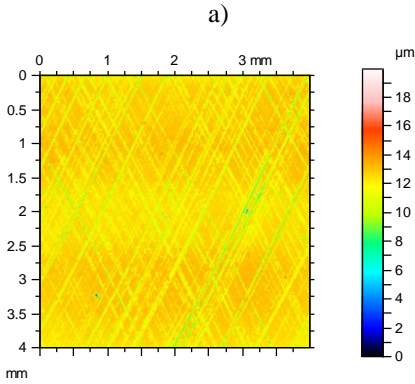
Vmp	0.000139 mm^3/mm^2
Vmc	0.00136 mm^3/mm^2
Vvc	0.0021 mm^3/mm^2
Vvv	0.000189 mm^3/mm^2

Parametry związane z cechami

Spd	199 $1/\text{mm}^2$
Spc	0.147 $1/\text{mm}$

Rys. 4.7. Powierzchnia DK1.4. a) mapa konturowa, b) widok izometryczny, c) wykres udziału materiałowego, d) kierunkowość powierzchni, e) parametry wg normy ISO 25178-2

W dalszej części monografii (rysunki 4.8., 4.9. i 4.10.) przedstawiono wyniki pomiarów SGP cylindrów z grupy DK1.3.x po honowaniu ostatecznym z użyciem oselek z warstwą diamentową.



e)

Parametry funkcyjne (objętość)

Vmp	1.35e-005 mm ³ /mm ²
Vmc	0.000683 mm ³ /mm ²
Vvc	0.000604 mm ³ /mm ²
Vvv	0.000182 mm ³ /mm ²

Parametry związane z cechami

Spd	15.8 1/mm ²
Spc	0.085 1/mm

Parametry funkcyjne (Sq)

Spq	0.275 micrometers
Svq	1.642 micrometers
Smq	64.3%

Parametry wysokości

Sq	0.859 micrometers
Ssk	-1.71
Sku	7.33
Sp	7.66 micrometers
Sv	12.3 micrometers
Sz	19.9 micrometers
Sa	0.633 micrometers

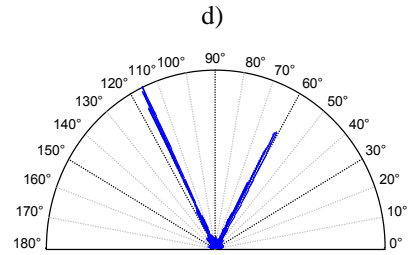
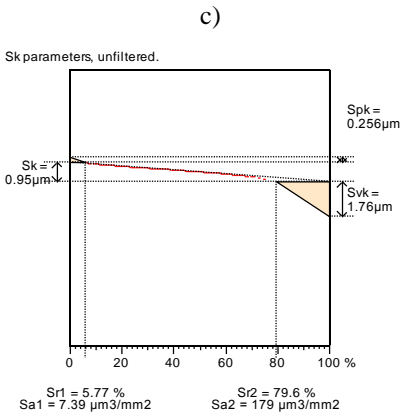
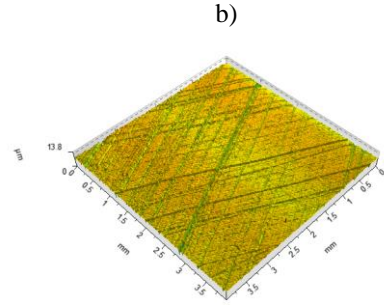
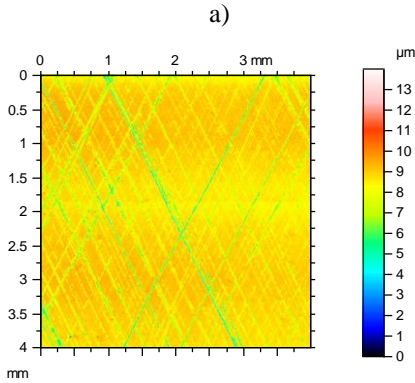
Parametry przestrzenne

Sal	0.0195 mm
Str	0.0264

Parametry hybrydowe

Sdq	0.153
Sdr	1.13%

Rys. 4.8. Powierzchnia DK1.3.8. a) mapa konturowa, b) widok izometryczny, c) wykres udziału materiałowego, d) kierunkowość powierzchni, e) parametry wg normy ISO 25178-2



Izotropię: 4.12 %
 Pierwszy kierunek: 116°
 Drugi kierunek: 61.3°
 Trzeci kierunek: 66.4°

Parametry wysokości

Sq 0.732 μm
 Ssk -2.33
 Sku 10.6
 Sp 5.41 μm
 Sv 8.57 μm
 Sz 14.0 μm
 Sa 0.493 μm

Parametry przestrzenne

Sal 0.0234 mm
 Str 0.0369

Parametry hybrydowe

Sdq 0.129
 Sdr 0.82%

e)

Parametry funkcyjne (objętość)

Vmp 1.33e-005 mm^3/mm^2
 Vmc 0.000443 mm^3/mm^2
 Vvc 0.000442 mm^3/mm^2
 Vvv 0.000174 mm^3/mm^2

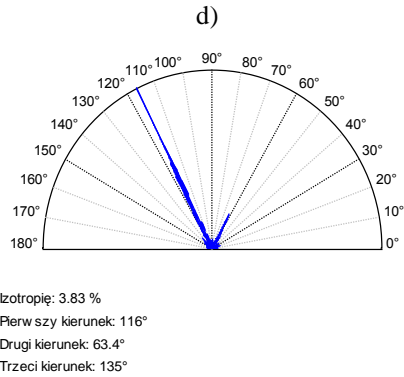
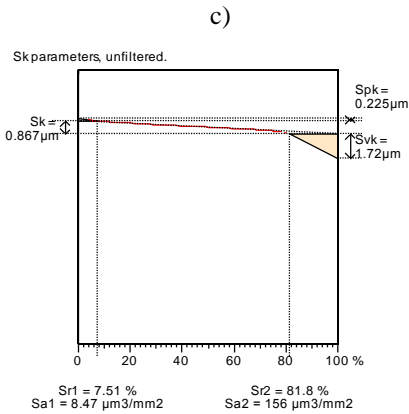
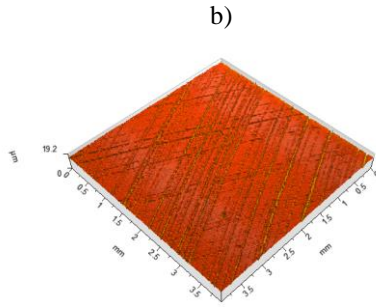
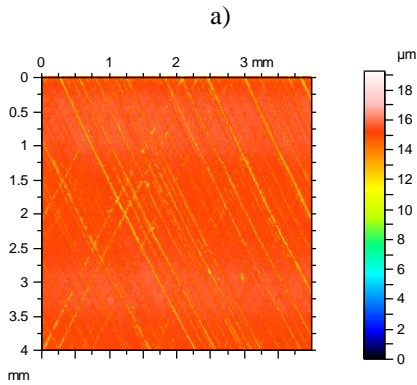
Parametry związane z cechami

Spd 49.2 $1/\text{mm}^2$
 Spc 0.0781 $1/\text{mm}$

Parametry funkcyjne (Sq)

Spq 0.252 μm
 Svq 1.643 μm
 Smq 76.1%

Rys. 4.9. Powierzchnia DK1.3.9. a) mapa konturowa, b) widok izometryczny, c) wykres udziału materiałowego, d) kierunkowość powierzchni, e) parametry wg normy ISO 25178-2



e)

Parametry funkcyjne (objętość)

Vmp 1.06e-005 mm³/mm²
 Vmc 0.000362 mm³/mm²
 Vvc 0.000409 mm³/mm²
 Vvv 0.00016 mm³/mm²

Parametry związane z cechami

Spd 7.57 1/mm²
 Spc 0.0855 1/mm

Parametry funkcyjne (Sq)

Spq 0.25 µm
 Svq 1.648 µm
 Smq 79.7%

Parametry wysokości

Sq 0.652 µm
 Ssk -2.53
 Sku 14.5
 Sp 4.23 µm
 Sv 15.0 µm
 Sz 19.3 µm
 Sa 0.429 µm

Parametry przestrzenne

Sal 0.0195 mm
 Str 0.0332

Parametry hybrydowe

Sdq 0.124
 Sdr 0.758%

Rys. 4.10. Powierzchnia DK1.3.10. a) mapa konturowa, b) widok izometryczny, c) wykres udziału materiałowego, d) kierunkowość powierzchni, e) parametry wg normy ISO 25178-2

Analizę zmian przedstawionych parametrów SGP tulei cylindrowych, na skutek honowania ostatecznego, pokazano na przykładzie powierzchni DK1.3, DK1.3.8, DK1.3.9 oraz DK1.3.10 (tabela 4.6.).

Tabela 4.6. Parametry stereometrii powierzchni tulei cylindrowych DK1.3, DK1.3.8, DK 1.3.9 i DK 1.3.10

	DK1.3	DK1.3.8	DK1.3.9	DK1.3.10
Sq, μm	1.82	0.859	0.732	0.652
Ssk	0.903	-1.71	-2.33	-2.53
Sku	5.8	7.33	10.6	14.5
Sp, μm	23.4	7.66	5.41	4.23
Sv, μm	10.2	12.3	8.57	15
Sz, μm	33.6	19.9	14	19.3
Sa, μm	1.38	0.633	0.493	0.429
Sal, mm	0.0195	0.0195	0.0234	0.0195
Str	0.0332	0.0264	0.0369	0.0332
Sdq	0.331	0.153	0.129	0.124
Sdr, %	5.22	1.15	0.82	0.758
Vmp, mm^3/mm^2	0.00014	1.35E-05	1.33E-05	1.06E-05
Vmc, mm^3/mm^2	0.00146	0.000683	0.000443	0.000362
Vvc, mm^3/mm^2	0.00222	0.000604	0.000442	0.000409
Vvv, mm^3/mm^2	0.000166	0.000182	0.000174	0.00016
Spd, $1/\text{mm}^2$	235	16.1	49.5	7.76
Spe, $1/\text{mm}$	0.158	0.085	0.0781	0.0855
Sk, μm	4.13	1.2	0.95	0.867
Spk, μm	2.72	0.256	0.258	0.225
Svk, μm	1.46	1.9	1.76	1.72
Sr1, %	12.7	5.05	5.77	7.51
Sr2, %	91.4	76	79.6	81.8
Spq, μm	-	0.265	0.252	0.25
Svq, μm	-	1.642	1.643	1.648
Smq, %	-	64.3	76.1	79.7

W wyniku honowania wykończeniowego uzyskano losową anizotropową powierzchnię jednoprosową, która zawierała wysokie wierzchołki (dodatnia wartość parametru *Ssk*). Honowanie ostateczne spowodowało zmniejszenie wysokości nierówności oraz pochylenia, a na samej powierzchni zaobserwowano ślady dwóch procesów obróbkowych, dzięki czemu możliwe było wyznaczenie parametrów *Smq*, *Spq* i *Svq*.

Wartości parametrów amplitudowych *Sq*, *Sp*, *Sa* oraz *Sdq*, *Sdr*, *Sk* i *Svk* były najmniejsze w przypadku największych wartości czasu honowania, natomiast dla najmniejszych wartości czasu honowania wartość tych parametrów była największa. Podobną tendencję zaobserwowano dla wartości parametrów funkcyjnych z grupy *V*.

Niewielkie zmiany odnotowano w przypadku parametrów przestrzennych *Sal* i *Str*. Wraz ze wzrostem czasu honowania ostatecznego malała skośność powierzchni *Ssk*, natomiast wartość kurtozy *Sku* – wzrastała.

Zmniejszeniu uległy gęstość wierzchołków Spd oraz ich krzywizna Spc .

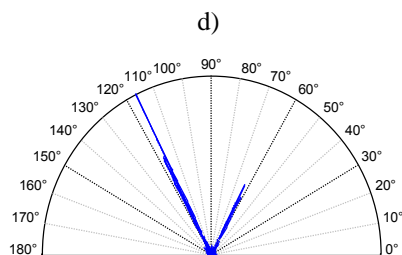
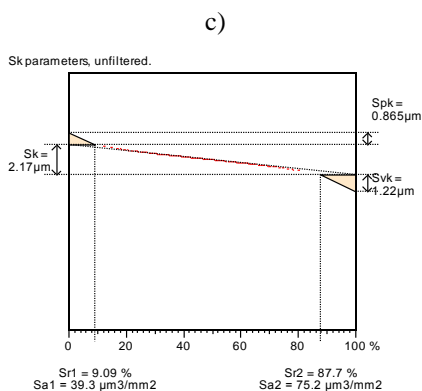
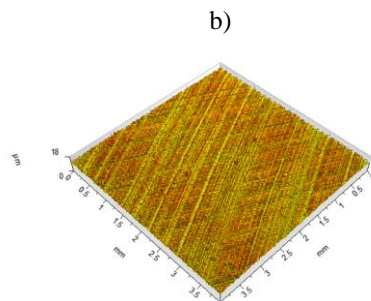
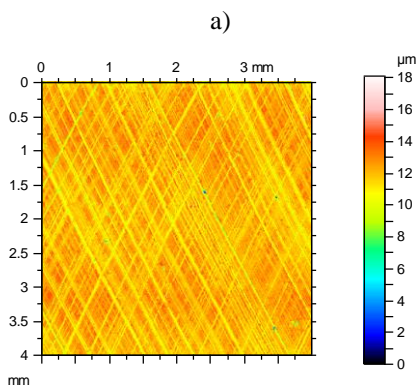
W przypadku parametrów Spq , Svq , Smq oraz Spk , Svk , Sk , $Sr1$ i $Sr2$, dla pierwszej grupy zaobserwowano, że wzrost czasu honowania ostatecznego powodował wzrost wartości wyróżnika Smq , przy zachowaniu stałych wartości parametrów Spq i Svq , natomiast wartości parametrów Sk i Svk zmniejszały się wraz ze wzrostem czasu honowania.

Analogiczne tendencje zmian parametrów zaobserwowano dla pozostałych grup tulei cylindrowych, które były honowane przy pomocy osełek z warstwą diamentową.

Powierzchnie po honowaniu wykończeniowym wykonanym z użyciem osełek ceramicznych przy wzrastającej wartości dosuwu nazwano zgodnie z oznaczeniem przedstawionym w tabeli 4.7. Wyniki pomiarów tych powierzchni w jednym punkcie pomiarowym (mp1) przedstawiono poniżej. Rysunki 4.11., 4.12. i 4.13. dotyczą SGP cylindrów po honowaniu wykończeniowym.

Tabela 4.7. Oznaczenia grup powierzchni cylindrów honowanych za pomocą osełek ceramicznych w zależności od rodzaju honowania

Rodzaj honowania	Oznaczenie powierzchni		
Wykończeniowe	SK1.2	SK1.3	SK1.4
Ostateczne	SK1.2.5	SK1.3.8	SK1.4.11
	SK1.2.6	SK1.3.9	SK1.4.12
	SK1.2.7	SK1.3.10	SK1.4.13



Izotropię: 3.78 %
 Pierwszy kierunek: 117°
 Drugi kierunek: 63.4°
 Trzeci kierunek: 135°

e)

Parametry hybrydowe

Sdq 0.187
 Sdr 1.73%

Parametry funkcyjne (objętość)

Vmp 4.42e-005 mm³/mm²
 Vmc 0.000781 mm³/mm²
 Vvc 0.00102 mm³/mm²
 Vvv 0.000122 mm³/mm²

Parametry wysokości

Sq 0.920 μm
 Ssk -0.375
 Sku 5.48
 Sp 6.20 μm
 Sv 11.9 μm
 Sz 18.1 μm
 Sa 0.708 μm

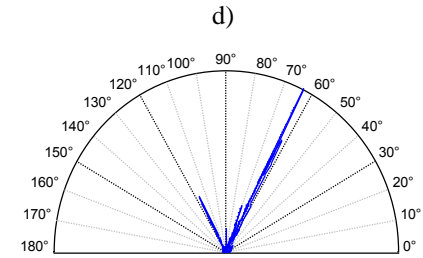
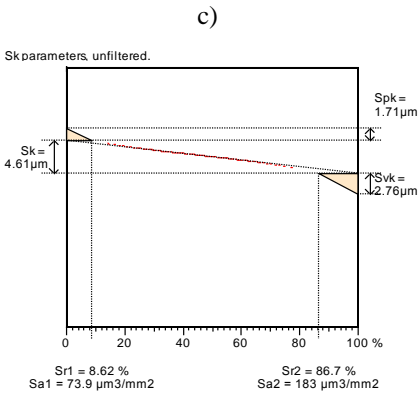
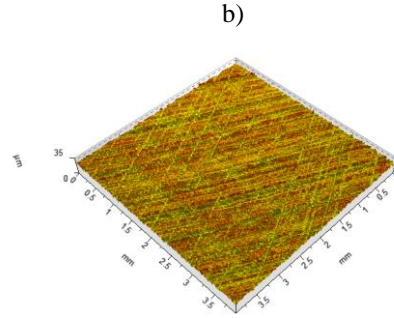
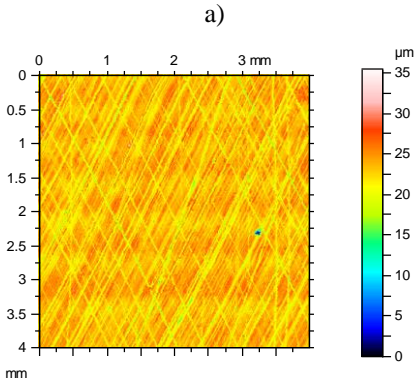
Parametry przestrzenne

Sal 0.0195 mm
 Str 0.0325

Parametry związane z cechami

Spd 235 1/mm²
 Spc 0.0922 1/mm

Rys. 4.11. Powierzchnia SK1.2. a) mapa konturowa, b) widok izometryczny, c) wykres udziału materiałowego, d) kierunkowość powierzchni, e) parametry wg normy ISO 25178-2



Izotropię: 2.91 %
 Pierwszy kierunek: 63.5°
 Drugi kierunek: 117°
 Trzeci kierunek: 71.4°

e)

Parametry hybrydowe

Sdq 0.360
 Sdr 6.22%

Parametry funkcyjne (objętość)

Vmp 8.67e-005 mm³/mm²
 Vmc 0.00169 mm³/mm²
 Vvc 0.00213 mm³/mm²
 Vvv 0.000282 mm³/mm²

Parametry wysokości

Sq 1.97 µm
 Ssk -0.498
 Sku 5.04
 Sp 12.4 µm
 Sv 23.1 µm
 Sz 35.5 µm
 Sa 1.52 µm

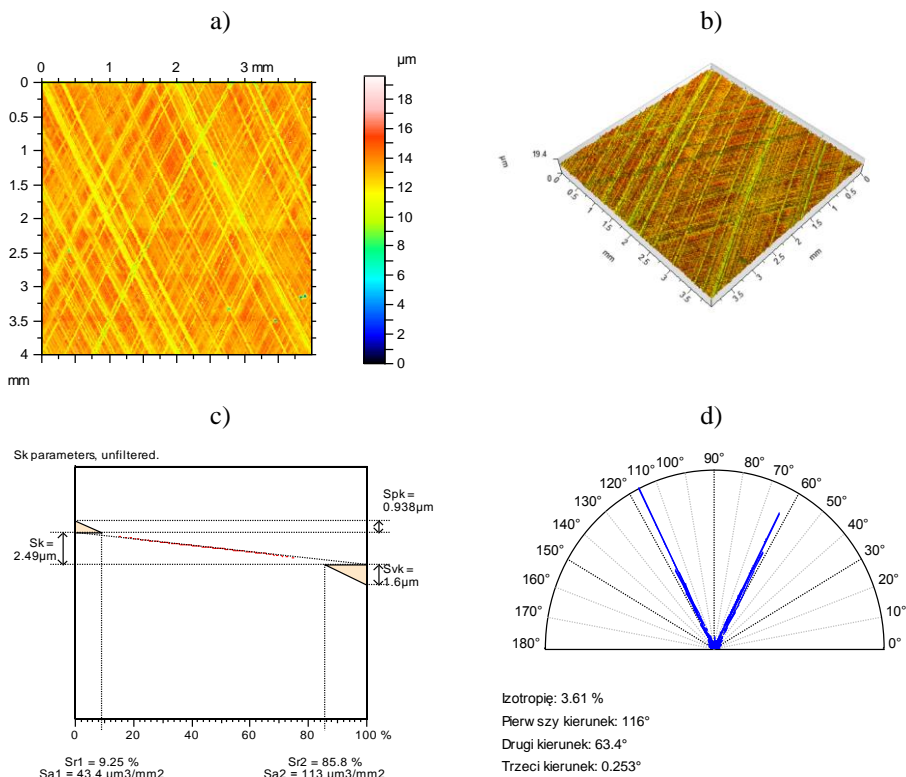
Parametry przestrzenne

Sal 0.0195 mm
 Str 0.026

Parametry związane z cechami

Spd 154 1/mm²
 Spc 0.139 1/mm

Rys. 4.12. Powierzchnia SK1.3. a) mapa konturowa, b) widok izometryczny, c) wykres udziału materiałowego, d) kierunkowość powierzchni, e) parametry wg normy ISO 25178-2



Parametry wysokości

Sq	1.11 μm
Ssk	-0.54
Sku	4.82
Sp	6.49 μm
Sv	13.1 μm
Sz	19.6 μm
Sa	0.851 μm

Parametry przestrzenne

Sal	0.0312 mm
Str	0.0355

e)

Parametry hybrydowe

Sdq	0.197
Sdr	1.89%

Parametry funkcyjne (objętość)

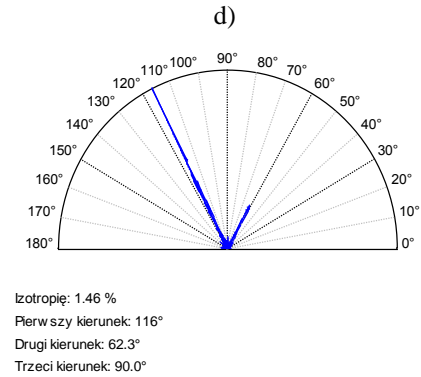
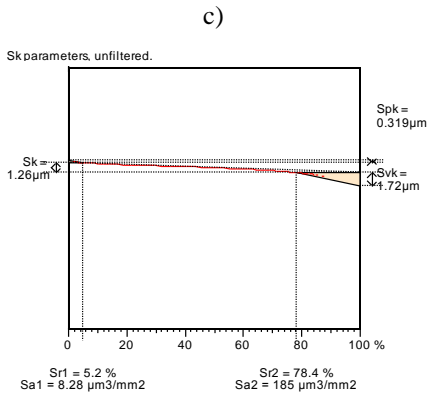
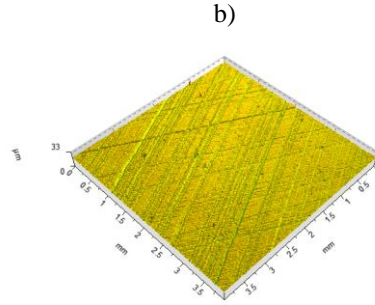
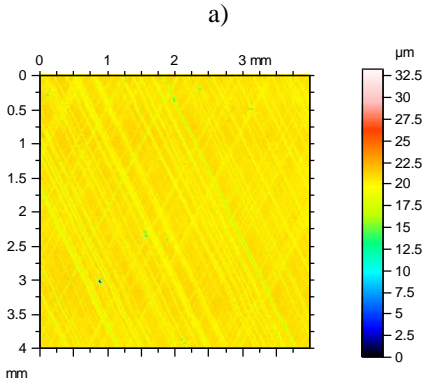
Vmp	4.75e-005 mm^3/mm^2
Vmc	0.000948 mm^3/mm^2
Vvc	0.00118 mm^3/mm^2
Vvv	0.000161 mm^3/mm^2

Parametry związane z cechami

Spd	202 1/mm ²
Spc	0.1 1/mm

Rys. 4.13. Powierzchnia SK1.4. a) mapa konturowa, b) widok izometryczny, c) wykres udziału materiałowego, d) kierunkowość powierzchni, e) parametry wg normy ISO 25178-2

Na rysunkach 4.14., 4.15. i 4.16. przedstawiono wyniki pomiarów stereometrii powierzchni tulei cylindrowych z grupy SK1.2.x po honowaniu ostatecznym z użyciem osełek ceramicznych.



e)

Parametry wysokości

Sq 0.814 µm
 Ssk -2.16
 Sku 21.3
 Sp 13.1 µm
 Sv 20.2 µm
 Sz 33.3 µm
 Sa 0.581 µm

Parametry przestrzenne

Sal 0.0195 mm
 Str 0.0129

Parametry hybrydowe

Sdq 0.170
 Sdr 1.41%

Parametry funkcyjne (objętość)

Vmp 1.63e-005 mm³/mm²
 Vmc 0.000601 mm³/mm²
 Vvc 0.000607 mm³/mm²
 Vvv 0.000164 mm³/mm²

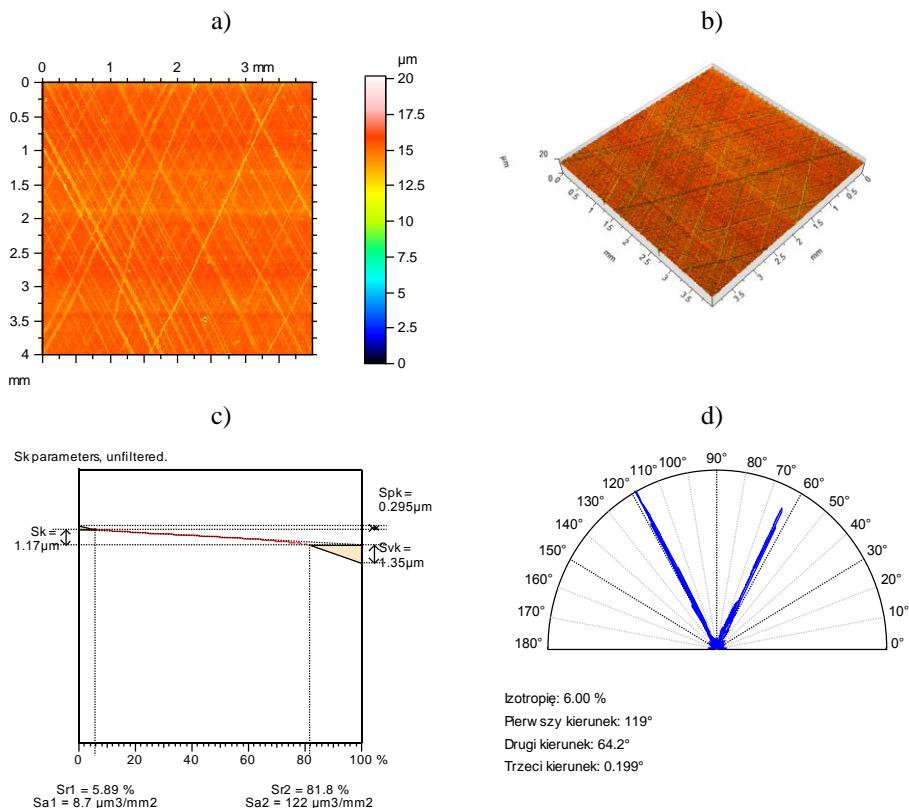
Parametry związane z cechami

Spd 17.6 1/mm²
 Spc 0.208 1/mm

Parametry funkcyjne (Sq)

Spq 0.313 µm
 Svq 1.01 µm
 Smq 58.6%

Rys. 4.14. Powierzchnia SK1.2.5. a) mapa konturowa, b) widok izometryczny, c) wykres udziału materiałowego, d) kierunkowość



Parametry wysokości

Sq	0.649 μm
Ssk	-2.05
Sku	15.4
Sp	5.17 μm
Sv	15.0 μm
Sz	20.2 μm
Sa	0.468 μm

Parametry przestrzenne

Sal	0.0234 mm
Str	0.0525

Parametry hybrydowe

Sdq	0.135
Sdr	0.902%

e)

Parametry funkcyjne (objętość)

Vmp	1.52e-005 mm^3/mm^2
Vmc	0.000487 mm^3/mm^2
Vvc	0.000532 mm^3/mm^2
Vvv	0.000126 mm^3/mm^2

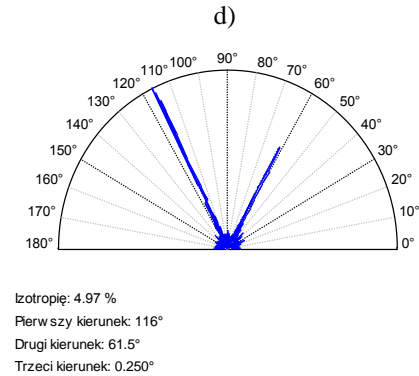
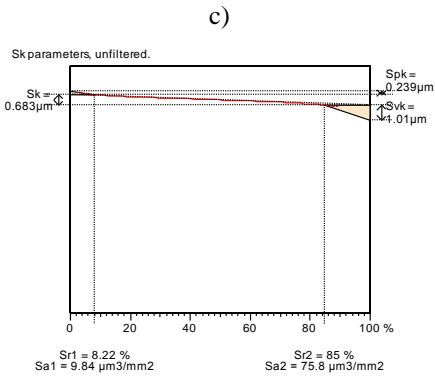
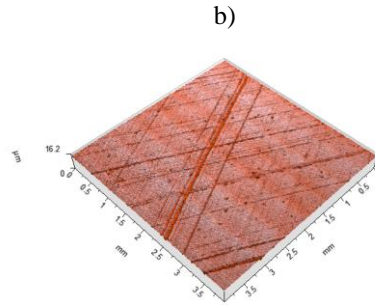
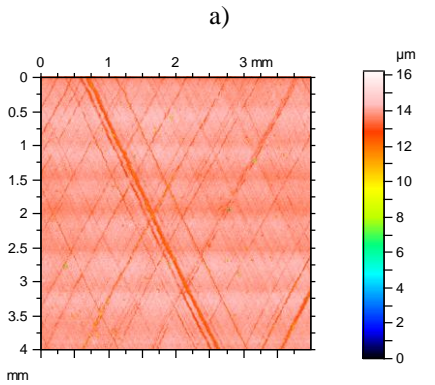
Parametry związane z cechami

Spd	18.1 $1/\text{mm}^2$
Spc	0.083 $1/\text{mm}$

Parametry funkcyjne (Sq)

Spq	0.274 μm
Svq	1.068 μm
Smq	70.5%

Rys. 4.15. Powierzchnia SK1.2.6. a) mapa konturowa, b) widok izometryczny, c) wykres udziału materiałowego, d) kierunkowość powierzchni, e) parametry wg normy ISO 25178-2



e)

Parametry wysokości

Sq 0.438 µm
 Ssk -4.4
 Sku 58.5
 Sp 2.35 µm
 Sv 13.9 µm
 Sz 16.3 µm
 Sa 0.274 µm

Parametry przestrzenne

Sal 0.0312 mm
 Str 0.0461

Parametry hybrydowe

Sdq 0.0984
 Sdr 0.477%

Parametry funkcyjne (objętość)

Vmp 1.12e-005 mm³/mm²
 Vmc 0.000257 mm³/mm²
 Vvc 0.000323 mm³/mm²
 Vvv 8.2e-005 mm³/mm²

Parametry związane z cechami

Spd 13 1/mm²
 Spc 0.0728 1/mm

Parametry funkcyjne (Sq)

Spq 0.261 µm
 Svq 1.0 µm
 Smq 90.5%

Rys. 4.16. Powierzchnia SK1.2.7. a) mapa konturowa, b) widok izometryczny, c) wykres udziału materiałowego, d) kierunkowość powierzchni, e) parametry wg normy ISO 25178-2

Analizę zmian wybranych parametrów SGP tulei cylindrowych, na skutek honowania ostatecznego z zastosowaniem oselek ceramicznych, przedstawia tabela 4.8.

Tabela 4.8. Wybrane parametry stereometrii powierzchni tulei cylindrowych SK1.2, SK1.2.5, SK1.2.6 i SK1.2.7

	SK1.2	SK1.2.5	SK1.2.6	SK1.2.7
Sq, μm	0.92	0.814	0.649	0.438
Ssk	-0.375	-2.16	-2.05	-4.4
Sku	5.48	21.3	15.4	58.5
Sp, μm	6.2	13.1	5.17	2.35
Sv, μm	11.9	20.2	15	13.9
Sz, μm	18.1	33.3	20.2	16.3
Sa, μm	0.708	0.581	0.468	0.274
Sal, mm	0.0195	0.0195	0.0234	0.0312
Str	0.0325	0.0129	0.0525	0.0461
Sdq	0.187	0.17	0.135	0.0984
Sdr, %	1.73	1.41	0.902	0.477
Vmp, mm^3/mm^2	4.42E-05	1.63E-05	1.52E-05	1.12E-05
Vmc, mm^3/mm^2	0.000781	0.000601	0.000487	0.000257
Vvc, mm^3/mm^2	0.00102	0.000607	0.000532	0.000323
Vvv, mm^3/mm^2	0.000122	0.000164	0.000126	8.20E-05
Spd, $1/\text{mm}^2$	235	17.6	18.1	13
Spc, $1/\text{mm}$	0.0922	0.207	0.083	0.0728
Sk, μm	2.17	1.26	1.17	0.683
Spk, μm	0.865	0.319	0.295	0.239
Svk, μm	1.22	1.72	1.35	1.01
Sr1, %	9.09	5.2	5.89	8.22
Sr2, %	87.7	78.4	81.8	85
Spq, μm	-	0.313	0.274	0.261
Svq, μm	-	1.01	1.068	1.0
Smq, %	-	58.6	70.5	90.5

Wynikiem zastosowania oselek ceramicznych w procesie honowania ostatecznego była również powierzchnia anizotropowa o asymetrycznym rozkładzie rzędnych (ujemna wartość parametru *Ssk*). Ponadto, zaobserwowano również mniejszą wysokość nierówności powierzchni po honowaniu ostatecznym w porównaniu do powierzchni, dla których honowanie ostateczne wykonano za pomocą oselek diamentowych.

Na skutek wydłużania czasu honowania ostatecznego można zauważyć zmniejszanie się wartości parametrów statystycznych *Sa*, *Sq*, parametrów *Sk*, *Spk*, parametrów hybrydowych oraz większości parametrów funkcyjnych z rodziny *V*. Zauważono podobny trend (jak w przypadku obróbki przy pomocy oselek z warstwą diamentową) związany z tym, że wartość parametrów malała wraz ze wzrostem czasu honowania, jednak różnice wartości parametrów były znacznie większe przy zastosowaniu oselek ceramicznych.

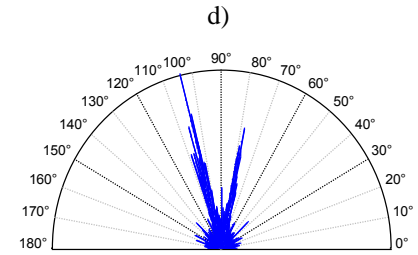
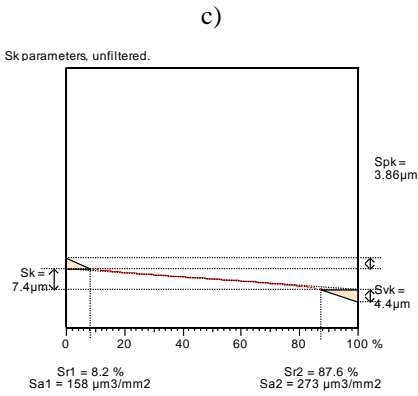
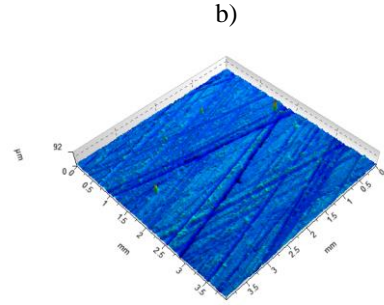
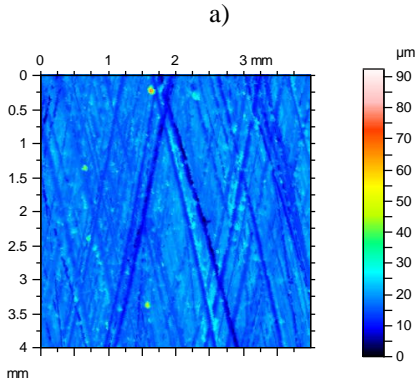
W przypadku parametrów Sp , Sv , Sz , Svk i Spc można zauważyć znaczny wzrost ich wartości po honowaniu ostatecznym przeprowadzonym dla najkrótszego czasu (powierzchnia SK1.2.5) w porównaniu z wartościami uzyskanymi dla powierzchni po honowaniu wykończeniowym (SK1.2). Wzrost czasu honowania ostatecznego sprawił, że wartość tych parametrów malała.

Ponadto, podczas honowania ostatecznego wystąpiło zmniejszenie skośności – Ssk oraz wzrost kurtozy – Sku , wzrost wartości parametru Sal i zmniejszenie gęstości wierzchołków Spd .

Wartość parametru Svq po honowaniu ostatecznym była zbliżona do wartości parametru Sq po honowaniu wykończeniowym, co może świadczyć o tym, że podczas honowania ostatecznego wystąpił ubytek materiału bez deformacji plastycznej. Analogiczną zależność można zauważyć dla tulei honowanych osłkami z warstwą diamentową. Podobnie jak to, że wzrost czasu honowania ostatecznego powodował niewielkie zmiany w wartości parametrów Spq i Svq w odróżnieniu od parametrów Sk i Svk , których wartości malały.

Analizując tendencje zmian wartości parametrów tulei po honowaniu z użyciem osłek diamentowych oraz ceramicznych, można zauważyć podobieństwo.

W badaniach analizowano również tuleję cylindrową uzyskaną po honowaniu wstępnym z wykorzystaniem osłek z warstwą diamentową (tzw. tuleję surową – rys. 4.17.).



Izotropię: 8.42 %
 Pierwszy kierunek: 104°
 Drugi kierunek: 78.8°
 Trzeci kierunek: 90.0°

e)

Parametry hybrydowe

Sdq 0.359
 Sdr 6.01%

Parametry funkcyjne (objętość)

Vmp 0.000201 mm³/mm²
 Vmc 0.0026 mm³/mm²
 Vvc 0.00337 mm³/mm²
 Vvv 0.000455 mm³/mm²

Parametry wysokości

Sq 3.37 µm
 Ssk 0.854
 Sku 18.2
 Sp 75.5 µm
 Sv 17.0 µm
 Sz 92.5 µm
 Sa 2.46 µm

Parametry przestrzenne

Sal 0.0429 mm
 Str 0.0813

Parametry związane z cechami

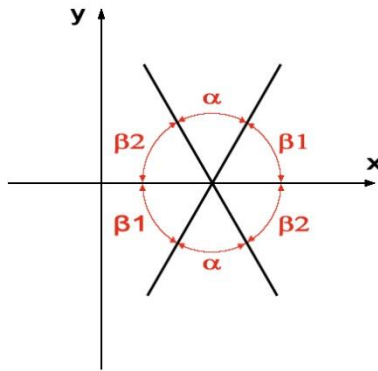
Spd 23.5 l/mm²
 Spc 0.18 l/mm

Rys. 4.17. Powierzchnia tulei surowej. a) mapa konturowa, b) widok izometryczny, c) wykres udziału materiałowego, d) kierunkowość powierzchni, e) parametry wg normy ISO 25178-2

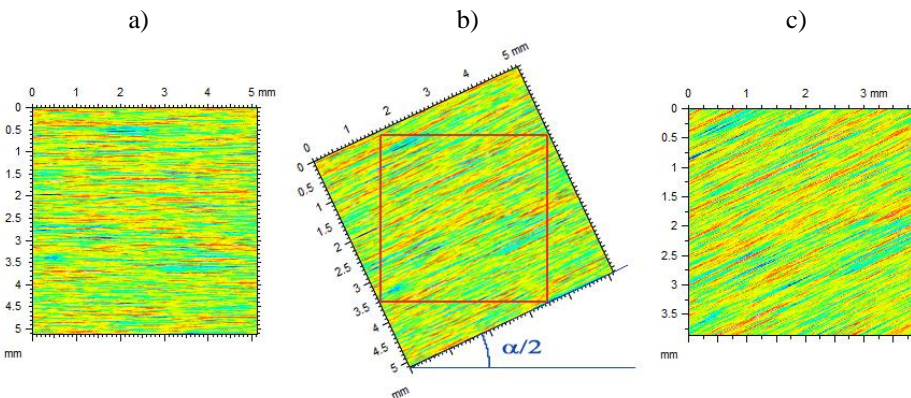
4.3. Modelowanie SGP honowanych tulei cylindrowych

4.3.1. Istota modelowania

Program do modelowania powierzchni wykonany został w środowisku Matlab. Procedura modelowania tulei cylindrowych po honowaniu przeprowadzona była w kilku krokach. Pierwszym z nich było generowanie powierzchni anizotropowej jednokierunkowej o normalnym rozkładzie rzędnych. Powierzchnię generowano przy pomocy procedury opisanej przez Wu [245], a danymi wejściowymi charakteryzującymi powierzchnię były trzy parametry – wariancja rzędnych (parametr *war*) oraz długości korelacji powierzchni w prostopadłych kierunkach (*dkx* i *dky*). Wygenerowaną powierzchnię obrócono o kąt równy połowie kąta honowania α (rys. 4.18.).



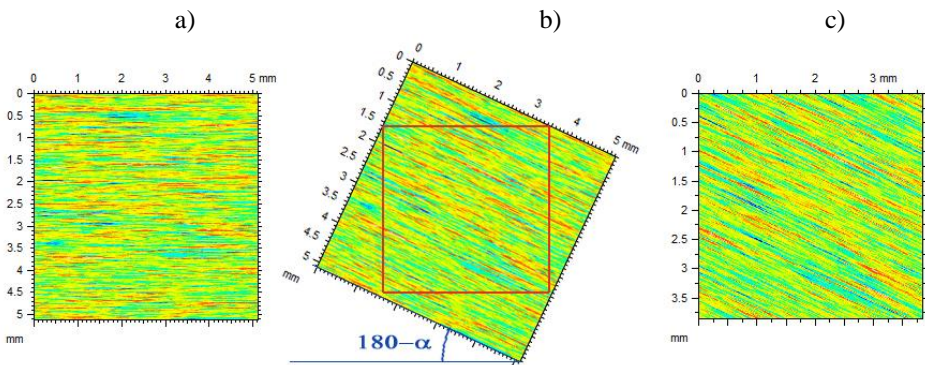
Rys. 4.18. Kąty na powierzchni gładzonej



Rys. 4.19. Powierzchnia a) jednokierunkowa, b) w trakcie obrotu o kąt $\alpha/2$, c) obrócona

Ze względu na fakt, iż obrót powierzchni polegał na obróceniu układu współrzędnych powierzchni jednokierunkowej, jej rozmiar musiał być znacznie większy niż powierzchni docelowej, gdyż na skutek obrotu część powierzchni została utracona (rys. 4.19.).

W celu modelowania powierzchni po honowaniu wykończeniowym powierzchnia obrócona została nałożona na rzeczywistą powierzchnię po honowaniu wstępnym (powierzchnię surową – rys. 4.17.). W pierwszym kroku głębokość nakładania (głębokość pokrywania się rzędnych obu powierzchni) powierzchni obróconej na powierzchnię surową była minimalna, powodująca zmianę stereometrii powierzchni wynikowej w porównaniu do powierzchni surowej. Algorytm porównywał wartości rzędnych obu powierzchni i wybierał te, które przyjmowały wartości mniejsze. W następnym kroku powierzchnię jednokierunkową (przed obrotem) obrócono w kierunku przeciwnym o kąt $180-\alpha$ (rys. 4.20.).



Rys. 4.20. Powierzchnia a) jednokierunkowa, b) w trakcie obrotu o kąt $180-\alpha$, c) obrócona

Powierzchnia ta ponownie była nakładana na powierzchnię powstałą w pierwszym etapie. W związku z tym, że podczas honowania wykończeniowego zwiększany jest dosuw, w każdym następnym kroku programu odległość pionowa obróconej powierzchni nakładanej od powstałej w ten sposób powierzchni modelowanej zmniejszała się o zdefiniowany krok, a liczba iteracji – n (parametr definiowany w programie) decydowała o ostatecznym kształcie modelowanej powierzchni po gładzeniu wykończeniowym.

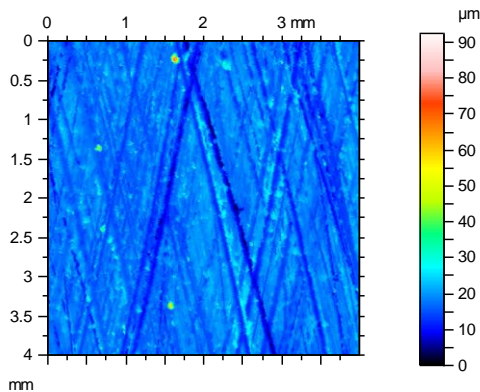
Kolejnym krokiem było modelowanie powierzchni powstającej podczas honowania ostatecznego. Jego istota była podobna do opisanej metody modelowania SGP po honowaniu wykończeniowym. Polegała ona na nakładaniu obróconych wygenerowanych powierzchni anizotropowych na powierzchnie zmierzone po honowaniu wykończeniowym. Biorąc jednak pod uwagę różnice technologiczne procesu honowania ostatecznego (w którym występuje stały docisk osełek), w porównaniu do honowania wykończeniowego – podczas modelowania

kształtowania powierzchni w każdej iteracji realizowano zagłębianie się średniej płaszczyzny powierzchni nakładanej (wtórnej) na głębokość równą jednakowemu udziałowi materiałowemu powierzchni podstawowej (pierwotnej), na którą nakładano powierzchnię wtórną. Odstwierczeniem zmiany czasu honowania ostatecznego była różna liczba iteracji w programie.

Do analizy zgodności dokładności przybliżenia powierzchni modelowanych do zmierzonych wykorzystano wyznaczone podczas wcześniejszych analiz [29, 66, 184] zestaw parametrów charakteryzujących tuleje cylindrowe: Sq , Sku , Sz , Sal , Str , Spq , Svq , Smq , Sk , Svk , $Sr2$. $Sr2$ jest udziałem nośnym na przecięciu obszaru rdzenia i dolin. Podczas badań opisywanych w tym rozdziale nie przyjęto jednoznacznego kryterium dopasowania powierzchni modelowanych do zmierzonych. Analizowano błędy względne parametrów powierzchni modelowanych.

Szczegółowy algorytm postępowania przy modelowaniu powierzchni po honowaniu wykończeniowym składał się z następujących kroków:

1. Wczytanie do pamięci rzędnych powierzchni surowej (PS) – po honowaniu wstępnym (rys. 4.21.). Może być to również powierzchnia wygenerowana wcześniej przy pomocy komputera.



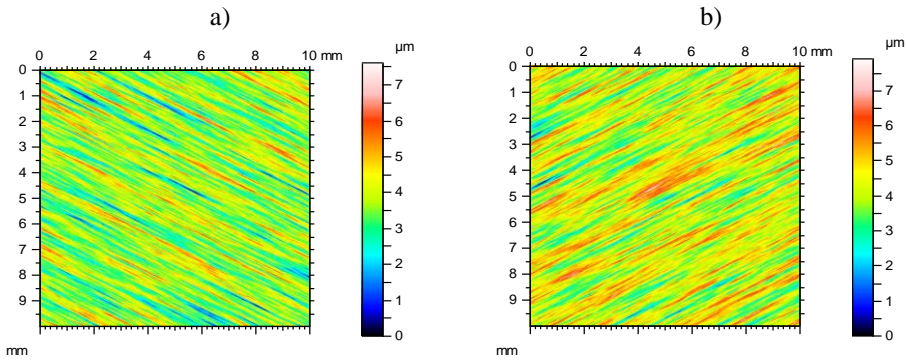
Rys. 4.21. Powierzchnia surowa (PS) – po honowaniu wstępnym

2. Generowanie powierzchni ukierunkowanej, obróconej o określony kąt (PO1).

Ze względu na to, iż do modelowania procesu honowania wykończeniowego program wybierał losowo fragmenty powierzchni PO1, jej pole było znacznie większe od pola powierzchni uzyskanej po modelowaniu.

W tym celu wygenerowana została powierzchnia jednokierunkowa, dla której parametrami wejściowymi były długości korelacji we wzajemnie prostopadłych kierunkach – dkx , dky oraz wariancja rzędnych – war (Sq^2). Powierzchnia ta została obrócona o kąt $\beta = \frac{(180^\circ - \alpha)}{2}$.

3. Generowanie (w analogiczny sposób) kolejnej powierzchni (PO2) obróconej o kąt $(180^\circ - \beta)$ – rys. 4.22.

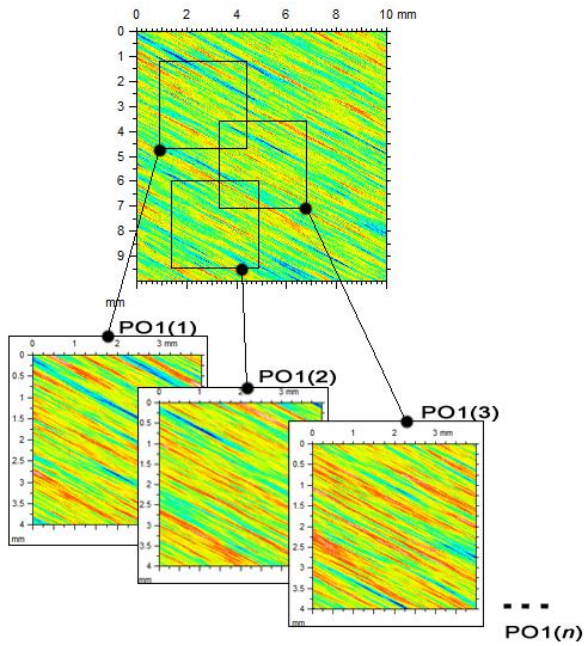


Rys. 4.22. Wygenerowane powierzchnie obrócone: a) PO1, b) PO2

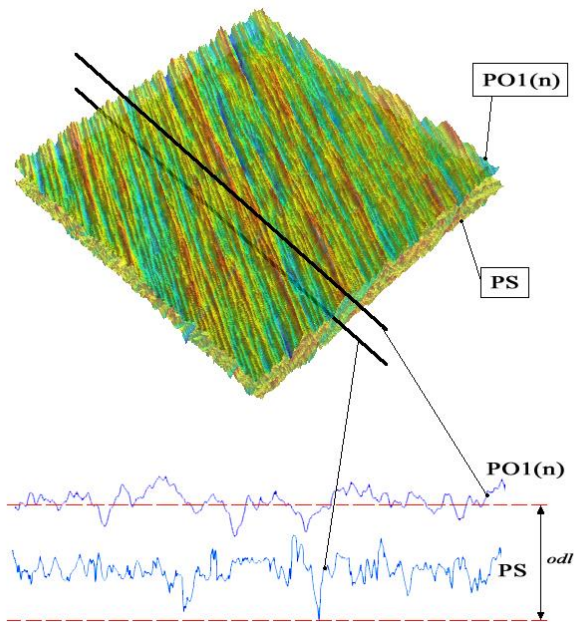
4. Losowy wybór fragmentu powierzchni PO1 – PO1(1) – rys. 4.23. Pole wybranego fragmentu musi być równe polu powierzchni surowej (PS). Tak wybrany fragment nakładany jest na powierzchnię surową przy założeniu odległości – *odl* – pomiędzy płaszczyzną średnią powierzchni PO1(1) i najniższym punktem powierzchni surowej (PS). Podczas nakładania obu powierzchni w pętli realizującej proces nakładania wybierane są rzędne o wartościach mniejszych – rys. 4.24. Powierzchnia uzyskana w wyniku złożenia obu powierzchni zastępuje powierzchnię surową.

5. Losowy wybór fragmentu powierzchni PO2 – PO2(1) – rys. 4.25. Procedura jest analogiczna jak w kroku 4, natomiast odległość pomiędzy nakładanymi powierzchniami zmniejszana jest o wartość kroku – (*odl* – *krok*) – zdefiniowanego w programie – rys. 4.26.

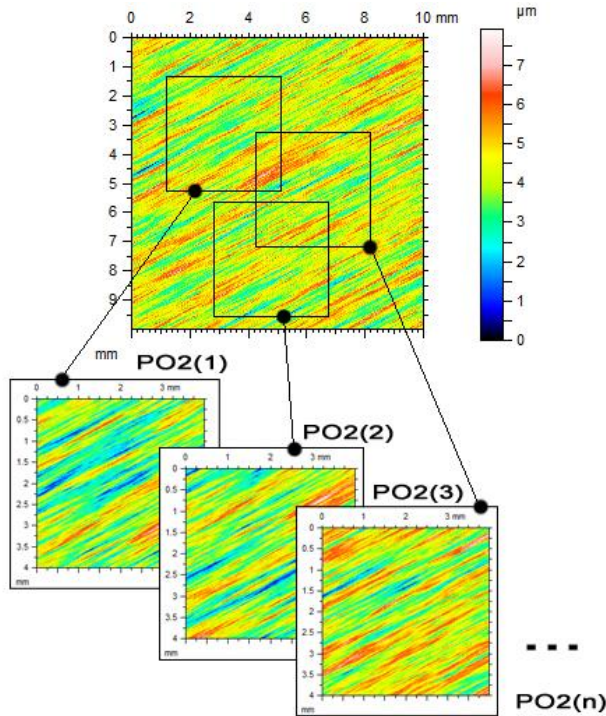
6. Punkty 4 i 5 algorytmu są powtarzane *n* razy, przy czym *n* jest to liczba iteracji definiowana podczas uruchamiania programu i należy ją interpretować jako wartość dosuwu podczas honowania (wzrost liczby iteracji jest równoważny wzrostowi wartości dosuwu).



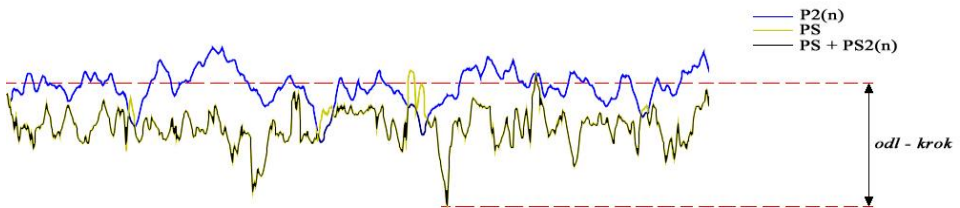
Rys. 4.23. Losowy wybór kolejnych fragmentów powierzchni PO1



Rys. 4.24. Początek nakładania losowo wybranego fragmentu powierzchni PO1 na powierzchnię PS

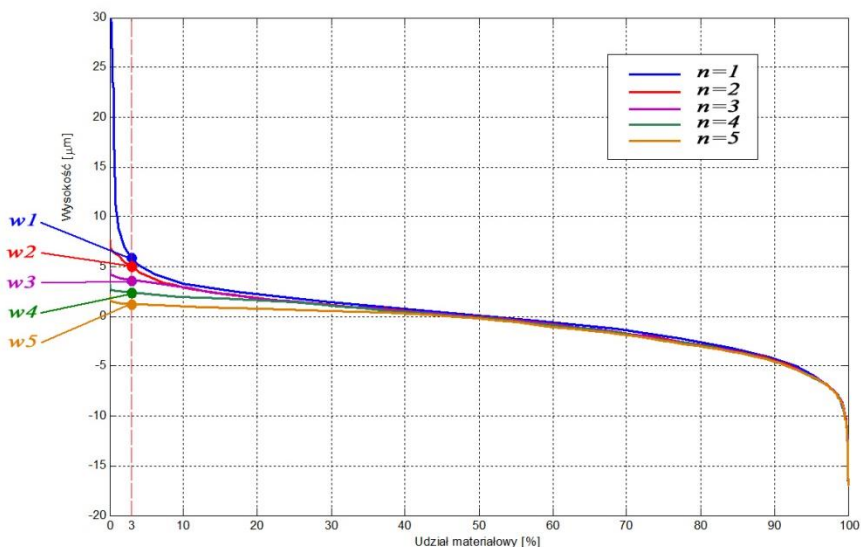


Rys. 4.25. Losowy wybór kolejnych fragmentów powierzchni PO2



Rys. 4.26. Istota nakładania kolejno wybranych fragmentów powierzchni PO2 na powierzchnię PS

W podobny sposób modelowano topografię powierzchni po honowaniu ostatecznym. Różnica polegała na tym, że powierzchnia wejściowa – surowa, zastąpiona została powierzchnią po honowaniu wykończeniowym, natomiast odległość płaszczyzny średniej wygenerowanej powierzchni nakładanej (PO1 i PO2) od powierzchni wejściowej znajdowała się na wysokości, jaka odpowiadała temu samemu udziałowi materiałowemu powierzchni (UM) powstałej po kolejnych iteracjach (rys. 4.27.).



Rys. 4.27. Odległość płaszczyzny średniej powierzchni nakładanej dla udziału materiałowego UM = 3% i 5 iteracji ($n = 5$)

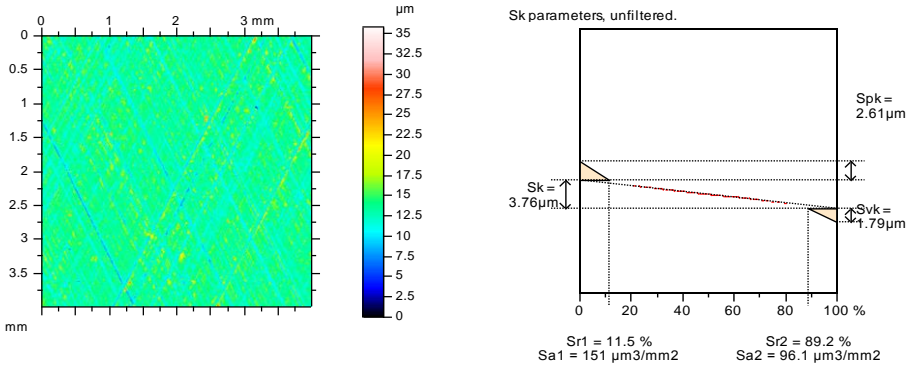
4.3.2. Wyniki modelowania SGP honowanej z zastosowaniem osełek z warstwą diamentową

Dla powierzchni po honowaniu wykończeniowym przyjęto następujące parametry modelowania: $\alpha = 63^\circ$, $dkx = 5 \mu\text{m}$, $dky = 400 \mu\text{m}$, $war = 3.24 \mu\text{m}^2$, $krok = 1 \mu\text{m}$, $n = 90, 115, 161$ (dla wzrastających wartości dosuwu). Rys. 4.28. przedstawia wynik modelowania powierzchni po honowaniu wykończeniowym.

Zastosowany algorytm modelowania pozwolił na uzyskanie podobieństwa wyników parametrów udziału materiałowego Sk , Svk i $Sr2$, parametrów amplitudowych Sa , Sq oraz przestrzennego Sal (rozbieżności są mniejsze niż 7%). Zaobserwowano znaczne różnice w wartościach parametrów Sku , Ssk , Sp , Sv i Sz . Przyczyną tych różnic jest występowanie pojedynczych wierzchołków i wgłębień znajdujących się na powierzchni zmierzonej. Błędy byłyby mniejsze w przypadku eliminacji tych elementów nietypowych na przykład przez stosowanie filtrów morfologicznych lub odcinanie części wgłębień albo wierzchołkowej powierzchni. Można też stosować inne procedury [175]. Przykładowo rys. 4.29. pokazuje mapy konturowe, wykresy udziału materiału oraz wybrane parametry powierzchni DK1.2 po ograniczeniu wysokości do zakresu udziału materiału w granicach 0.13–99.87%. Zastosowanie procedury doprowadziło do zmniejszenia różnicy pomiędzy wartościami parametrów powierzchni zmierzonej i modelowanej. Takie postępowanie stosuje się w przypadku pomiarów z zastosowa-

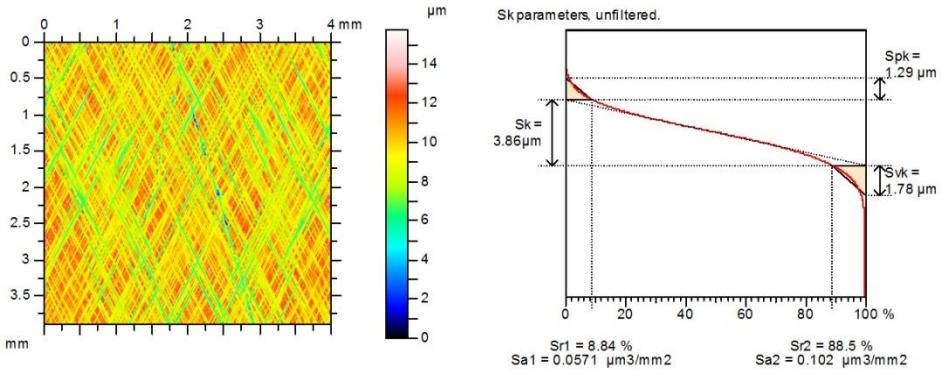
niem metod optycznych. Ponieważ zastosowano stykową metodę pomiaru, w dalszej części pracy nie eliminowano pojedynczych wierzchołków i dolin.

DK1.2 – zmierzona



$S_q = 1.74 \mu\text{m}$; $S_{sk} = 0.865$; $S_{ku} = 7.47$; $S_p = 22.5 \mu\text{m}$;
 $S_v = 13.4 \mu\text{m}$; $S_z = 35.8 \mu\text{m}$; $S_a = 1.29 \mu\text{m}$; $S_{al} = 0.0195 \text{ mm}$

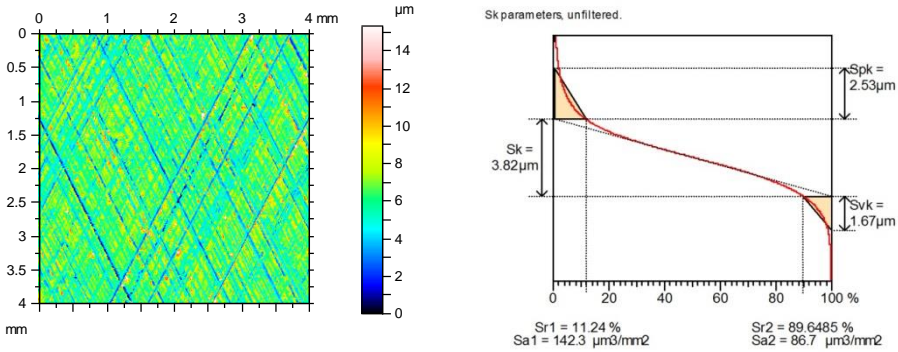
DK1.2 – modelowana



$S_q = 1.53 \mu\text{m}$; $S_{sk} = -0.265$; $S_{ku} = 3.43$; $S_p = 6.13 \mu\text{m}$;
 $S_v = 9.61 \mu\text{m}$; $S_z = 15.7 \mu\text{m}$; $S_a = 1.21 \mu\text{m}$; $S_{al} = 0.0201 \text{ mm}$

Rys. 4.28. Wynik modelowania powierzchni po honowaniu wykończeniowym DK1.2 z użyciem osek z warstwą diamentową

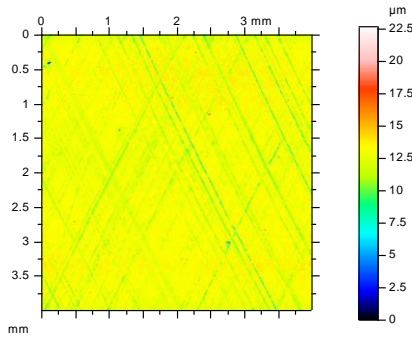
DK1.2 – zmierzona



$Sq = 1.72 \mu\text{m}$; $Ssk = 0.66$; $Sku = 4.21$; $Sp = 9.13 \mu\text{m}$;
 $Sv = 6.18 \mu\text{m}$; $Sz = 15.32 \mu\text{m}$; $Sa = 1.28 \mu\text{m}$; $Sal = 0.0214 \text{ mm}$

Rys. 4.29. Wynik modelowania powierzchni po honowaniu wykończeniowym DK1.2 z użyciem oselek z warstwą diamentową po eliminacji pojedynczych wierzchołków (szpilek) i dolin

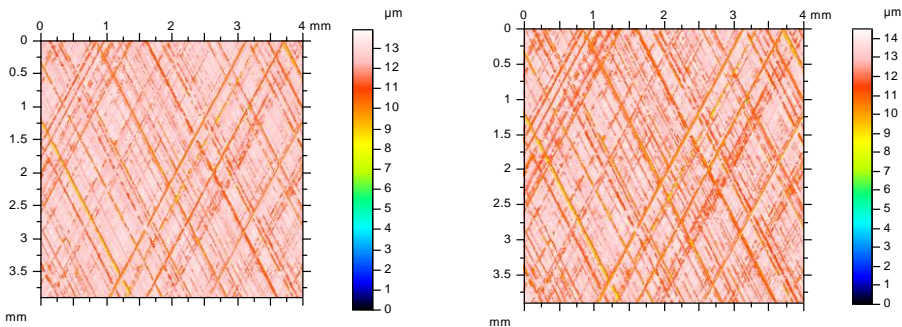
Powierzchnia zmierzona



Powierzchnia modelowana

$UM = 3\%$, $n = 6$

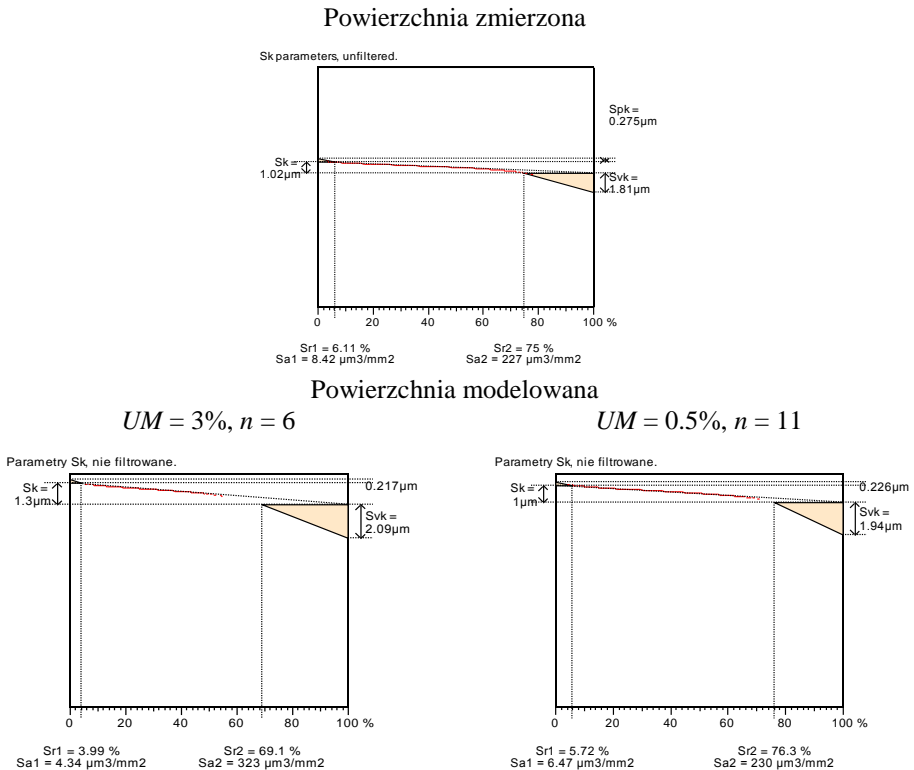
$UM = 0.5\%$, $n = 11$



Rys. 4.30. Mapy konturowe zmierzonej powierzchni DK1.2.5 oraz powierzchni modelowanej

W celu modelowania powierzchni po honowaniu ostatecznym wykorzystano następujące parametry wejściowe: $\alpha = 63^\circ$, $dkx = 5 \mu\text{m}$, $dky = 1000 \mu\text{m}$, $war = 0.0625 \mu\text{m}^2$. Ponadto, zastosowano dwa zestawy parametrów n i UM . W pierwszym przypadku: $UM = 3\%$, $n = 6, 8, 10$, które odwzorowują wzrastający czas honowania ostatecznego, natomiast w drugim: $UM = 0.5\%$, $n = 11, 14, 17$.

Na rysunkach 4.30. i 4.31. przedstawiono wyniki modelowania w odniesieniu do SGP tulei cylindrowych DK1.2.5, zaś tabela 4.9. przedstawia wartości wybranych parametrów SGP.



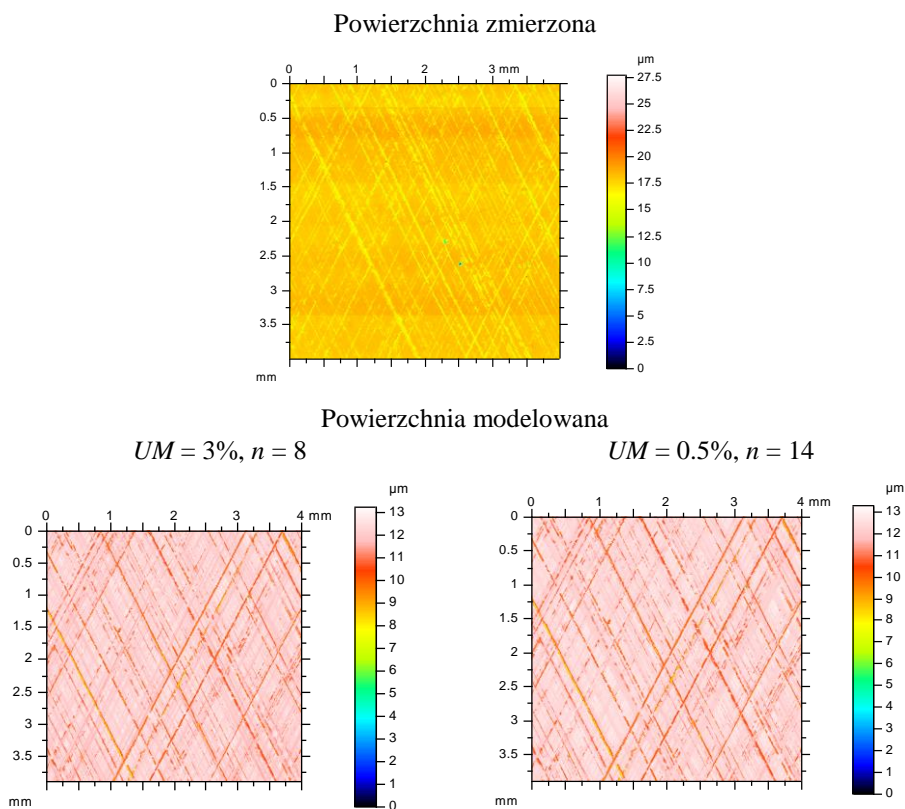
Rys. 4.31. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej powierzchni DK1.2.5 oraz powierzchni modelowanej

Powierzchnie modelowane cylindra DK1.2.5 charakteryzują się dużo niższą maksymalną wysokością nierówności w stosunku do powierzchni zmierzonej. Przyczyny można doszukiwać się w występowaniu pojedynczych wysokich wierzchołków na powierzchni zmierzonej, które potwierdza również kształt krzywej udziału materiałowego. Skutkiem wystąpienia wspomnianych cech są zwiększone wartości parametrów S_z i S_p powierzchni zmierzonych w porówna-

niu do powierzchni modelowanych i rozbieżności dotyczące parametru Sk_u . Dotyczyło to wszystkich przypadków modelowania powierzchni po honowaniu ośłkami z warstwą diamentową.

Tabela 4.9. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni DK1.2.5 oraz powierzchni modelowanej

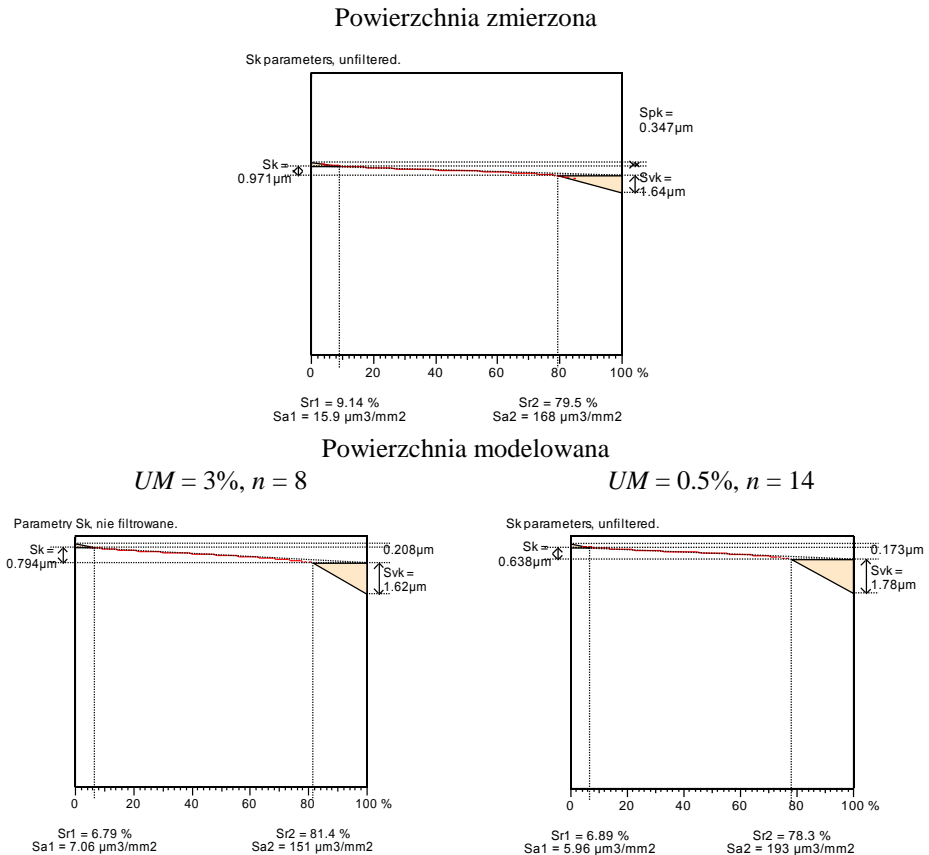
Powierzchnia zmierzona		$UM = 3\%, n = 6$		$UM = 0.5\%, n = 11$	
Sq	0.811 μm	Sq	0.81 μm	Sq	1.02 μm
Ssk	-1.95	Ssk	-2.06	Ssk	-1.49
Sk _u	10.1	Sk _u	8.72	Sk _u	5.56
Sp	9.75 μm	Sp	1.47 μm	Sp	1.69 μm
Sv	12.9 μm	Sv	12.5 μm	Sv	12.8 μm
Sz	22.6 μm	Sz	13.9 μm	Sz	14.5 μm
Sa	0.587 μm	Sa	0.578 μm	Sa	0.798 μm
Sal	0.0195 mm	Sal	0.0201 mm	Sal	0.0201 mm
Spq	0.285 μm	Spq	0.288 μm	Spq	0.323 μm
Svq	1.665 μm	Svq	1.577 μm	Svq	1.560 μm
Smq	66.7%	Smq	66.4%	Smq	48.4%



Rys. 4.32. Mapy konturowe zmierzonej powierzchni DK 1.2.6 oraz powierzchni modelowanej

Jak można zauważyć, pierwszy zestaw parametrów modelowania ($UM = 3\%$, $n = 6$) zapewnił znacznie lepsze przybliżenie większości parametrów powierzchni modelowanej do powierzchni zmierzonej niż zestaw drugi. Różnice względne parametrów były nie większe niż 7%. Wyjątek stanowią parametry z grupy Sk , dla których maksymalna rozbieżność wynosi około 30% (stosowanie drugiego zestawu parametrów zapewniło w tym przypadku korzystniejsze wyniki). Jedyne wartości parametrów Sp i Sz ze względu na opisane wcześniej zjawisko znacznie odbiegały od wartości rzeczywistych (były dużo niższe niż w przypadku powierzchni zmierzonej).

Kolejne rysunki 4.32. i 4.33. oraz tabela 4.10. przedstawiają wyniki modelowania powierzchni DK1.2.6.



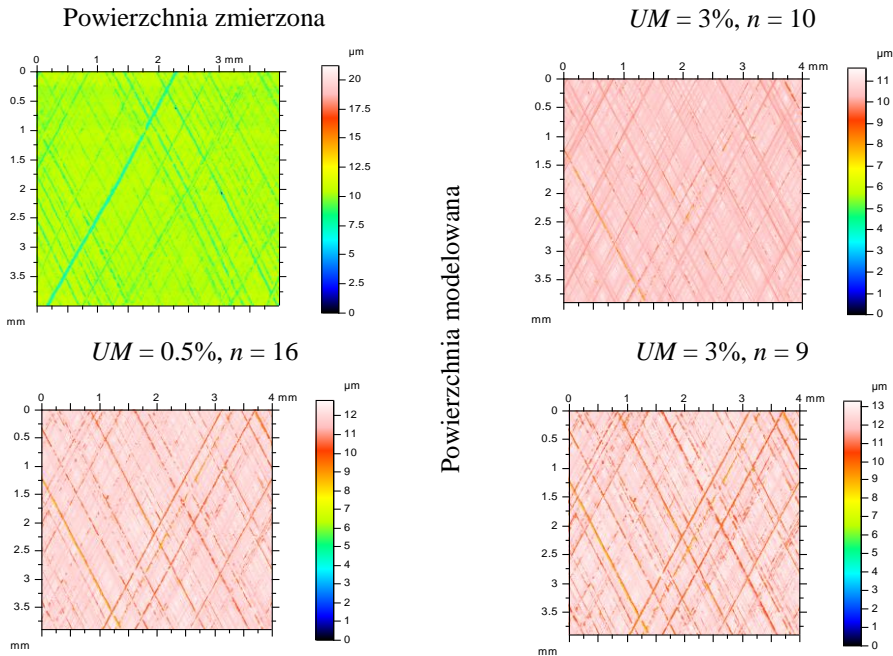
Rys. 4.33. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej powierzchni DK1.2.6 oraz powierzchni modelowanej

Tabela 4.10. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni DK1.2.6 oraz powierzchni modelowanej

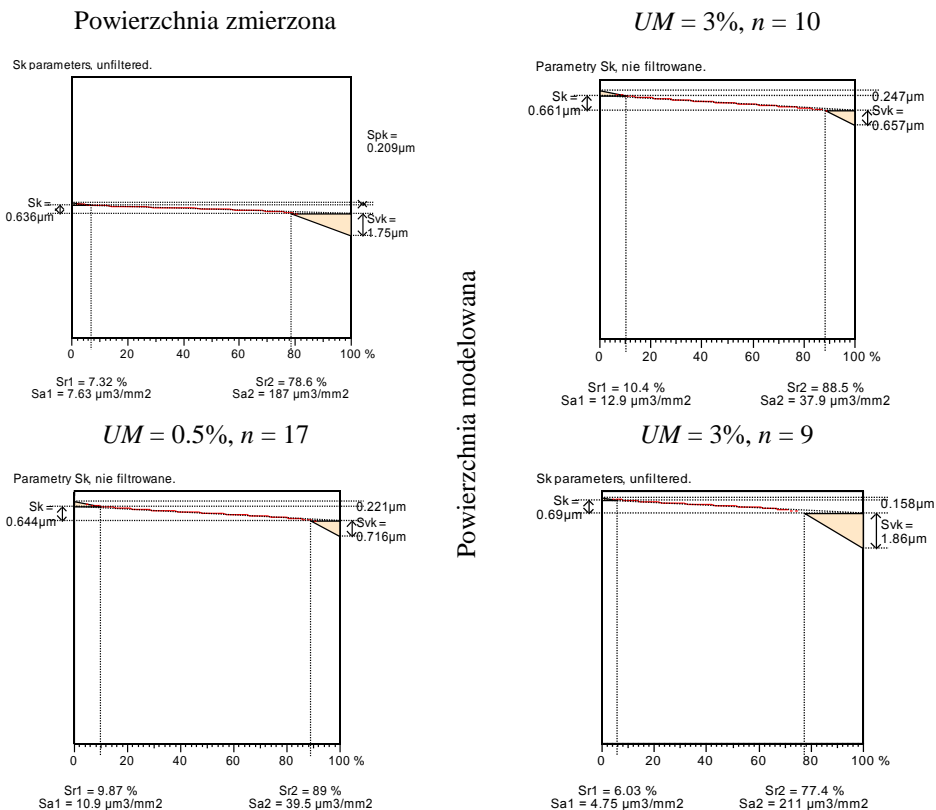
Powierzchnia zmierzona		$UM = 3\%, n = 8$	$UM = 0.5\%, n = 14$		
Sq	0.695 μm	Sq	0.625 μm	Sq	0.657 μm
Ssk	-2.21	Ssk	-2.69	Ssk	-2.75
Sku	16.6	Sku	14	Sku	13.4
Sp	9.85 μm	Sp	1.2 μm	Sp	1.13 μm
Sv	17.9 μm	Sv	12 μm	Sv	12.2 μm
Sz	27.7 μm	Sz	13.2 μm	Sz	13.3 μm
Sa	0.482 μm	Sa	0.405 μm	Sa	0.427 μm
Sal	0.0234 mm	Sal	0.0201 mm	Sal	0.0201 mm
Spq	0.26 μm	Spq	0.267 μm	Spq	0.21 μm
Svq	1.596 μm	Svq	1.558 μm	Svq	1.584 μm
Smq	76.4%	Smq	78.8%	Smq	63.7%

Po zastosowaniu obu zestawów parametrów można zauważyć, że modelowane powierzchnie DK1.2.6 cechowały się znacznie niższą wartością parametru Sk w stosunku do powierzchni zmierzonej (o około 20%), natomiast niewielkie rozbieżności można zaobserwować dla parametrów z rodziny Sq (Spq , Svq i Smq), jak również dla statystycznych parametrów amplitudowych oraz parametru przestrzennego Sal . Rozbieżności nie przekraczają 12%. Uwagę zwraca dobre przybliżenie parametrów z rodziny Sq dla powierzchni modelowanej.

Następną modelowaną powierzchnią była DK1.2.7, a kolejne rysunki 4.34. i 4.35. oraz tabela 4.11. przedstawiają wyniki modelowania.



Rys. 4.34. Mapy konturowe zmierzonej powierzchni DK1.2.7 oraz powierzchni modelowanej



Rys. 4.35. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej powierzchni DK1.2.7 oraz powierzchni modelowanej

Tabela 4.11. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni DK1.2.7 oraz powierzchni modelowanej

Powierzchnia zmierzona	UM = 3%, n = 10	UM = 0.5%, n = 17	UM = 3%, n = 9
Sq	0.667 μm	0.327 μm	0.697 μm
Ssk	-2.76	-2.5	-2.58
Sku	13.8	27	12
Sp	11 μm	1.07 μm	1.03 μm
Sv	10.2 μm	10.5 μm	12.2 μm
Sz	21.2 μm	11.6 μm	13.3 μm
Sa	0.426 μm	0.229 μm	0.466 μm
Sal	0.0234 mm	0.020 mm	0.0201 mm
Spq	0.23 μm	0.220 μm	0.219 μm
Svq	1.888 μm	1.576 μm	1.643 μm
Smq	81.7%	97.8%	76.5%

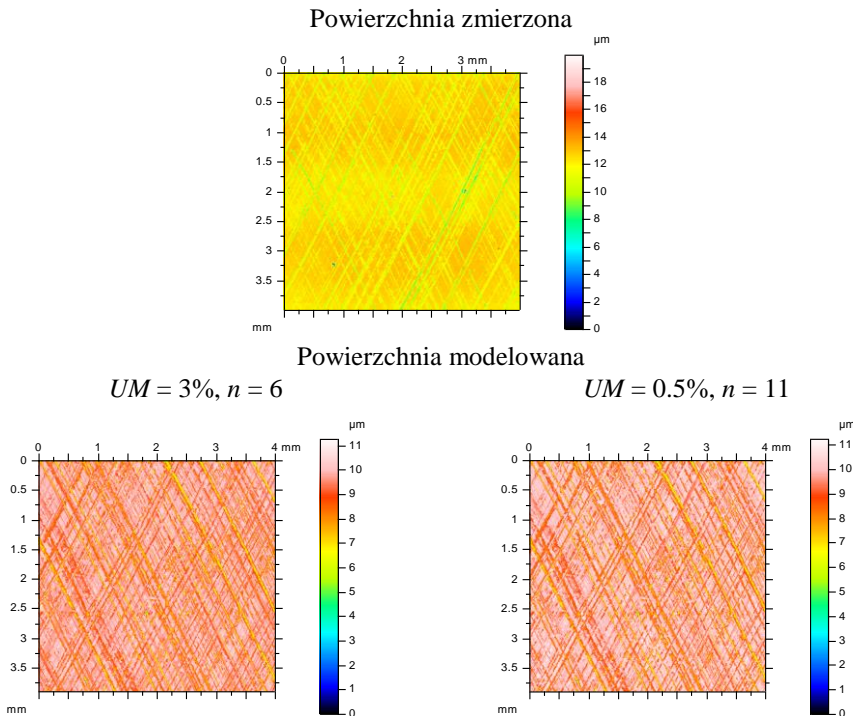
Na podstawie analizy rysunku 4.34. oraz tabeli 4.11. można zauważyć, że po zastosowaniu pierwszych dwóch wariantów modelowania wartości parametrów powierzchni modelowanej były mniejsze od powierzchni rzeczywistej, a najlep-

sze wyniki otrzymano dla parametrów S_v , S_{pq} i S_k (różnice nie przekraczały 5%). Wartości parametrów związanych z udziałem materiałowym, takie jak S_{mq} i S_{r2} , były zawyżone w stosunku do ich wartości dla powierzchni zmierzonych.

Zmniejszenie liczby iteracji ($n = 9$) dla $UM = 3\%$ skutkowało lepszym przybliżeniem parametrów powierzchni modelowanej do zmierzonej. Można więc wnioskować, że wraz ze wzrostem czasu honowania ostatecznego należałoby zmniejszać wartość parametru UM lub odwrotnie, tj. przy stałej wartości UM zmniejszać liczbę iteracji.

Podsumowując, w przypadku modelowania powierzchni DK1.2.5 i DK1.2.6 uzyskano zbliżone wartości parametrów stereometrii powierzchni, natomiast dla powierzchni DK1.2.7 otrzymano zbyt małe wysokości nierówności i zbyt duże udziały materiałowe S_{r2} i S_{mq} od parametrów powierzchni rzeczywistej. Dopiero zmniejszenie liczby iteracji skutkowało lepszym przybliżeniem parametrów amplitudowych powierzchni modelowanej.

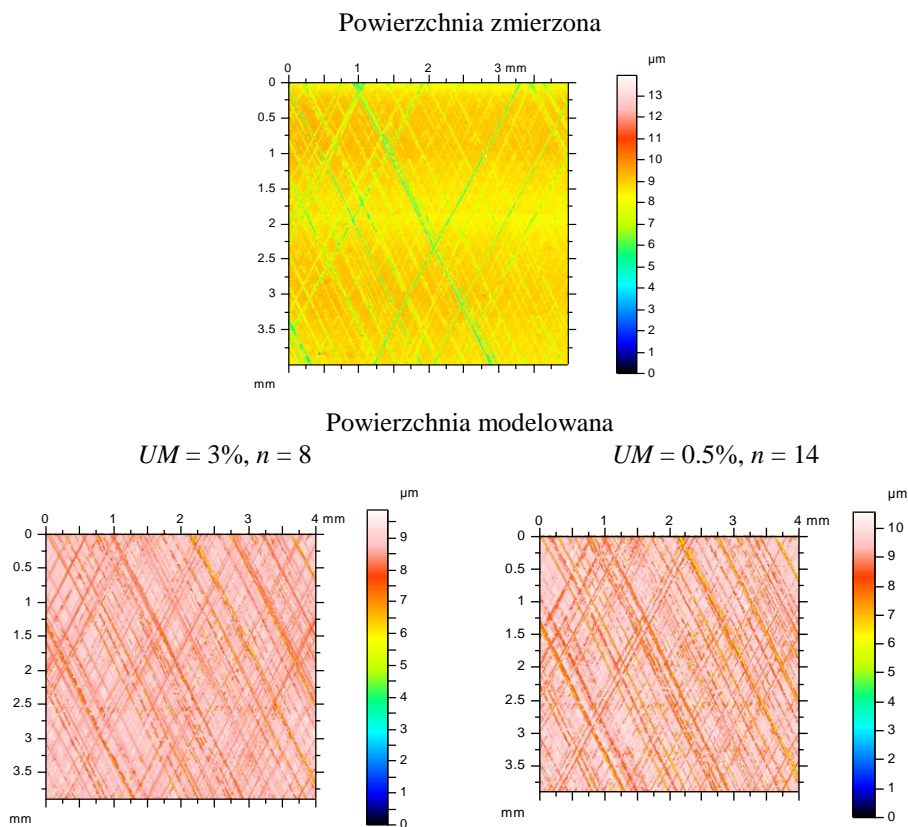
Kolejną grupą powierzchni, dla których przeprowadzono modelowanie honowania ostatecznego, były DK1.3.8, DK1.3.9 oraz DK1.3.10. Wyniki modelowania SGP tulei DK1.3.8. przedstawiono na rysunkach 4.36. i 4.37. oraz w tabeli 4.12.



Rys. 4.36. Mapy konturowe zmierzonej powierzchni DK1.3.8 oraz powierzchni modelowanej

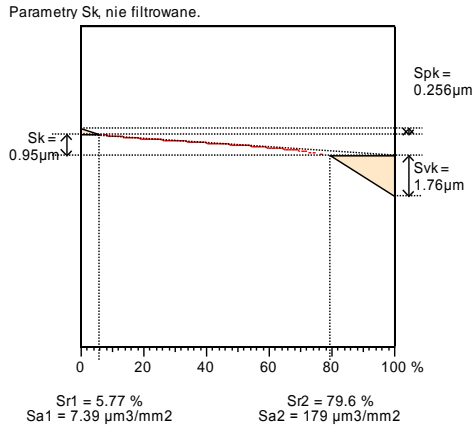
Parametry modelowanych powierzchni DK1.3.8 były zbliżone do parametrów powierzchni zmierzonej. Lepsze wyniki uzyskano dla parametrów modelowania $UM = 3\%$ i $n = 6$. Największe różnice zaobserwowano jedynie w przypadku parametrów opisujących wysokość maksymalną powierzchni: S_p , S_z i S_v oraz parametrów dotyczących kształtu rozkładu rzędnych. Rozbieżności względne dla pozostałych parametrów nie przekraczały 10%.

Wyniki modelowania SGP tulei DK1.3.9. pokazano na rysunkach 4.38. i 4.39. oraz w tabeli 4.13.



Rys. 4.38. Mapy konturowe zmierzonej powierzchni DK1.3.9 oraz powierzchni modelowanej

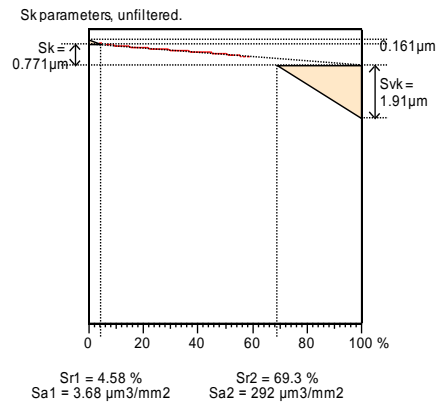
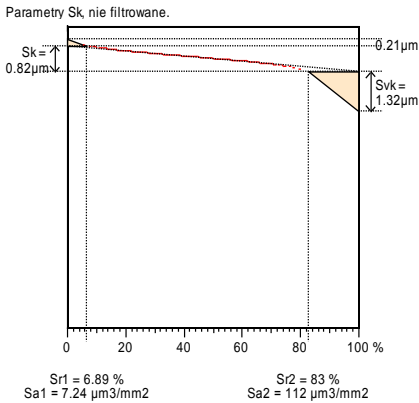
Powierzchnia zmierzona



Powierzchnia modelowana

UM = 3%, n = 8

UM = 0.5%, n = 14



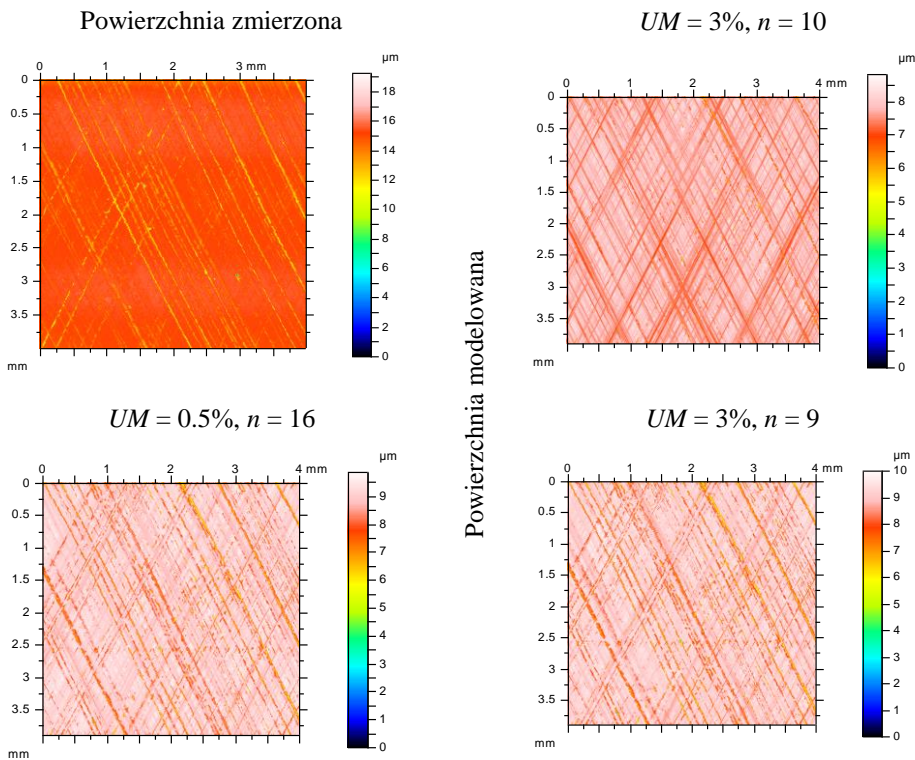
Rys. 4.39. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej powierzchni DK1.3.9 oraz powierzchni modelowanej

Tabela 4.13. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni DK1.3.9 oraz powierzchni modelowanej

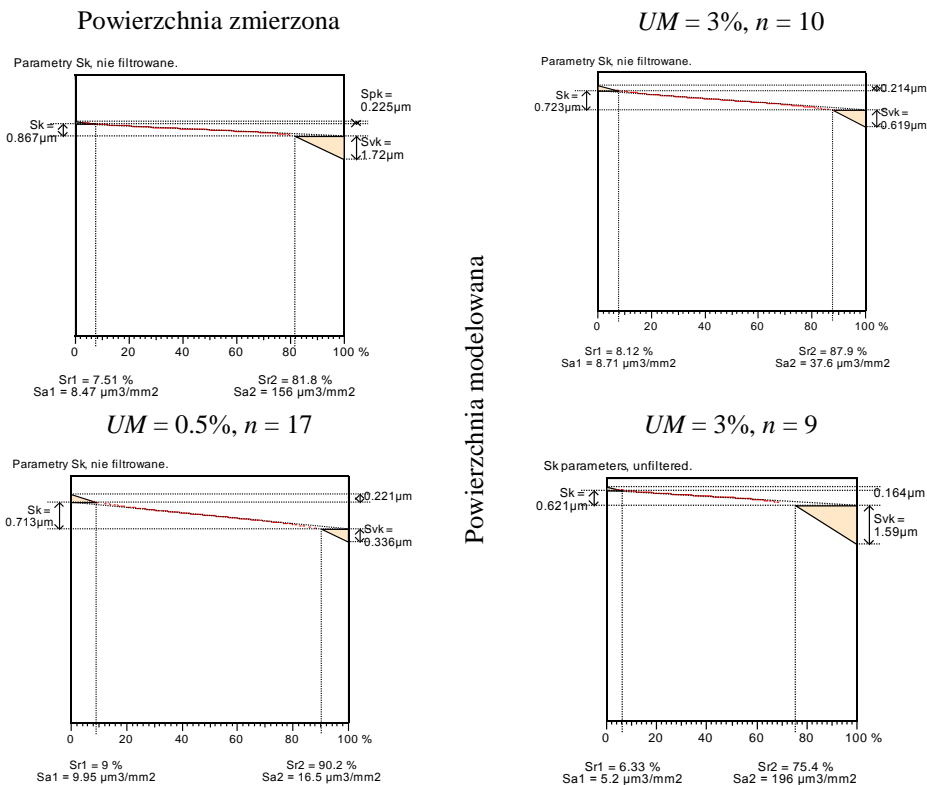
Powierzchnia zmierzona		UM = 3%, n = 8		UM = 0.5%, n = 14	
Sq	0.732 μm	Sq	0.594 μm	Sq	0.796 μm
Ssk	-2.33	Ssk	-2.22	Ssk	-1.73
Sku	10.6	Sku	10.4	Sku	6.02
Sp	5.41 μm	Sp	1.18 μm	Sp	1.24 μm
Sv	8.57 μm	Sv	8.7 μm	Sv	9.31 μm
Sz	14 μm	Sz	9.88 μm	Sz	10.6 μm
Sa	0.493 μm	Sa	0.399 μm	Sa	0.607 μm
Sal	0.0234 mm	Sal	0.0179 mm	Sal	0.0179 mm
Spq	0.252 μm	Spq	0.255 μm	Spq	0.198 μm
Svq	1.643 μm	Svq	1.499 μm	Svq	1.646 μm
Smq	76.6%	Smq	78.0%	Smq	59.1%

Dla obu przypadków parametrów modelowania uzyskano mniejsze wartości parametrów S_k i S_{vk} w stosunku do powierzchni zmierzonej. Różnice przekraczały 20%. Ponadto, parametry udziału materiałowego Sr_2 i Smq były bardziej zbliżone po zastosowaniu pierwszej grupy parametrów wejściowych ($UM = 3\%$, $n = 8$), natomiast w drugim wariancie ich wartość była zaniżona. Skutkiem tego była większa wartość parametrów amplitudowych Sq , Sa i S_{vk} dla grupy drugiej, a mniejsza dla grupy pierwszej w porównaniu do parametrów powierzchni zmierzonej. Różnice pomiędzy wartościami niektórych parametrów powierzchni modelowanych i zmierzonych przekraczały 20%.

Na rysunkach 4.40. i 4.41. oraz w tabeli 4.14. przedstawiono wyniki modelowania SGP tulei DK1.3.10.



Rys. 4.40. Mapy konturowe zmierzonej powierzchni DK1.3.10 oraz powierzchni modelowanej



Rys. 4.41. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej powierzchni DK1.3.10 oraz powierzchni modelowanej

Wyniki przeprowadzonych prób modelowania dla obu zestawów parametrów wejściowych pokazują, że parametry związane z udziałem materiałowym $Sr2$ i Smq w obu przypadkach były znacznie większe w porównaniu z powierzchnią zmierzoną. Skutkowało to również zaniżonymi wartościami parametrów Sq i Svk dla powierzchni modelowanych. Podobnie jak w przypadku opisanym dla poprzednio modelowanej grupy powierzchni, zmniejszenie liczby iteracji do 9 ($UM = 3\%$, $n = 9$) spowodowało poprawę wartości wspomnianych parametrów, wywołało zarazem jednak zniżenie wartości parametru Sk o prawie 30%. Jednakże błędy pozostałych parametrów (oprócz Sp , Sz , Sv i Sk_u) nie przekraczały 15% (parametr $Sa1$). Zwraca uwagę dobre przybliżenie parametrów z grupy Sq powierzchni modelowanej do parametrów powierzchni zmierzonej.

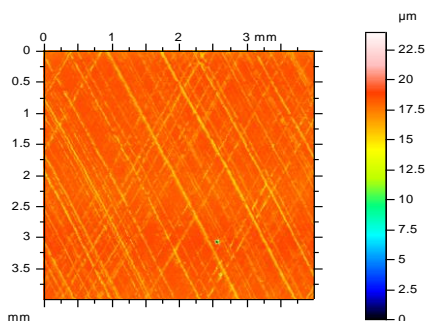
Podsumowując, w przypadku powierzchni z grupy DK1.3.x modelowanie zapewniło przybliżone wartości parametrów dla powierzchni DK1.3.8 i DK1.3.9. Dla powierzchni DK1.3.10 uzyskano zbyt małą wysokość nierówności i zbyt duże udziały materiałowe $Sr2$ i Smq w porównaniu z parametrami powierzchni

zmierzonej. Natomiast zmniejszenie liczby iteracji spowodowało lepsze przybliżenie parametrów powierzchni modelowanej do wyróżników powierzchni zmierzonej.

Tabela 4.14. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni DK1.3.10 oraz powierzchni modelowanej

Powierzchnia zmierzona	$UM = 3\%, n = 10$	$UM = 0.5\%, n = 17$	$UM = 3\%, n = 9$
Sq	0.652 μm	0.329 μm	0.269 μm
Ssk	-2.53	-1.62	-0.101
Sku	14.5	12.5	3.81
Sp	4.23 μm	1.1 μm	1.05 μm
Sv	15 μm	7.73 μm	5.42 μm
Sz	19.3 μm	8.82 μm	6.48 μm
Sa	0.429 μm	0.24 μm	0.216 μm
Sal	0.0195 mm	0.0201 mm	0.0201 mm
Spq	0.25 μm	0.277 μm	0.246 μm
Svq	1.648 μm	1.687 μm	1.65 μm
Smq	77.1%	93.6%	92.5%

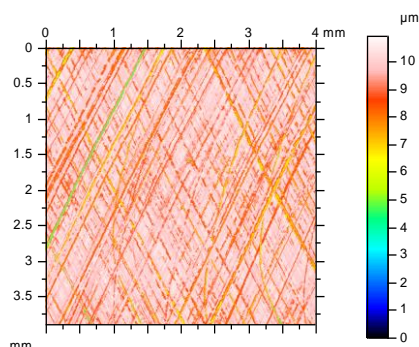
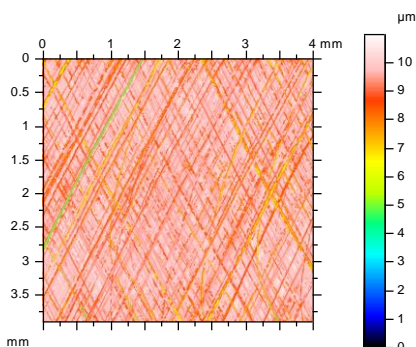
Powierzchnia zmierzona



Powierzchnia modelowana

$UM = 3\%, n = 6$

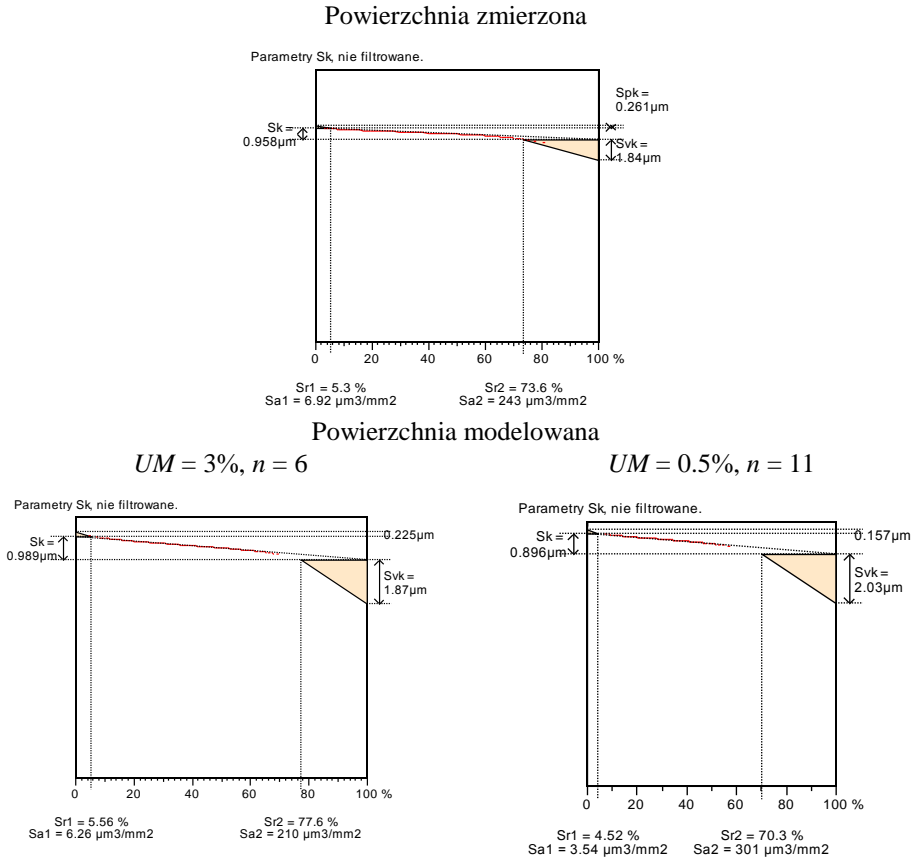
$UM = 0.5\%, n = 11$



Rys. 4.42. Mapy konturowe zmierzonej powierzchni DK1.4.11 oraz powierzchni modelowanej

Ostatnią grupą powierzchni, dla których przeprowadzono modelowanie honowania ostatecznego z wykorzystaniem oselek z warstwą diamentową, stanowiły powierzchnie DK1.4.11, DK1.4.12 oraz DK1.4.13.

Wyniki modelowania SGP tulei DK1.4.11. pokazano na rysunkach 4.42. i 4.43. oraz w tabeli 4.15.



Rys. 4.43. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej powierzchni DK1.4.11 oraz powierzchni modelowanej

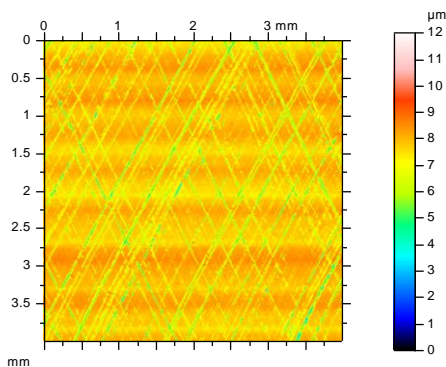
Zastosowanie pierwszego zestawu parametrów wejściowych dało w rezultacie lepsze przybliżenie parametrów powierzchni modelowanej i zmierzonej, natomiast w przypadku drugiego zestawu ($UM = 0.5\%$, $n = 11$) uzyskano nieco większe wartości parametrów amplitudowych Sa i Sq . Po zastosowaniu pierwszego zestawu parametrów wejściowych największe względne błędy wynosiły 15% i dotyczyły parametru $Sa1$ (nie analizowano parametrów Sp , Sz , Sv i Sku).

Na rysunkach 4.44. i 4.45. oraz w tabeli 4.16. przedstawiono wyniki modelowania SGP tulei DK1.4.12.

Tabela 4.15. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni DK1.4.11 oraz powierzchni modelowanej

Powierzchnia zmierzona		$UM = 3\%, n = 6$		$UM = 0.5\%, n = 11$	
Sq	0.799 μm	Sq	0.794 μm	Sq	0.893 μm
Ssk	-2.17	Ssk	-2.43	Ssk	-2.14
Sku	14.7	Sku	12	Sku	9.44
Sp	6 μm	Sp	1.55 μm	Sp	1.28 μm
Sv	18 μm	Sv	9.43 μm	Sv	9.64 μm
Sz	23.9 μm	Sz	11 μm	Sz	10.9 μm
Sa	0.579 μm	Sa	0.545 μm	Sa	0.656 μm
Sal	0.0195 mm	Sal	0.0161 mm	Sal	0.0179 mm
Spq	0.266 μm	Spq	0.292 μm	Spq	0.259 μm
Svq	1.588 μm	Svq	1.716 μm	Svq	1.715 μm
Smq	71.1%	Smq	69.8%	Smq	62.2%

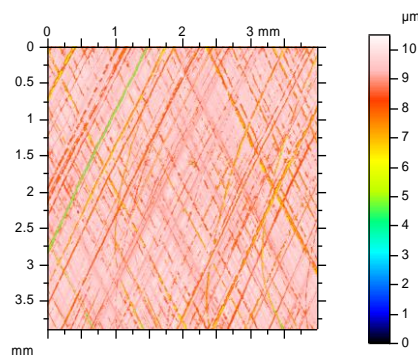
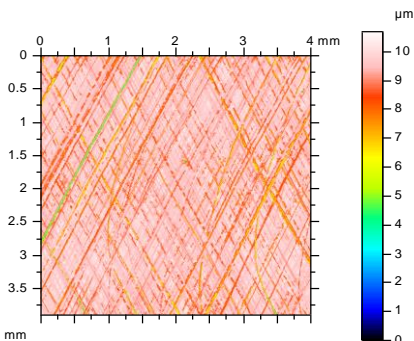
Powierzchnia zmierzona



Powierzchnia modelowana

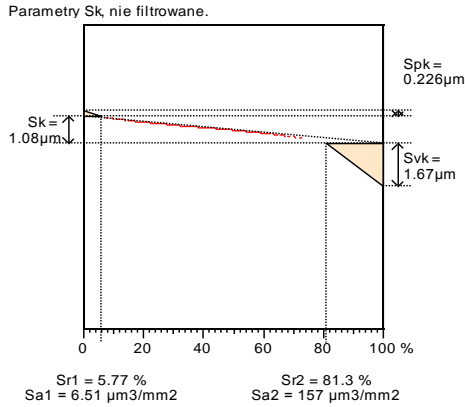
$UM = 3\%, n = 8$

$UM = 0.5\%, n = 14$



Rys. 4.44. Mapy konturowe zmierzonej powierzchni DK1.4.12 oraz powierzchni modelowanej

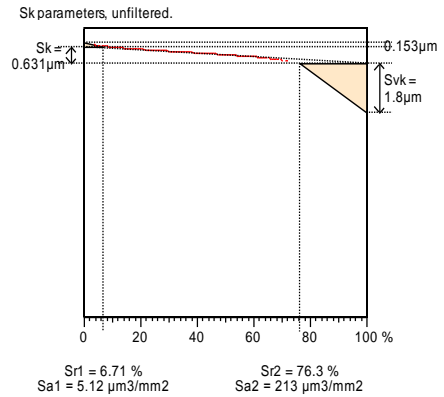
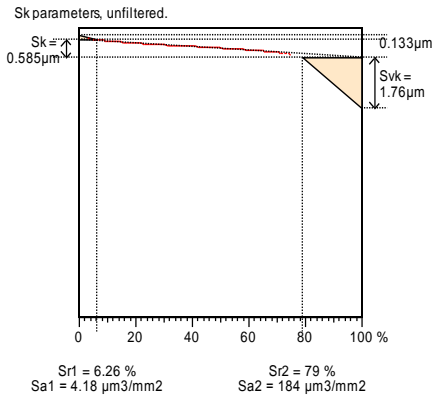
Powierzchnia zmierzona



Powierzchnia modelowana

$UM = 3\%, n = 8$

$UM = 0.5\%, n = 14$



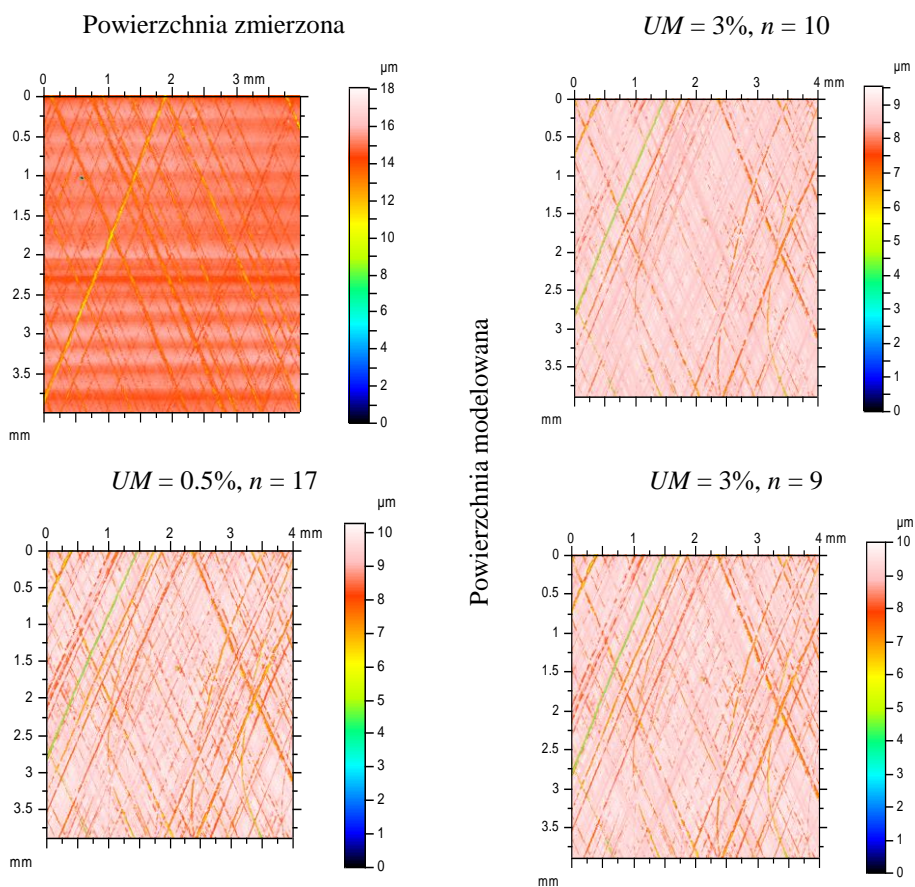
Rys. 4.45. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej powierzchni DK1.4.12 oraz powierzchni modelowanej

Tabela 4.16. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni DK1.4.12 oraz powierzchni modelowanej

Powierzchnia zmierzona		$UM = 3\%, n = 8$		$UM = 0.5\%, n = 14$	
Sq	0.699 μm	Sq	0.654 μm	Sq	0.711 μm
Ssk	-1.86	Ssk	-3.31	Ssk	-2.96
Sku	7.49	Sku	18.9	Sku	15.7
Sp	4.35 μm	Sp	0.926 μm	Sp	1.23 μm
Sv	7.65 μm	Sv	9.15 μm	Sv	9.28 μm
Sz	12 μm	Sz	10.1 μm	Sz	10.5 μm
Sa	0.492 μm	Sa	0.406 μm	Sa	0.464 μm
Sal	0.0247 mm	Sal	0.0201 mm	Sal	0.0161 mm
Spq	0.191 μm	Spq	0.192 μm	Spq	0.21 μm
Svq	1.56 μm	Svq	1.518 μm	Svq	1.679 μm
Smq	72.3%	Smq	72.5%	Smq	69.8%

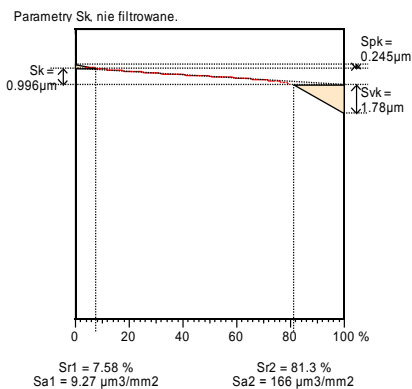
W powyższym przypadku dla obu zestawów wejściowych parametrów modelowania uzyskano niewielkie różnice wartości parametrów amplitudowych i udziałów materiałowych w przypadku powierzchni modelowanych i zmierzonych (błędy nie przekraczały 7%). Jedynie wartość parametru Sk dla powierzchni modelowanych była znacznie niższa. W przypadku pierwszego zestawu parametrów wejściowych błąd oszacowania długości korelacji Sal wynosił około 20%.

Wyniki modelowania SGP tulei DK1.4.13 pokazano na rysunkach 4.46. i 4.47. oraz w tabeli 4.17.



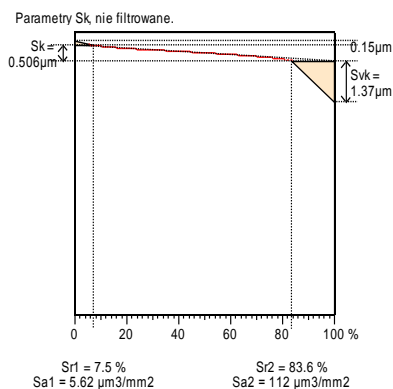
Rys. 4.46. Mapy konturowe zmierzonej powierzchni DK1.4.13 oraz powierzchni modelowanej

Powierzchnia zmierzona

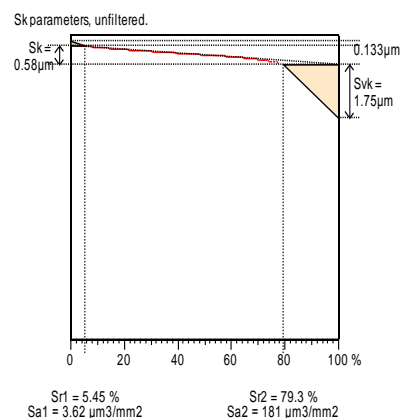
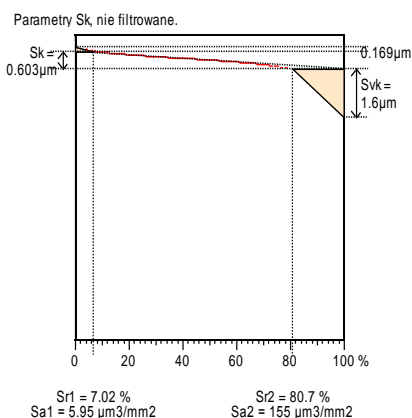


$UM = 0.5\%, n = 17$

$UM = 3\%, n = 10$



$UM = 3\%, n = 9$



Powierzchnia modelowana

Rys. 4.47. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej powierzchni DK1.4.13 oraz powierzchni modelowanej

Tabela 4.17. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni DK1.4.13 oraz powierzchni modelowanej

Powierzchnia zmierzona	$UM = 3\%, n = 10$	$UM = 0.5\%, n = 17$	$UM = 3\%, n = 9$
Sq 0.715 μm	Sq 0.508 μm	Sq 0.61 μm	Sq 0.646 μm
Ssk -2.64	Ssk -4.38	Ssk -3.54	Ssk -3.36
Sku 18.4	Sku 32	Sku 21.7	Sku 19.4
Sp 3.15 μm	Sp 0.833 μm	Sp 1.02 μm	Sp 0.871 μm
Sv 15 μm	Sv 8.71 μm	Sv 9.02 μm	Sv 9.13 μm
Sz 18.1 μm	Sz 9.55 μm	Sz 10 μm	Sz 10 μm
Sa 0.476 μm	Sa 0.278 μm	Sa 0.366 μm	Sa 0.398 μm
Sal 0.0351 mm	Sal 0.0161 mm	Sal 0.0161 mm	Sal 0.0161 mm
Spq 0.229 μm	Spq 0.109 μm	Spq 0.222 μm	Spq 0.214 μm
Svq 1.8 μm	Svq 1.495 μm	Svq 1.87 μm	Svq 1.893 μm
Smq 78.2%	Smq 89.5%	Smq 83.1%	Smq 79.0%

W wyniku modelowania uzyskano zaniżone wartości parametrów amplitudowych. Zmniejszenie liczby iteracji skutkowało lepszym przybliżeniem tych parametrów powierzchni modelowanych do zmierzonych. W większości przypadków (poza parametrem Sk) błędy względne parametrów amplitudowych oraz udziałów materiałowych nie przekraczały 15%. We wszystkich przypadkach otrzymano znacznie zaniżoną długość korelacji Sal (o około 50%).

Dla grupy powierzchni DK1.4.x modelowanie zapewniło uzyskanie przybliżonych wartości parametrów stereometrii powierzchni. Najlepsze wyniki otrzymano dla powierzchni DK1.4.11 i DK1.4.12. W przypadku powierzchni DK1.4.13 uzyskano zbyt małe wartości wysokości nierówności w porównaniu do powierzchni zmierzonych. Zmniejszenie liczby iteracji spowodowało znacznie lepsze przybliżenie tych parametrów.

4.3.3. Wyniki modelowania SGP honowanej z zastosowaniem osełek ceramicznych

W dalszej części przedstawiono wyniki modelowania powierzchni honowanej przy pomocy osełek ceramicznych. Parametrami wejściowymi modelowania powierzchni po honowaniu wykończeniowym były: $\alpha = 63^0$, $dkx = 5 \mu\text{m}$, $dky = 400 \mu\text{m}$, $war = 0.865 \mu\text{m}^2$, krok = $1 \mu\text{m}$, liczba = 90, 106, 151 (dla wzrastających wartości dosuwu).

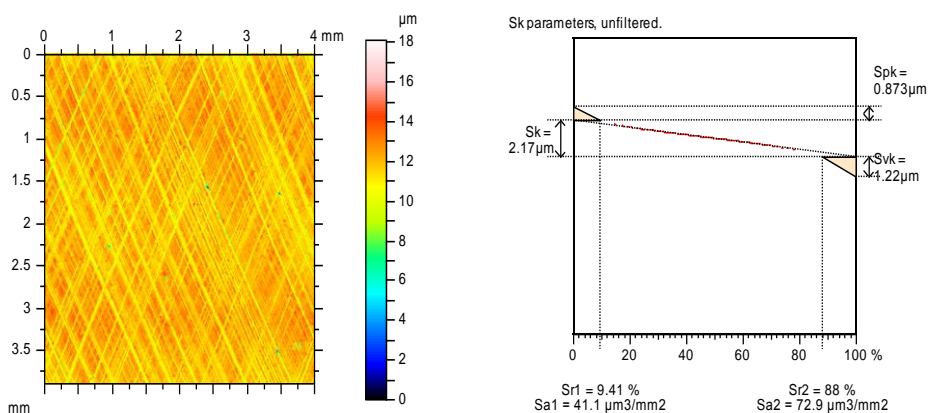
Ze względu na to, iż w każdym przypadku na skutek honowania usunięto powierzchnię surową (tj. powierzchnie tulei po honowaniu wykończeniowym miały podobne wartości parametrów – z wyjątkiem SK1.4), w dalszej części przedstawiono wyniki modelowania powierzchni SK1.2 – rys. 4.48.

W wyniku modelowania uzyskano przybliżone wartości parametrów związanych z udziałem materiałowym (Sk , Spk , Svk i $Sr2$), a także parametrów amplitudowych – Sa i Sq oraz parametru przestrzennego Sal . Błędy nie przekraczały 10%. Dla pozostałych parametrów amplitudowych związanych z maksymalną wysokością powierzchni oraz parametrów Ssk i Sku zaobserwowano większe różnice. Podsumowując, można zauważyć, że wyniki modelowania powierzchni po honowaniu wykończeniowym przy pomocy osełek z warstwą ceramiczną są podobne do uzyskanych dla powierzchni honowanych przy pomocy osełek z warstwą diamentową (DK1.2).

W celu modelowania powierzchni po honowaniu ostatecznym jako podstawowe parametry wejściowe dla modelu wykorzystano wartości: $\alpha = 63^0$, $dkx = 5 \mu\text{m}$, $dky = 1000 \mu\text{m}$, $war = 0.096 \mu\text{m}^2$. Najlepsze wyniki uzyskano po zastosowaniu następujących wartości parametrów dodatkowych: $UM = 1\%$, $n = 3, 4, 6$, dla wzrastającego czasu honowania ostatecznego.

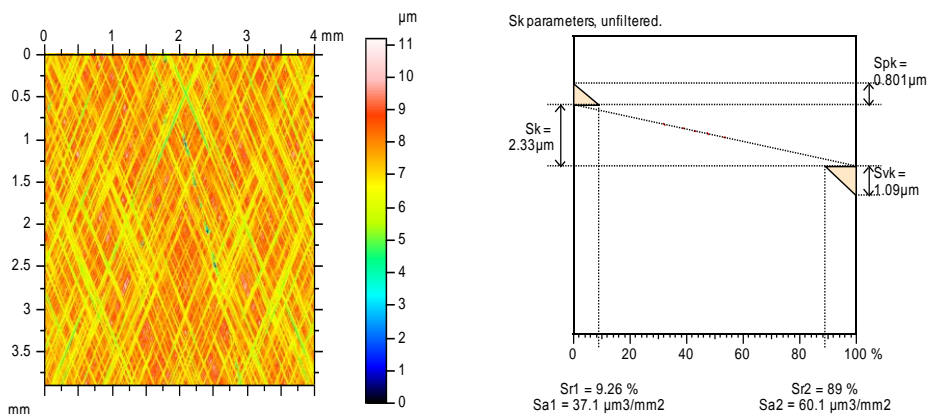
Rysunki (4.49., 4.50.) oraz tabela 4.18. przedstawiają wyniki modelowania powierzchni SK1.2.5.

SK1.2 – zmierzona



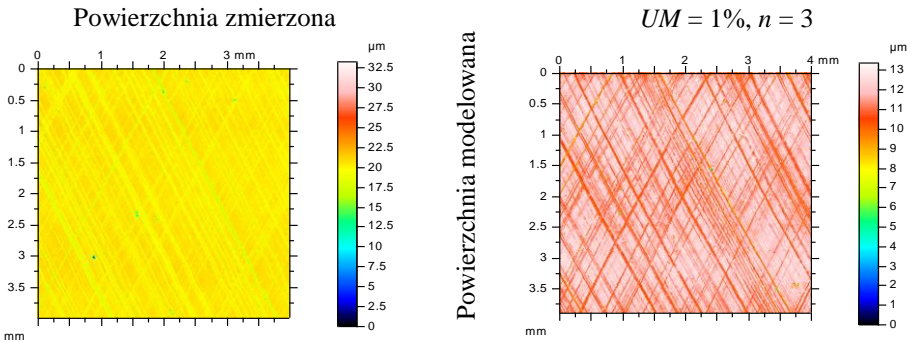
$Sq = 0.92 \mu\text{m}$; $Ssk = -0.376$; $Sku = 5.47$; $Sp = 6.2 \mu\text{m}$;
 $Sv = 11.9 \mu\text{m}$; $Sz = 18.1 \mu\text{m}$; $Sa = 0.708 \mu\text{m}$; $Sal = 0.0201 \text{ mm}$

SK1.2 – modelowana

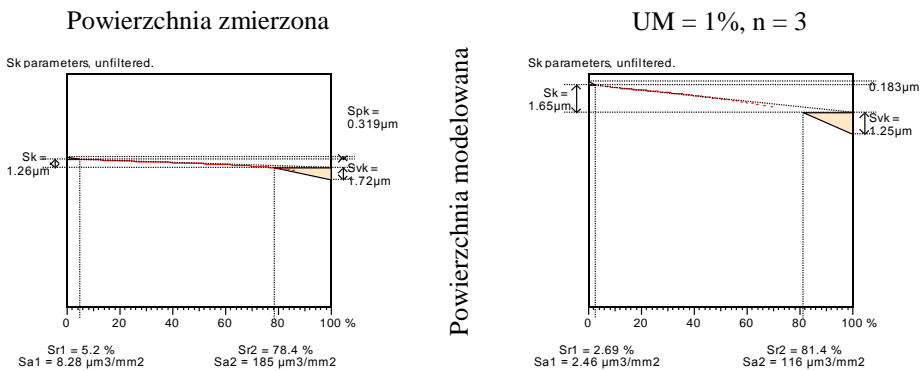


$Sq = 0.929 \mu\text{m}$; $Ssk = -0.275$; $Sku = 3.73$; $Sp = 3.77 \mu\text{m}$;
 $Sv = 7.41 \mu\text{m}$; $Sz = 11.2 \mu\text{m}$; $Sa = 0.73 \mu\text{m}$; $Sal = 0.0201 \text{ mm}$

Rys. 4.48. Wyniki modelowania powierzchni honowanej wykończeniowo z zastosowaniem oselek ceramicznych



Rys. 4.49. Mapy konturowe powierzchni zmierzonej SK1.2.5 oraz powierzchni modelowanej



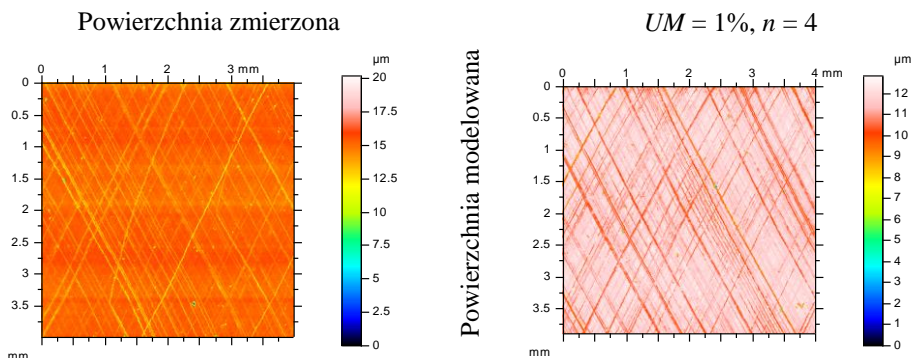
Rys. 4.50. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej i modelowanej powierzchni SK1.2.5

Tabela 4.18. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni SK1.2.5 oraz powierzchni modelowanej

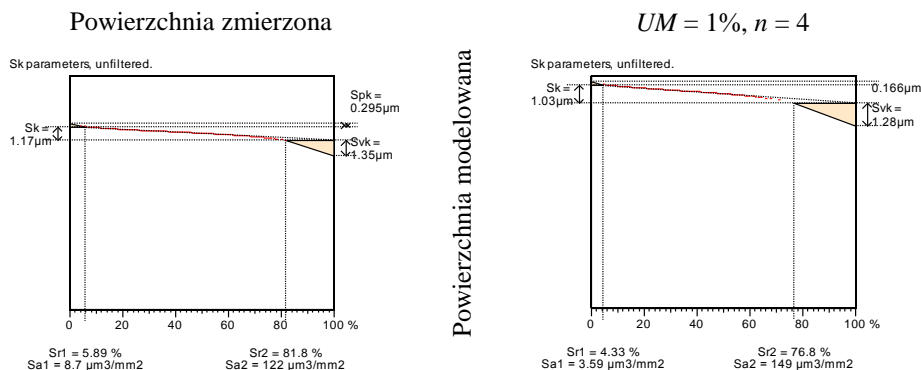
Powierzchnia zmierzona		$UM = 1\%, n = 3$	
Sq	0.814 μm	Sq	0.764 μm
Ssk	-2.16	Ssk	-1.3
Sku	21.3	Sku	7.4
Sp	13.1 μm	Sp	1.6 μm
Sv	20.2 μm	Sv	11.8 μm
Sz	33.3 μm	Sz	13.4 μm
Sa	0.581 μm	Sa	0.602 μm
Sal	0.0195 mm	Sal	0.0201 mm
Spq	0.33 μm	Spq	0.33 μm
Svq	1.01 μm	Svq	1.2 μm
Smq	52.6%	Smq	47.1%

W wyniku modelowania uzyskano zbliżone wartości uśrednionych parametrów amplitudowych Sa i Sq powierzchni zmierzonej i modelowanej. Podobna sytuacja dotyczyła wartości udziałów materiałowych Smq i $Sr2$, parametrów Spq i Svq oraz długości korelacji Sal . Błędy względne nie przekraczały 20%. Natomiast dla parametrów z grupy Sk zaobserwowano różnice, gdyż wartość parametru

tru S_k powierzchni modelowanej była znacznie wyższa, a S_{vk} znacznie niższa od wartości odpowiednich parametrów powierzchni zmierzonej. Na rysunkach 4.51. i 4.52. oraz w tabeli 4.19. przedstawiono wyniki modelowania powierzchni SK1.2.6.



Rys. 4.51. Mapy konturowe powierzchni zmierzonej SK1.2.6 oraz powierzchni modelowanej



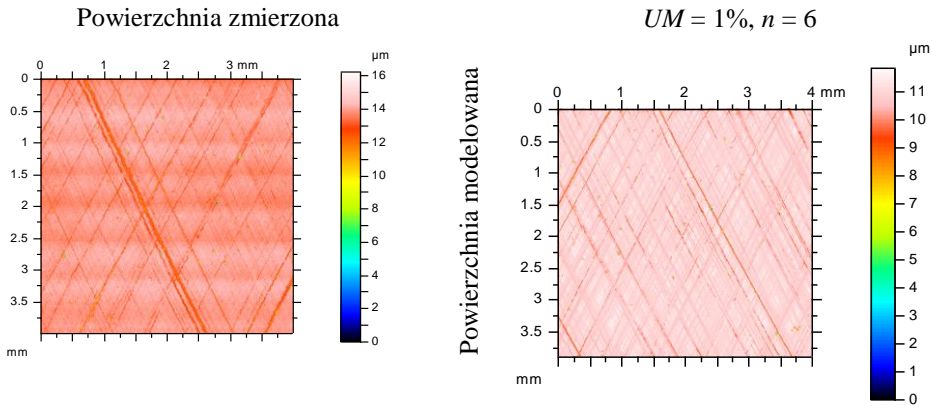
Rys. 4.52. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej i modelowanej powierzchni SK1.2.6

Tabela 4.19. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni SK1.2.6 oraz powierzchni modelowanej

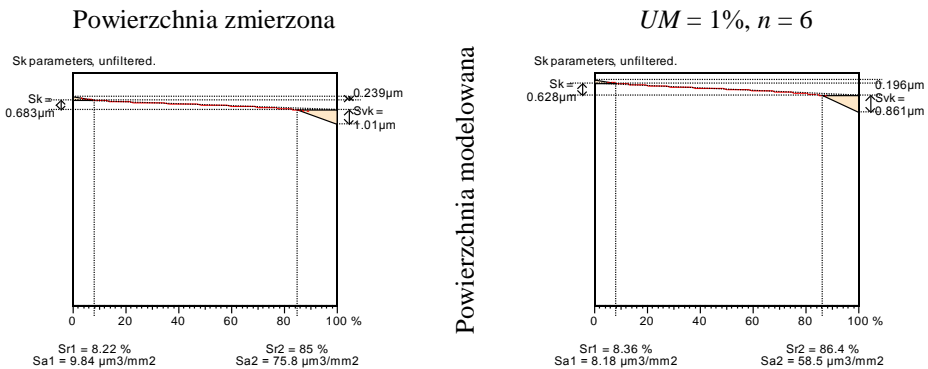
Powierzchnia zmierzona		$UM = 1\%, n = 4$	
Sq	0.649 μm	Sq	0.64 μm
Ssk	-2.05	Ssk	-1.95
Sku	15.4	Sku	12
Sp	5.17 μm	Sp	1.21 μm
Sv	15 μm	Sv	11.6 μm
Sz	20.2 μm	Sz	12.8 μm
Sa	0.468 μm	Sa	0.477 μm
Sal	0.0234 mm	Sal	0.0201 mm
Spq	0.29 μm	Spq	0.282 μm
Svq	1.068 μm	Svq	1.066 μm
Smq	70.5%	Smq	64.8%

W tym przypadku wynik modelowania dał zadowalające wyniki, gdyż wartość wszystkich parametrów uzyskanych dla powierzchni modelowanej była przybliżona do wartości parametrów powierzchni zmierzonej. Błędy względne nie przekraczały 12% i były największe dla parametrów Sk i Sal .

Wyniki modelowania powierzchni SK1.2.7 przedstawiono na rysunkach 4.53., 4.54. i w tabeli 4.20.



Rys. 4.53. Mapy konturowe powierzchni zmierzonej SK1.2.7 oraz powierzchni modelowanej

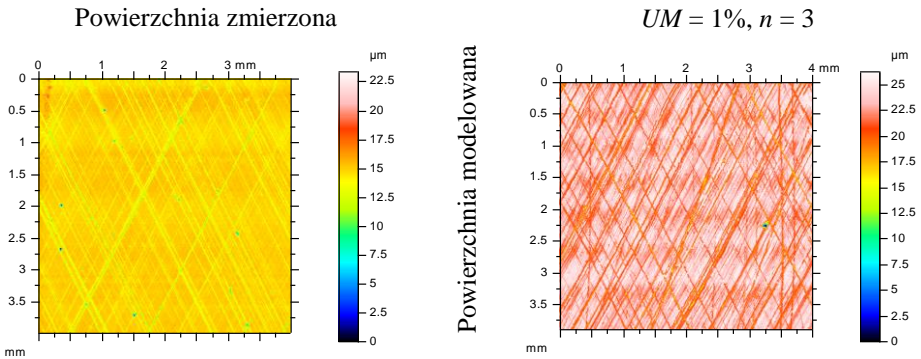


Rys. 4.54. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej i modelowanej powierzchni SK1.2.7

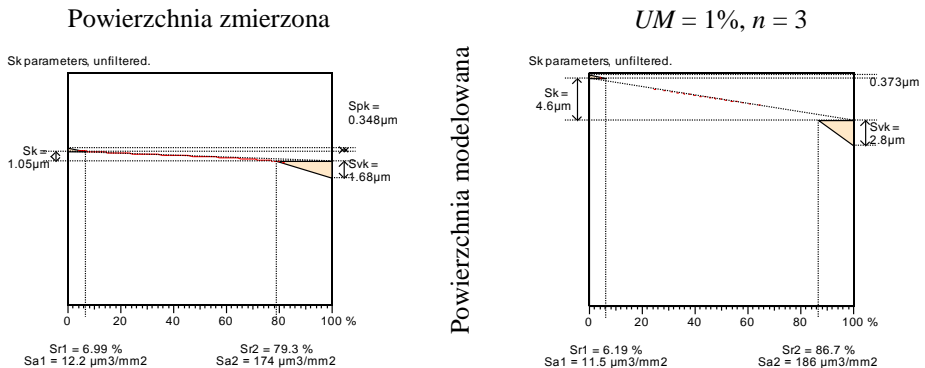
Na skutek modelowania wartości parametrów amplitudowych powierzchni modelowanej Sa i Sq były nieco mniejsze w porównaniu do powierzchni zmierzonej (do 8%) dla liczby iteracji $n = 6$, natomiast zmniejszenie liczby iteracji do $n = 5$ skutkowało tym, iż wartości parametrów amplitudowych powierzchni modelowanej były większe w porównaniu do wartości parametrów powierzchni zmierzonej. Największe robieżności względne (około 30%) dotyczyły długości korelacji Sal .

Tabela 4.20. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni SK1.2.7 oraz powierzchni modelowanej

Powierzchnia zmierzona		$UM = 1\%, n = 6$	
Sq	0.438 μm	Sq	0.399 μm
Ssk	-4.4	Ssk	-4.09
Sku	58.5	Sku	51.3
Sp	2.35 μm	Sp	0.917 μm
Sv	13.9 μm	Sv	10.9 μm
Sz	16.3 μm	Sz	11.9 μm
Sa	0.274 μm	Sa	0.246 μm
Sal	0.0312 mm	Sal	0.0201 mm
Spq	0.241 μm	Spq	0.24 μm
Svq	1.0 μm	Svq	1.16 μm
Smq	90.5%	Smq	88.2%



Rys. 4.55. Mapy konturowe powierzchni zmierzonej SK1.3.8 oraz powierzchni modelowanej



Rys. 4.56. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej i modelowanej powierzchni SK1.3.8

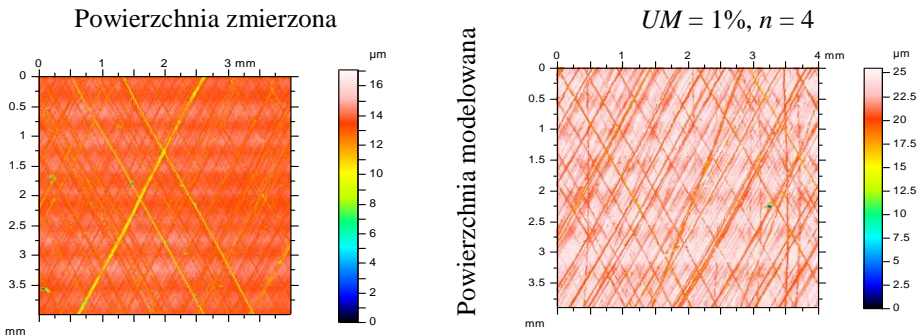
Podsumowując, można stwierdzić, że modelowanie powierzchni z grupy SK1.2.x zapewniło dobre wyniki pomimo różnic wartości niektórych parametrów, takich jak np. Sk i Svk w stosunku do powierzchni zmierzonych. W tym

przypadku można również wywnioskować, że w przeciwieństwie do powierzchni honowanych ostatecznie z wykorzystaniem osełek z warstwą diamentową, liczba iteracji powinna być proporcjonalna do czasu honowania.

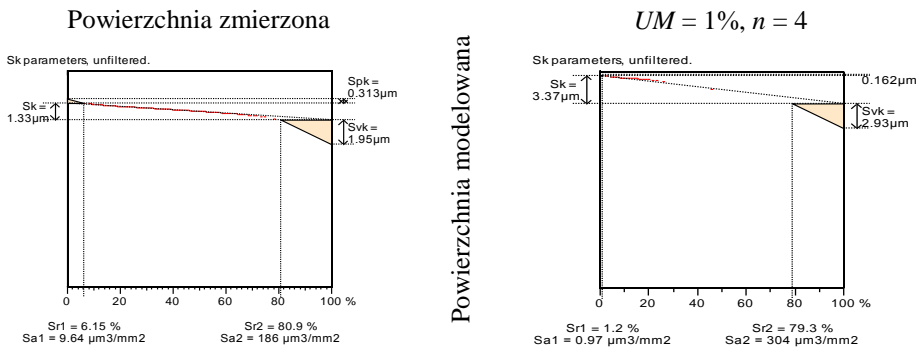
Modelowano powstawanie SGP tulei cylindrycznych w trakcie honowania ostatecznego przy użyciu osełek ceramicznych dla grupy SK1.3.x. Rysunki 4.55. i 4.56. oraz tabela 4.21. przedstawiają wyniki modelowania powierzchni SK1.3.8.

Tabela 4.21. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni SK1.3.8 oraz powierzchni modelowanej

Powierzchnia zmierzona		$UM = 1\%, n = 3$	
Sq	0.756 μm	Sq	1.85 μm
Ssk	-2.52	Ssk	-0.881
Sku	19.2	Sku	5.24
Sp	8.66 μm	Sp	3.27 μm
Sv	14.7 μm	Sv	23 μm
Sz	23.4 μm	Sz	26.3 μm
Sa	0.513 μm	Sa	1.46 μm
Sal	0.0195 mm	Sal	0.0201 mm
Spq	0.358 μm	Spq	0.699 μm
Svq	1.6 μm	Svq	2.241 μm
Smq	79.8 %	Smq	38.2%



Rys. 4.57. Mapy konturowe powierzchni zmierzonej SK1.3.9 oraz powierzchni modelowanej

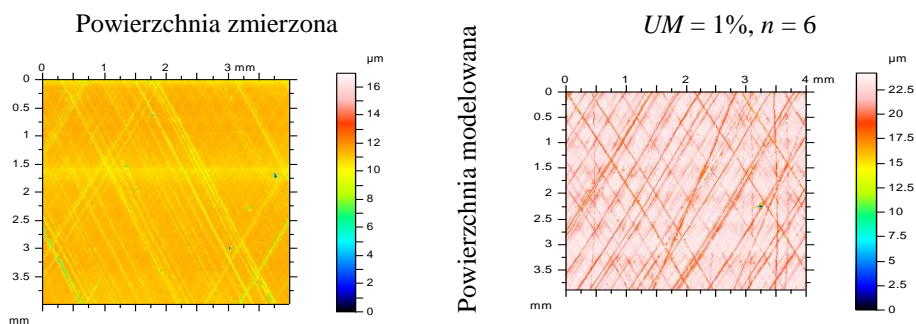


Rys. 4.58. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej i modelowanej powierzchni SK1.3.9

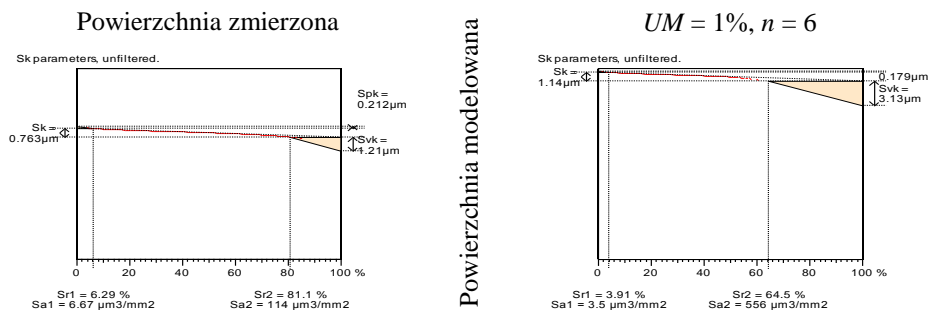
Powyższe wyniki pokazują, że wartości parametrów amplitudowych powierzchni modelowanej są znacznie większe od odpowiednich parametrów powierzchni zmierzonej. Przyczyną tego jest to, że wysokość nierówności powierzchni po honowaniu wykończeniowym SK1.3 jest znacznie większa od powierzchni SK1.2 i SK1.4 i możliwe, że zmierzona powierzchnia SK1.3 nie jest reprezentatywna, zwłaszcza że podobne wyniki otrzymano w stosunku do powierzchni SK1.3.9 (rysunki 4.57., 4.58. oraz tabela 4.22.) i SK1.3.10 (rysunki 4.59., 4.60. oraz tabela 4.23.).

Tabela 4.22. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni SK1.3.9 oraz powierzchni modelowanej

Powierzchnia zmierzona		$UM = 1\%, n = 4$	
Sq	0.891 μm	Sq	1.71 μm
Ssk	-2.68	Ssk	-1.22
Sku	16.3	Sku	6.32
Sp	3.43 μm	Sp	2.63 μm
Sv	13.7 μm	Sv	22.9 μm
Sz	17.1 μm	Sz	25.5 μm
Sa	0.6 μm	Sa	1.36 μm
Sal	0.0273 mm	Sal	0.0201 mm
Spq	0.349 μm	Spq	0.541 μm
Svq	1.85 μm	Svq	2.362 μm
Smq	81.6%	Smq	40.9%



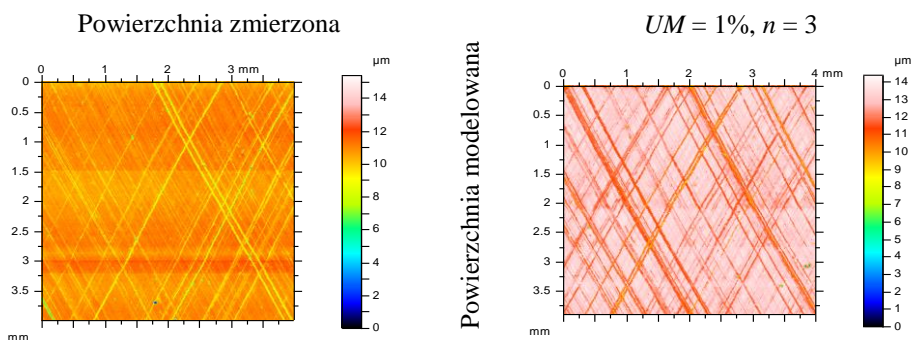
Rys. 4.59. Mapy konturowe powierzchni zmierzonej SK1.3.10 oraz powierzchni modelowanej



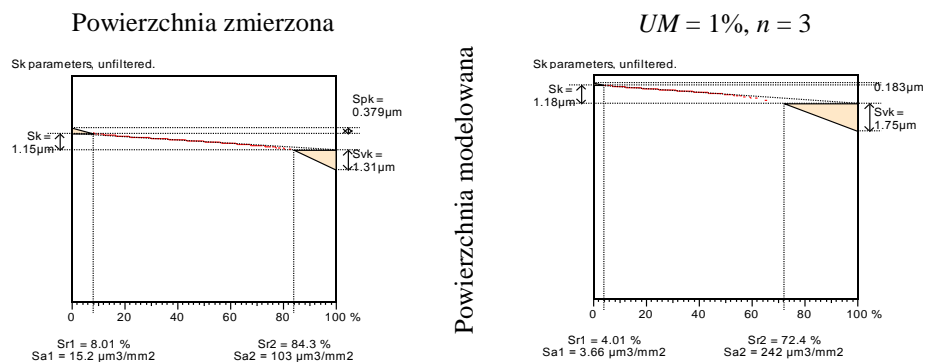
Rys. 4.60. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej i modelowanej powierzchni SK1.3.10

Tabela 4.23. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni SK1.3.10 oraz powierzchni modelowanej

Powierzchnia zmierzona		$UM = 1\%, n = 6$	
Sq	0.553 μm	Sq	1.37 μm
Ssk	-3.7	Ssk	-2.05
Sku	32.7	Sku	11.4
Sp	5.88 μm	Sp	1.75 μm
Sv	11.1 μm	Sv	22.5 μm
Sz	17 μm	Sz	24.2 μm
Sa	0.351 μm	Sa	1.04 μm
Sal	0.0273 mm	Sal	0.0201 mm
Spq	0.287 μm	Spq	0.253 μm
Svq	1.855 μm	Svq	2.501 μm
Smq	93.1%	Smq	57.4%



Rys. 4.61. Mapy konturowe powierzchni zmierzonej SK1.4.11 oraz powierzchni modelowanej



Rys. 4.62. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej i modelowanej powierzchni SK1.4.11

W przypadku powierzchni z grupy SK1.3.x można stwierdzić, że powierzchnie modelowane nie były dobrze przybliżone do odpowiednich powierzchni zmierzonych po zastosowaniu przyjętych parametrów wejściowych modelu ($UM = 1\%$ oraz $n = 3, 4, 6$), czego przyczyną była duża wysokość nie-

równości powierzchni po honowaniu wykończeniowym SK1.3 w porównaniu do powierzchni SK1.2 oraz SK1.4. Znacznie lepsze wyniki modelowania uzyskano dla odpowiednio większej liczby iteracji. Jak wspomniano wcześniej, powierzchnia SK1.3 nie była prawdopodobnie powierzchnią reprezentatywną. Lepsze wyniki można osiągnąć, gdyby powierzchnią, na którą nakładano powierzchnię skrzyżowaną, była powierzchnia SK1.2.

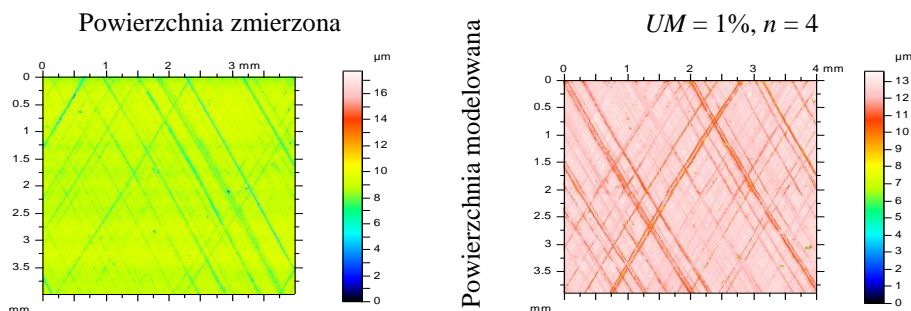
Ostatnią serię modelowanych powierzchni stanowią SK1.4.x. Na rysunkach 4.61., 4.62. oraz w tabeli 4.24. przedstawiono wyniki modelowania powierzchni SK1.4.11.

Tabela 4.24. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni SK1.4.11 oraz powierzchni modelowanej

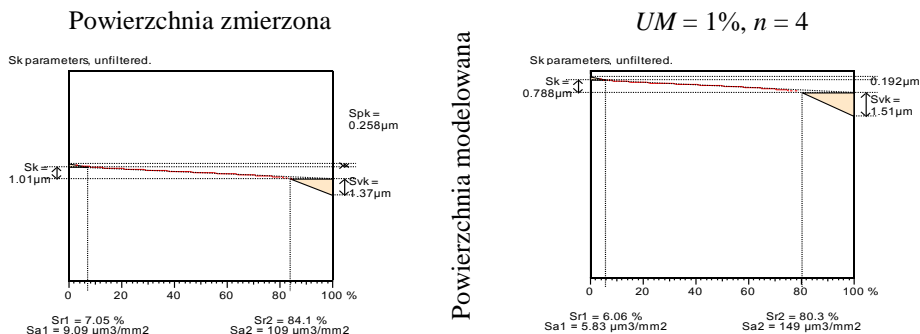
Powierzchnia zmierzona		$UM = 1\%, n = 3$	
Sq	0.695 μm	Sq	0.802 μm
Ssk	-2.2	Ssk	-1.68
Sku	15.2	Sku	8
Sp	4.63 μm	Sp	1.57 μm
Sv	10.8 μm	Sv	12.8 μm
Sz	15.4 μm	Sz	14.4 μm
Sa	0.498 μm	Sa	0.604 μm
Sal	0.0273 mm	Sal	0.0281 mm
Spq	0.32 μm	Spq	0.309 μm
Svq	1.06 μm	Svq	1.27 μm
Smq	77.1%	Smq	69.6%

W tym przypadku można zaobserwować, że dla przyjętych wartości wejściowych parametrów modelowania wartości parametrów amplitudowych SGP modelowanej były większe od wartości wyróżników SGP zmierzonej, natomiast wartości parametrów związanych z udziałem nośnym – Smq i $Sr2$, były znacznie mniejsze. Najlepsze wyniki modelowania zaobserwować można dla parametrów Sk i Spq , zaś najgorsze dla parametru Svk (błąd około 30%). Niewielkie rozbieżności dotyczyły długości korelacji Sal .

Na rysunkach 4.63., 4.64. i w tabeli 4.25. przedstawiono wyniki modelowania powierzchni SK1.4.12.



Rys. 4.63. Mapy konturowe powierzchni zmierzonej SK1.4.12 oraz powierzchni modelowanej



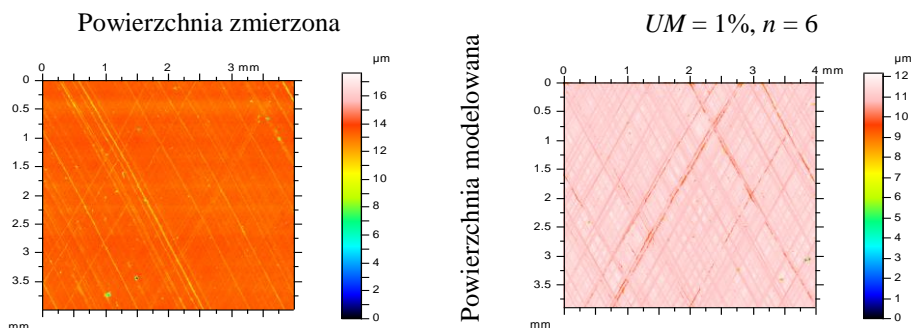
Rys. 4.64. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej i modelowanej powierzchni SK1.4.12

Tabela 4.25. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni SK1.4.12 oraz powierzchni modelowanej

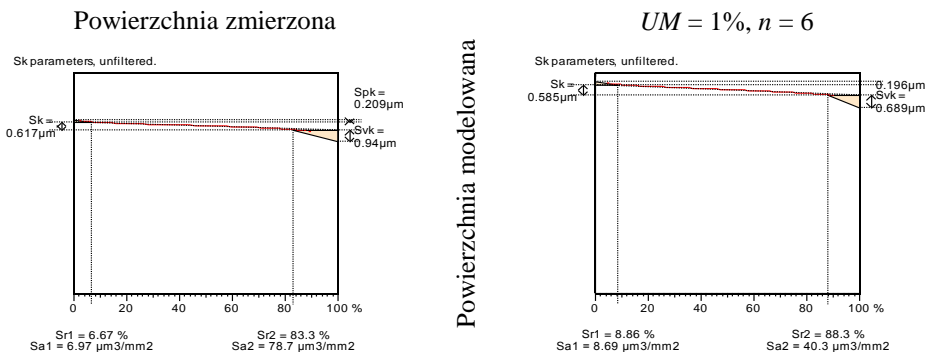
Powierzchnia zmierzona		$UM = 1\%, n = 4$	
Sq	0.608 μm	Sq	0.602 μm
Ssk	-2.44	Ssk	-2.76
Sku	14.5	Sku	18.6
Sp	8.74 μm	Sp	1.21 μm
Sv	9 μm	Sv	12.4 μm
Sz	17.7 μm	Sz	13.6 μm
Sa	0.408 μm	Sa	0.402 μm
Sal	0.0312 mm	Sal	0.0271 mm
Spq	0.306 μm	Spq	0.263 μm
Svq	1.27 μm	Svq	1.42 μm
Smq	82.4%	Smq	81.9%

W przypadku powierzchni SK1.4.12 można zaobserwować stosunkowo dobre przybliżenie parametrów powierzchni modelowanej do powierzchni zmierzonej. Dotyczy to wszystkich analizowanych parametrów poza Sp , Sz , Sv i Sku . Najgorzej dopasowany był parametr Sk (błąd względny wynosił około 20%).

Na rysunkach 4.65., 4.66. oraz w tabeli 4.26. przedstawiono wyniki modelowania SGP tulei SK1.4.13.



Rys. 4.65. Mapy konturowe powierzchni zmierzonej SK1.4.13 oraz powierzchni modelowanej



Rys. 4.66. Wykresy udziału materiałowego zmierzonej i modelowanej powierzchni SK1.4.13

Tabela 4.26. Wartości parametrów zmierzonej powierzchni SK1.4.13 oraz powierzchni modelowanej

Powierzchnia zmierzona		$UM = 1\%, n = 6$	
Sq	0.423 μm	Sq	0.374 μm
Ssk	-5.15	Ssk	-4.99
Sku	74.3	Sku	86.9
Sp	4.37 μm	Sp	0.996 μm
Sv	13.3 μm	Sv	11.2 μm
Sz	17.6 μm	Sz	12.2 μm
Sa	0.259 μm	Sa	0.224 μm
Sal	0.0199 mm	Sal	0.0241 mm
Spq	0.36 μm	Spq	0.314 μm
Svq	1.33 μm	Svq	1.24 μm
Smq	91.2%	Smq	94.6%

Podczas analizy wyników modelowania powierzchni SK1.4.13 można zauważyć, że wartości parametrów amplitudowych powierzchni modelowanej są mniejsze od wartości tych parametrów powierzchni zmierzonej; różnice zazwyczaj nie przekraczają 15%. Natomiast zmniejszenie liczby kroków iteracji do $n = 5$ sprawiło, że wartości tych parametrów dla powierzchni modelowanej były większe od powierzchni zmierzonej. Różnica pomiędzy długością korelacji Sal powierzchni modelowanej i zmierzonej wynosi około 20%.

Modelowanie powierzchni po honowaniu ostatecznym z użyciem osełek ceramicznych zapewniło najlepsze wyniki w przypadku powierzchni SK1.2.5, SK1.2.6 oraz SK1.2.7. Uzyskane wyniki wskazują, że liczba iteracji wykorzystanych w algorytmie modelowania powierzchni po honowaniu osełkami z warstwą ceramiczną powinna być proporcjonalna do czasu honowania.

4.4. Wnioski

Modelowanie struktury geometrycznej powierzchni po honowaniu wykończeniowym w większości przypadków zapewniło korzystniejsze wartości parametrów powierzchni modelowanych.

Założenia algorytmu, za pomocą którego modelowano powierzchnie po honowaniu ostatecznym, polegały na wgłębianiu się obróconej powierzchni jednokierunkowej w nowo powstałą powierzchnię modelowaną na wysokość odpowiadającą tej samej wartości udziału materiałowego (parametr modelu UM). Czynność ta realizowana była w pętli iteracyjnej, w której liczba iteracji (n) była proporcjonalna do czasu honowania ostatecznego.

Podczas modelowania SGP tulei po honowaniu ostatecznym z użyciem osełek z warstwą diamentową wykorzystano dwa warianty parametrów wejściowych modelu. Lepsze wyniki uzyskano, stosując wariant pierwszy. W przypadku modelowania powierzchni po honowaniu osełkami ceramicznymi wprowadzono tylko jeden zestaw parametrów wejściowych.

Zastosowana metodyka modelowania zapewniła dobre dopasowanie dla większości powierzchni po honowaniu osełkami ceramicznymi dla wszystkich czasów honowania, natomiast w przypadku honowania osełkami z warstwą diamentową – dla najkrótszego oraz średniego czasu obróbki. Modelowane powierzchnie po honowaniu osełkami z warstwą diamentową, dla których czas honowania ostatecznego był najdłuższy, charakteryzowały się dużo mniejszymi wartościami parametrów związanych z wysokością nierówności, natomiast wartości ich udziałów materiałowych Smq i $Sr2$ były znacznie większe niż w przypadku powierzchni zmierzonych. W tym przypadku zaobserwowano, że zmniejszenie liczby iteracji powodowało dużo lepsze przybliżenie tych parametrów. Można więc wnioskować, że modelując daną powierzchnię, należy mieć na uwadze to, że wraz ze wzrostem czasu honowania ostatecznego powinno zmniejszać się wartość parametru modelowania związanego z wartością udziału materiałowego (UM) lub przy zachowaniu stałej wartości tego parametru – zmniejszać liczbę iteracji n . Teoretycznie, liczba iteracji w algorytmie powinna być proporcjonalna do czasu honowania ostatecznego, jednak w tym przypadku tę rozbieżność można wytłumaczyć fizycznym pogorszeniem zdolności osełek do usuwania materiału.

W przypadku modelowania powierzchni po honowaniu ostatecznym z użyciem osełek ceramicznych najgorsze wyniki uzyskano dla powierzchni z grupy SK1.3.x. Przyczyną tego była większa wysokość nierówności powierzchni SK1.3 po honowaniu wykończeniowym niż w przypadku SK1.2 oraz SK1.4, co skutkowało tym, że wszystkie parametry tych powierzchni po zastosowaniu ustalonych parametrów wejściowych modelowania nie były dobrze przybliżone do powierzchni zmierzonych. Dopiero zwiększenie liczby iteracji n zapewniło uzyskanie poprawniejszych wartości tych parametrów. Przyczyną błędów był prawdopodobnie brak reprezentatywności zmierzonej powierzchni SK1.3.

W większości przypadków wartości parametrów opisujących maksymalną wysokość SGP Sz , Sv i Sp były większe w przypadku powierzchni zmierzonych w porównaniu do modelowanych. Występowały też rozbieżności wartości para-

metrów charakteryzujących kształt rozkładu rzędnych Ssk i Sku . Są one spowodowane istnieniem pojedynczych wierzchołków (szpilek) i dolin. Eliminacja tych elementów nietypowych skutkuje lepszym przybliżeniem wartości wymienionych parametrów powierzchni modelowanych do wyróżników powierzchni zmierzonych.

Parametry z grupy Sq powierzchni modelowanych były bardziej zbliżone do parametrów powierzchni zmierzonych w porównaniu do parametrów z grupy Sk .

Tendencje zmian struktury geometrycznej powierzchni modelowanych przy zastosowaniu ustalonych parametrów wejściowych modelu były podobne do tych, które zaobserwowano dla powierzchni zmierzonych w trakcie procesu honowania.

5. Modelowanie SGP teksturowanych w trakcie eksploatacji

5.1. Wprowadzenie

Modelowanie struktury geometrycznej powierzchni, powstającej na skutek zużycia, zapewnia znaczne zmniejszenie zarówno kosztów, jak i czasu koniecznego na przeprowadzenie badań eksperymentalnych. Umożliwia również analizę zmian nierówności powierzchni w trakcie zużycia. Jest stosowane zwłaszcza wówczas, gdy zużycie jest mniejsze od początkowej wysokości nierówności powierzchni. Takie zużycie może być nazywane niewielkim lub zerowym. Metody modelowania zużycia zostały opisane w rozdziale drugim. Historycznie pierwszą metodą było odcinanie części wierzchołkowej wysokości nierówności. Prowadziło to jednak do uproszczeń i trudności na przykład analizy parametrów związanych z wierzchołkami. Jednakże stwierdzono, że w trakcie procesu zużycia na powierzchnię obrabianą nakładana jest powierzchnia, zwykle o normalnym rozkładzie rzędnych [219]. Trudno jednak znaleźć w dostępnej literaturze technicznej porównanie tych dwóch metod modelowania.

W tym rozdziale zostanie opisane modelowanie SGP tulei cylindrowej po badaniach tribologicznych przeprowadzonych z wykorzystaniem testera tribologicznego do badań tarcia i zużycia w ruchu posuwisto-zwrotnym. W modelowaniu znajdzie zastosowanie metoda nakładania powierzchni. Przedstawione zostaną również wyniki modelowania topografii teksturowanej powierzchni rolki współpracującej z klockiem w warunkach sztucznie zwiększonego zapylenia. Modelowanie topografii powierzchni rolki po procesie zużycia będzie przeprowadzone z wykorzystaniem metody odcinania części wierzchołkowej oraz nakładania powierzchni losowej o normalnym rozkładzie rzędnych na powierzchnię obrabianą. Trzecią stosowaną metodą będzie symulacja oddziaływania ziaren ściernych.

5.2. Modelowanie struktury geometrycznej zużytej powierzchni tulei cylindra

5.2.1. Metodyka i wyniki badań

Badania eksperymentalne przeprowadzono z wykorzystaniem testera tribologicznego w ruchu posuwisto-zwrotnym. Próbkę została wycięta z honowanych tulei cylindrów wykonanych z żeliwa szarego, perlitycznego o eutektyce fosforowej. Twardość żeliwa wynosiła 218HB, natomiast wytrzymałość na rozciąganie – 320 MPa. Badano powierzchnie tulei cylindrowych po honowaniu płaskowierzchołkowym. Były one kształtowane podczas honowania wykończeniowego

oraz ostatecznego. Badaniu poddano również powierzchnie cylindrów po honowaniu jednoprosowym, dla których rozkład rzędnych jest zbliżony do rozkładu Gaussa. Honowanie obu grup cylindrów miało na celu uzyskanie tych samych wartości parametru Sq (w granicach przyjętej tolerancji) zarówno dla powierzchni jedno-, jak i dwuprosowych. Wartości parametru Sq wynosiły odpowiednio: 0.4; 0.7 oraz 1 μm . Przedmiotem badań były również dwie tuleje cylindra po honowaniu jednoprosowym, dla których parametr Sq wynosił 0.2 oraz 1.8 μm . Trzy inne powierzchnie dwuprosowe miały dodatkowo kieszenie olejowe wykonane poprzez wygniatanie. Kieszenie ułożone były wzdłuż ich krótszego wymiaru zgodnie z kierunkiem ślizgania przeciwpróbki. Kąt honowania dla wszystkich próbek wynosił około 50° . Próbkę współpracowały z przeciwpróbkami wykonanymi ze stali chromowanej C45. Mikrotwardość powłoki wynosiła 835 HV1/10, wysokość chropowatości przeciwpróbki wyrażona parametrem Ra wynosiła 0.3 μm . Pozostałe parametry wykorzystane podczas badań to: prędkość ślizgania 0.44 m/s, naciski jednostkowe 8.3 MPa, ilość użytego środka smarującego 0.0012 dm^3/h , całkowita droga tarcia 6480 m. Środkiem smarującym zastosowanym w miejscu kontaktu był olej silnikowy SUPEROL SAE CB40 o małej ilości dodatków uszlachetniających. Każde badanie tribologiczne powtórzono trzykrotnie. Za pomocą profilometru stykowego Talyscan 150 zmierzono topografię powierzchni próbek zarówno przed, jak i po próbach tarcia. Pomiar wykonano za pomocą końcówki sferycznej o promieniu zaokrąglenia 2 μm , obszar pomiarowy wynosił 1 mm x 4 mm, natomiast krok próbkiowania 5 μm . Stwierdzono, że zużycie tulei cylindrowej dwuprosowej było niższe niż w przypadku próbki jednoprosowej dla powierzchni o takiej samej wartości parametru Sq . Typową cechą procesu zużycia w przypadku powierzchni tulei cylindra jest zmniejszenie skośności Ssk oraz wzrost kurtozy – Sku . Parametry amplitudowe opisujące część wierzchołkową powierzchni, takie jak: wysokość wierzchołków Sp , zredukowana wysokość wierzchołków Spk oraz wysokość rdzenia Sk , uległy zmniejszeniu. Szczegółowy opis procedury testowej oraz wyników eksperymentu znajduje się w publikacjach [66, 180].

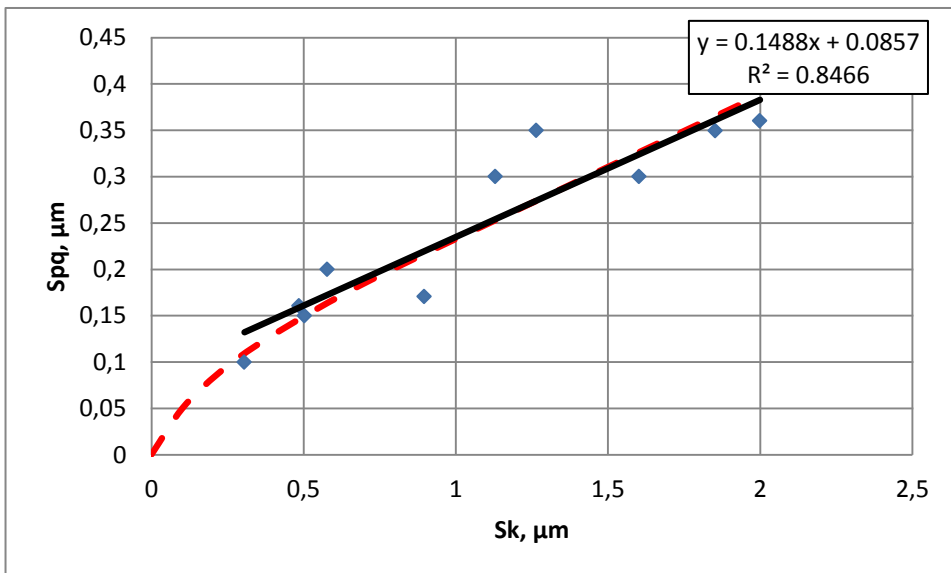
5.2.2. Procedura modelowania powierzchni po zużyciu

Przeprowadzone badania wykazały, że w trakcie zużycia utworzyła się jednokierunkowa powierzchnia usytuowana równolegle do kierunku ruchu, składająca się z relatywnie chropowatej struktury dolin oraz gładkiej części wierzchołkowej. Potwierdza to analiza krzywej udziału materiałowego w układzie laplaso-normalnym (rys. 2.6.).

Topografia zużytej powierzchni tulei cylindra modelowana była poprzez nałożenie anizotropowej jednokierunkowej (ortotropowej) losowej topografii powierzchni o normalnym (Gaussowskim) rozkładzie rzędnych na zmierzoną topografię powierzchni tulei cylindra po obróbce. Struktura geometryczna po-

wierzchni modelowanej nakładanej na powierzchnię rzeczywistą o wykładniczym kształcie funkcji autokorelacji definiowana jest przy pomocy trzech parametrów wejściowych modelu: odchylenia standardowego powierzchni – Sq (równego wartości parametru Spq zużytej powierzchni tulei cylindra) oraz długości korelacji dkx i dky w obu prostopadłych kierunkach. W oparciu o obserwacje empiryczne zastosowano wykładniczy kształt funkcji autokorelacji. Długości korelacji były oceniane na podstawie analizy powierzchni zużytych tulei cylindrów. Powierzchnia generowana była przy pomocy procedury opracowanej przez Wu [245].

Długość korelacji dkx wzdłuż osi cylindra wynosiła $800\ \mu\text{m}$, natomiast w kierunku prostopadłym – $dky = 25\ \mu\text{m}$. Algorytm modelowania zużycia powierzchni tulei cylindra polegał na nakładaniu wygenerowanej komputerowo „wtórnej” struktury geometrycznej powierzchni o normalnym rozkładzie rzędnych na zmierzoną „pierwotną” strukturę geometryczną powierzchni uzyskaną podczas obróbki. Na podstawie analizy struktury geometrycznej powierzchni tulei cylindra po zużyciu stwierdzono, że wartość parametru Spq była proporcjonalna do wartości parametru Sk (rys. 5.1.).

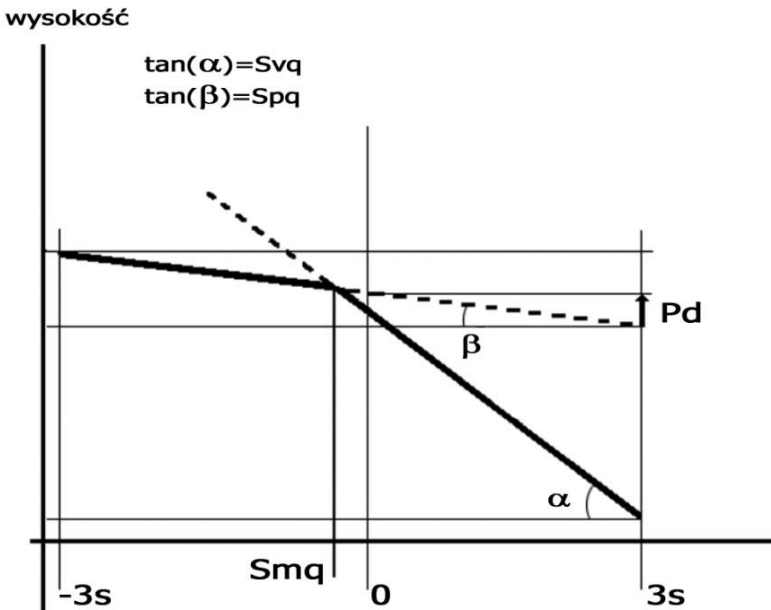


Rys. 5.1. Zależność pomiędzy parametrami Spq i Sk dla zużytej powierzchni tulei cylindrowej

Początkowo dokonano nieliniowej aproksymacji (przerywana linia), jednak ze względu na to, że analizowana wartość parametru Sk powinna mieścić się w przedziale $0.3 - 2.2\ \mu\text{m}$, na potrzebę modelowania rozpatrywano wartości znajdujące się na linii ciągłej.

W algorytmie modelowania wykorzystano specjalną procedurę iteracyjną, której celem było jak najlepsze przybliżenie wartości parametru Spq dla powierzchni modelowanej do wartości tego parametru dla odpowiadającej jej wartości parametru Sk wynikającej z prostej na wykresie (rys. 5.1.).

W procedurze tej wartość parametru Spq ustalano na podstawie linii prostej pokazanej na rys. 5.1. Odległość pomiędzy średnimi płaszczyznami powierzchni „pierwotnej” i „wtórnej” Pd (rys. 5.2.) zmieniła się, dopóki wartość parametru Sk nie zbliżyła się do wartości rzeczywistej (sprawdzano warunek, czy różnica pomiędzy wartością tego parametru dla powierzchni modelowanej i rzeczywistej jest mniejsza niż przyjęta granica tolerancji). Jeśli ten warunek nie był spełniony, wartość parametru Spq dobierano ponownie, a cała procedura była powtarzana. Należy pamiętać, że jak wspomniano w rozdziale drugim, wartość parametru Sk wpływa na grubość filmu olejowego, zużycie oleju oraz emisję spalin.

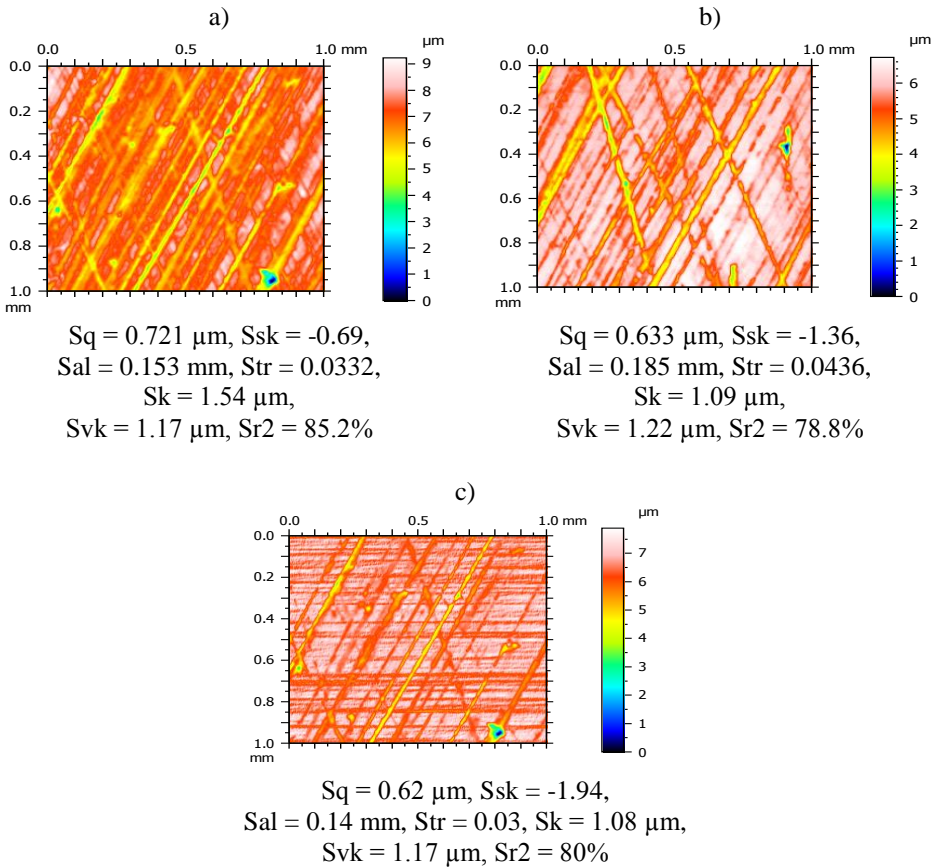


Rys. 5.2. Parametry Spq , Svq , Smq oraz odległość Pd

5.2.3. Wyniki modelowania

Na podstawie analizy korelacji i regresji oraz czułości parametrów na błędy pomiarowe do opisu struktury geometrycznej powierzchni zużytej tulei cylindra wybrano grupę następujących parametrów: Ssk , Sal , Str , Sk , Svk , $Sr2$ i Sq . Były to parametry analizowane w rozdziale czwartym; wyłączono z nich wyróżniki, na

których wartości ma wpływ obecność pojedynczych wierzchołków i wgłębień: Sp , Sv , Sz i Sku . Ze względu na odmienność kształtowania SGP tulei cylindrowych na etapach technologii i eksploatacji dołączono parametr tekstury Str . Nie analizowano parametrów z grupy Sq , ponieważ wartość parametru Spq była zadana.

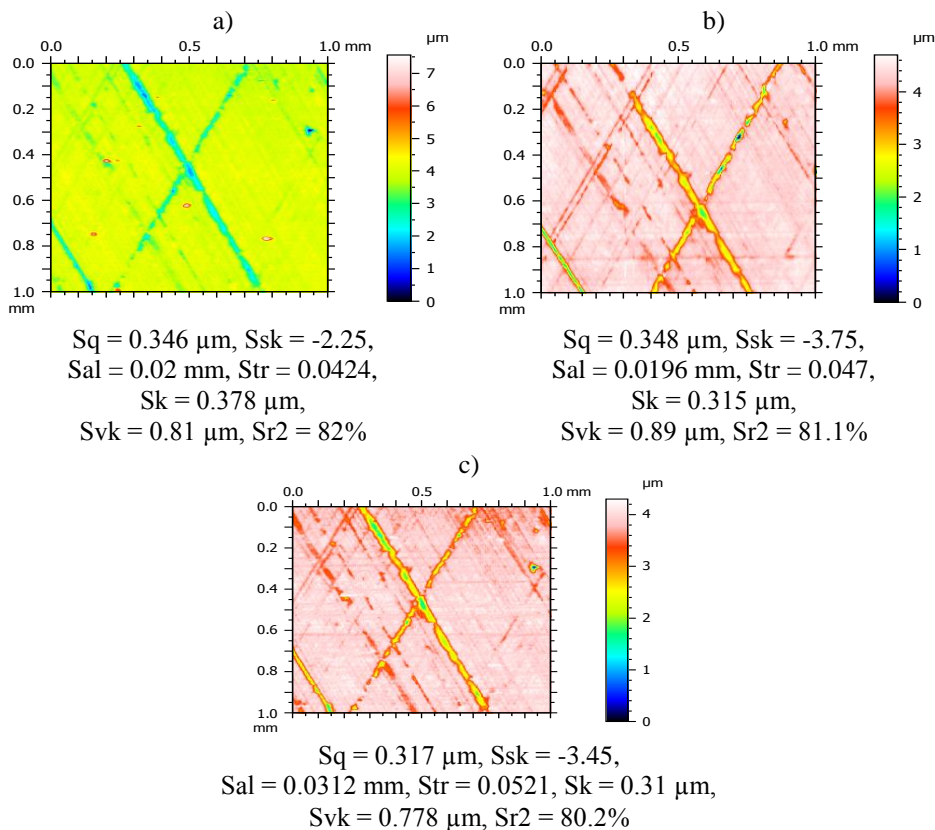


Rys. 5.3. Powierzchnia tulei cylindra po honowaniu jednoprosesowym przed zużyciem (a), po zużyciu (b) oraz modelowana komputerowo powierzchnia po zużyciu (c)

Założono, że kryteria dopasowania są satysfakcjonujące w przypadku, gdy różnice pomiędzy zmierzonymi i modelowanymi parametrami topografii powierzchni tulei cylindra są mniejsze niż błędy graniczne parametrów. Błędem granicznym jest połowa przedziału ufności. Warunkiem dopasowania jest więc znajdowanie się parametrów stereometrii powierzchni modelowanej w przedziale ufności. Błędy graniczne parametrów, otrzymane na podstawie powtórzeń pomiarów topografii powierzchni, wynosiły odpowiednio: $Sq - 0.25 \mu\text{m}$, $Ssk - 1.5$, $Sal - 0.04 \text{ mm}$, $Str - 0.02$, $Sk - 0.3 \mu\text{m}$, $Svk - 1.1 \mu\text{m}$, oraz $Sr2 - 9.1\%$ (prze-

dział ufności wynosił 0.95). Zamodelowano powierzchnię tulei cylindra o wymiarach $1 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$. Kryteria dopasowania były satysfakcjonujące w 91% analizowanych przypadków. Prognozowana wartość parametru Sal sprawdziła się w 91% analizowanych przypadków (różnica wynosiła 0.05 mm), natomiast poprawność dopasowania pozostałych parametrów wynosiła 100%. Średnia absolutna wartość błędów względnych prognozowania dla parametru Sq wynosiła 8.9%, Ssk – 23.9%, Sal – 11.4%, Str – 14.2%, Sk – 1.1%, Svk – 16.6% oraz $Sr2$ – 5.9%. Mała wartość parametru Str w przypadku modelowanej struktury geometrycznej powierzchni zużytego cylindra jest charakterystyczna dla struktury anizotropowej. Jest ona skutkiem zarówno procedury nakładania powierzchni, jak i anizotropowego charakteru pozostałości po powierzchni honowanej.

Rysunki 5.3. i 5.4. przedstawiają mapy konturowe powierzchni po obróbce, powierzchni zużytej oraz modelowanej powierzchni zużytej wykonanej w jednym i dwóch zabiegach honowania.



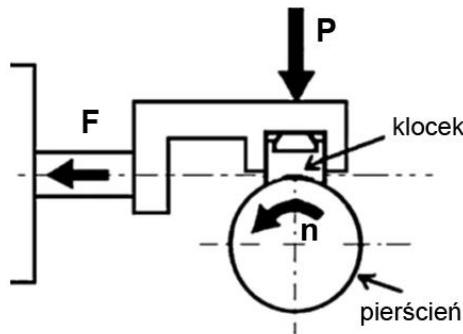
Rys. 5.4. Powierzchnia tulei cylindra po honowaniu dwuprocesowym przed zużyciem (a), po zużyciu (b) oraz modelowana komputerowo powierzchnia po zużyciu (c)

Modelowano stereometrię powierzchni zużytych cylindrów, nakładając jednokierunkową losową topografię powierzchni o normalnym rozkładzie rzędnych na zmierzoną topografię powierzchni po honowaniu. Wykorzystano zależność pomiędzy odchyleniem standardowym części nośnej a wysokością chropowatości rdzenia nierówności cylindrów po procesie zużycia. Dokładność dopasowania parametrów była dobra, biorąc pod uwagę skomplikowany charakter struktury geometrycznej zużytej powierzchni tulei cylindra. Potwierdzono prawdziwość trendów zmiany parametrów podczas zużycia.

5.3. Modelowanie SGP tekstuowanego pierścienia stalowego w trakcie zużycia w warunkach sztucznie zwiększonego zapylenia

5.3.1. Metodyka i wyniki badań

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem testera tribologicznego pracującego w układzie pierścien – klocek (rys. 5.5.). Obracająca się próbka pierścienia o średnicy 35 mm wykonana była z utwardzonej stali 42CrMo4 o twardości 32HRC. Nieruchomy klocek był częścią tulei łożyska wykonanego z utwardzonego żeliwa EN-GJS 400-15 o twardości 50HRC.

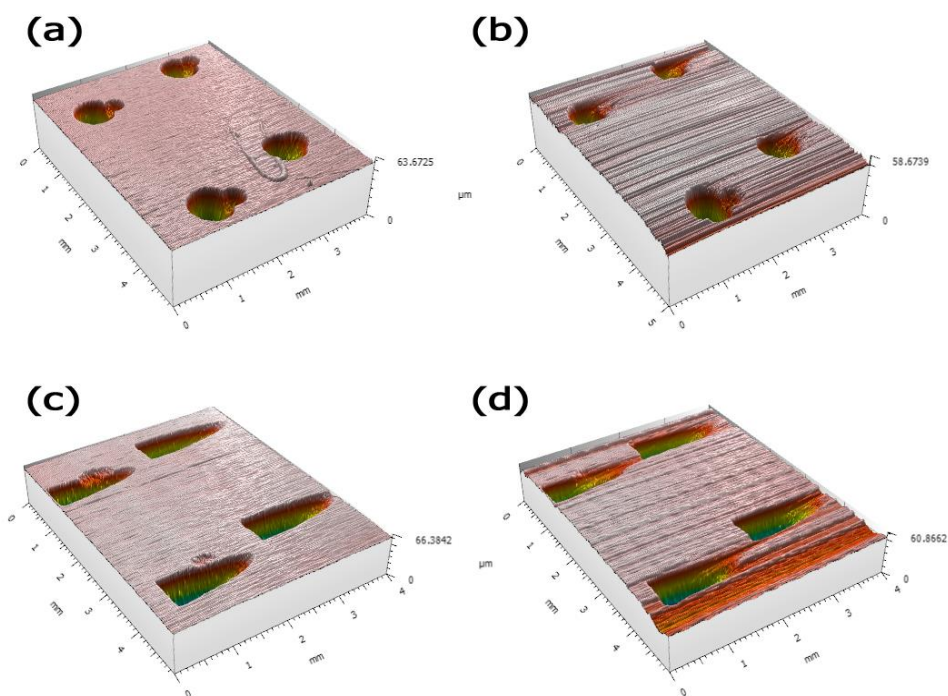


Rys. 5.5. Schemat testowanego zespołu

Powierzchnia pierścienia została zmodyfikowana przez wygniatanie w celu otrzymania powierzchni z kieszeniami olejowymi. W badaniach analizowano kieszenie olejowe o kształcie sferycznym oraz kształcie kropli. Szersza strona kieszeni o kształcie kropli usytuowana była w kierunku wektora prędkości. Analizowane skojarzenie w trakcie badań zanurzone było w cieczy smarującej L-AN 46 (olej mineralny, rafinowany z dodatkami przeciw spienianiu, utlenianiu

i korozji). Eksperyment przeprowadzono w warunkach sztucznie zwiększonego zapylenia. Częstkami pyłu były głównie SiO_2 (74%) oraz Al_2O_3 (15%) w ilości około 1 g pyłu na 40 cm^3 oleju. Dodawanie pyłu kwarcowego spowodowało intensyfikację zużycia ściernego. Jest to zjawisko niszczenia współpracujących tarciowo elementów w wyniku skrawającego, bruzdzącego, rysującego i ścinającego oddziaływania cząstek ciał obcych, produktów zużycia lub nierówności powierzchni [116, 196]. Obciążenie normalne wynosiło 900 N, prędkość – 0.27 m/s, zaś droga tarcia – 3891.9 m (czas badań obejmował 4 godziny). Każde doświadczenie powtórzono trzy razy.

Pomiary zużycia wykonano za pomocą profilometru stykowego Talyscan 150. Obszar mierzony miał wymiary 7 mm x 6 mm (krok próbkowania w kierunkach wzajemnie prostopadłych wynosił $15 \mu\text{m}$), pomiary SGP pierścienia wykonano w tych samych miejscach przed i po badaniach tribologicznych (rys. 5.6.).



Rys. 5.6. Przykładowe widoki izometryczne topografii powierzchni po obróbce (a, c) i po zużyciu (b, d) z kieszeniami olejowymi o kształcie sferycznym (a, b) i kształcie kropli (c, d)

W celu pomiaru powierzchni pierścienia dokładnie w tym samym miejscu wykorzystano metodę relokacji (mechanicznej i następnie cyfrowej). Ze względu na to, że mierzony obszar powierzchni zawierał strefy, gdzie nie wystąpiło

zużycie, obszary, dla których obliczano poszczególne parametry, były mniejsze (5 mm x 4 mm) od pól powierzchni zmierzonych. Po relokacji, przed obliczeniem parametrów, dane pomiarowe zostały dopasowane wielomianem 3 stopnia w celu usunięcia krzywizny powierzchni, natomiast nie zastosowano filtra cyfrowego. Wartości zużycia masowego i liniowego nieruchomego klocka oceniano przy pomocy wagi laboratoryjnej LB-1050/2 o maksymalnym błędzie dopuszczalnym $MPE = \pm 0.001g$ oraz czujnika MDDA o dokładności $\pm 0.5 \mu m$ (pomiar w trzech miejscach). Pomiar wykonano przed każdym doświadczeniem i po jego zakończeniu. Szczegółowe informacje można znaleźć w publikacjach [53, 162, 179].

5.3.2. Opis topografii teksturowanej powierzchni

W analizach wykorzystano dwie grupy powierzchni, jedną stanowiły powierzchnie uzyskane bezpośrednio po obróbce (szlifowaniu i następnym wygniataniu), natomiast drugą – po zużyciu. Zużycie było niewielkie, jego wielkość nie przekraczała wysokości nierówności po obróbce mechanicznej. Analizowano SGP pierścieni o kształcie sferycznym (głębokość około 60 μm i średnica 900 μm) oraz o kształcie kropli (głębokość około 55 μm , długość 1600 μm i szerokość 500 μm – rys. 5.6.), przy czym dla każdego typu kieszeni olejowych współczynnik pokrycia powierzchni wgłębieniami S wynosił odpowiednio 7.5%, 10%, 12.5%, 15% oraz 20%, przez co w rezultacie przebadano 10 pierścieni. Dla każdego zestawu próbek (po wygniataniu i zużyciu) przeprowadzono analizę korelacji pomiędzy poszczególnymi parametrami SGP teksturowanych pierścieni stalowych: S_a , S_q , S_p , S_v , S_{sk} , S_{ku} , S_z , S_{dq} , S_{pc} , S_{pd} , S_{tr} , S_{al} , S_k , S_{pk} , S_{vk} , S_{r2} i S_{a2} . S_{a2} jest pojemnością olejową odpowiadającą polu A_2 z rys. 4.2b. Pojemność olejowa oznacza objętość oleju zmagazynowaną we wgłębieniach topografii powierzchni. Wpływa w istotny sposób na właściwości funkcjonalne skojarzeń trących [60].

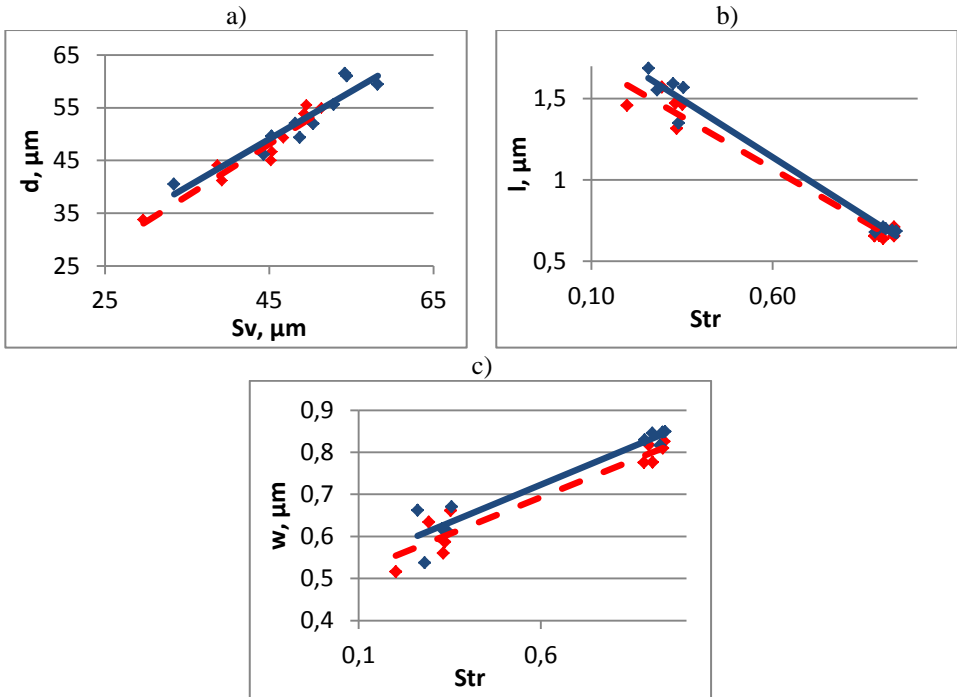
Analizie poddano również parametry związane z opisem kształtu i rozmieszczenia kieszeni olejowych: stopień pokrycia S , głębokość d , długość l , szerokość w i objętość (pojemność olejową) każdej kieszeni V [179]. Przyjęto, że parametry były silnie skorelowane, kiedy wartość bezwzględna współczynnika korelacji liniowej r między nimi była większa niż 0.7.

Na podstawie uzyskanych wyników na potrzeby badań zdecydowano, że wysokość struktury geometrycznej powierzchni będą charakteryzowały następujące parametry: S_p , S_v i S_q , gdyż są one wzajemnie niezależne. Parametry S_p i S_v wybrano ze względu na to, że opisują wysokość różnych części powierzchni, odpowiednio – wierzchołkową (plateau) i dolin. Brak korelacji pomiędzy tymi parametrami jest charakterystyczną cechą powierzchni dwuprosocowych. Parametr S_v jest skorelowany z głębokością kieszeni smarowych, natomiast S_q z pojemnością olejową.

W celu opisu właściwości hybrydowych powierzchni wybrano nachylenie Sdq . Parametr ten jest skorelowany tylko z innym parametrem hybrydowym Spc , a statystyczne połączenie z parametrami amplitudowymi i pojemnością olejową wykazano tylko dla próbek po wygniataniu. Spośród parametrów przestrzennych wybrano parametr Str ze względu na mocną korelację z wymiarami kieszeni olejowych: szerokością i długością.

Ostatecznie, aby opisać powierzchnię pierścienia przed i po zużyciu zerowym, wybrano zestaw następujących parametrów: Sp , Sv , Sq , Sk , Sdq i Str .

Rys. 5.7. przedstawia zależności pomiędzy wybranymi zalecanymi parametrami struktury geometrycznej powierzchni i wymiarami kieszeni smarowej.



Rys. 5.7. Zależności pomiędzy wartością parametrów struktury geometrycznej powierzchni i wymiarami kieszeni smarowych (a) Sv i d , (b) Str i l , (c) Str i w (linia ciągła – powierzchnie po obróbce; przerywana – powierzchnie po zużyciu)

Podczas zużycia wzrosła wysokość rdzenia chropowatości Sk . Niemniej jednak zmalały wartości statystycznych parametrów wysokościowych – Sa , Sq , wysokości maksymalnej – Sz oraz głębokości dolin – Sv , Svk . Zwiększyło się pochylenie średniokwadratowe Sdq i średnia krzywizna wierzchołków Spc – zmiany te były stosunkowo duże. Nie zaobserwowano tendencji zmian parametrów Str i Sp . Głębokość dolin zmniejszała się podczas zużycia, ale średnie

zmiany były niewielkie (około 10%). Podczas zużycia dna dolin nie zmieniały się, gdyż usunięcie materiału będące skutkiem ścierania wpływało na zmianę tylko górnej części topografii powierzchni.

Po porównaniu zużycia objętościowego (obliczonego jako zmiany parametru S_v podczas zużycia) próbek o różnym kształcie kieszeni olejowych, ale tym samym współczynniku pokrycia S , wykazano, że zużycie próbek z kieszeniami o kształcie kropli było wyższe w 60% przypadków niż zużycie próbek z kieszeniami o kształcie sferycznym, tak więc wpływ kształtu kieszeni olejowych na zużycie objętościowe pierścienia był niewielki – średnio wartość parametru S_v zmieniała się o 5.3 μm .

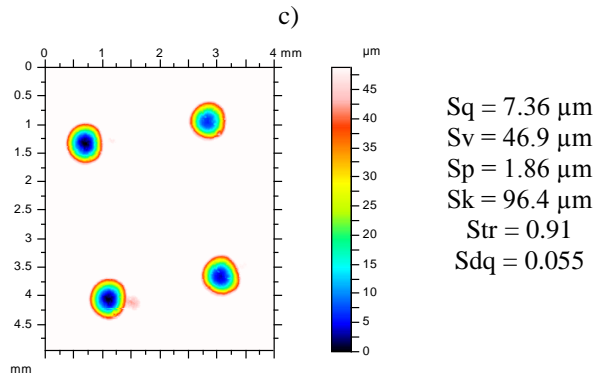
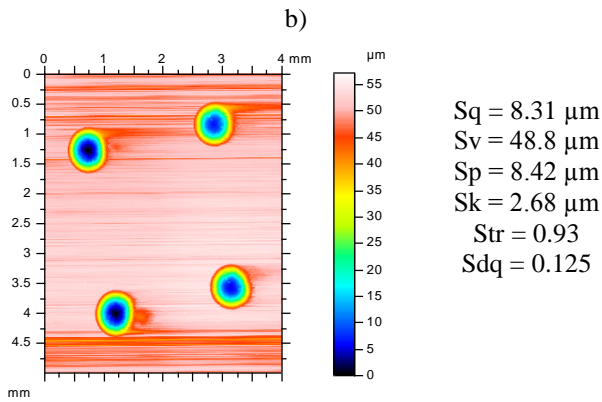
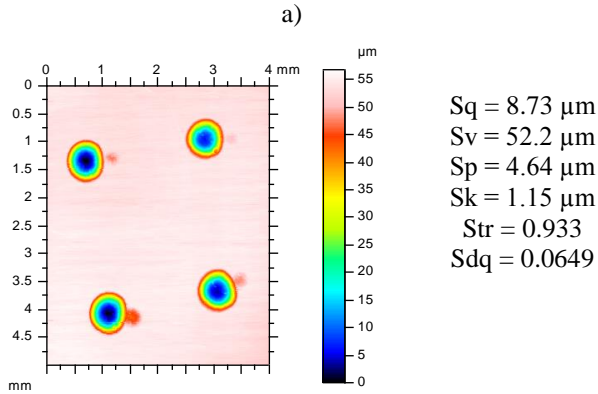
5.3.3. Modelowanie topografii powierzchni pierścienia

W pierwszej części tego podrozdziału porównano zastosowanie odcięcia wierzchołkowej części powierzchni z nakładaniem powierzchni o rozkładzie rzędnych Gaussa na powierzchnię obrabianą. W drugiej części badań zasymulowano działanie cząstek ściernych na powierzchnię pierścienia stalowego.

5.3.3.1. Odcinanie części wierzchołkowej

Na potrzeby modelowania zastosowano model prostego odcięcia części wierzchołkowej powierzchni pierścienia. Poziom odcięcia został określony w taki sposób, aby parametr S_v zmniejszał się o wartość 5.3 μm (średnia zmiana wartości tego parametru w trakcie zużycia). W celu sprawdzenia dopasowania topografii powierzchni mierzonej i symulowanej wykorzystano wybrane parametry opisujące powierzchnię pierścienia: S_p , S_v , S_q , S_k , S_dq oraz Str . Obliczono, że błąd graniczny dla parametru S_p wynosił 2.5 μm , dla S_v – 4.4 μm , S_q – 0.65 μm , S_k – 3.2 μm , S_dq – 0.025 μm oraz Str – 0.06 μm (dla poziomu ufności 0.95). Kryterium dopasowania uznano za satysfakcjonujące, jeśli różnice pomiędzy wartościami poszczególnych parametrów rzeczywistej i modelowanej powierzchni pierścienia były mniejsze niż wspomniane błędy graniczne.

Kryterium to nie zostało spełnione we wszystkich analizowanych przypadkach, gdyż modelowane wartości parametrów S_p i S_k znacznie różniły się od powierzchni rzeczywistej. Dopasowanie parametru S_q było prawidłowe w 60%, Str w 90%, natomiast S_dq w 60% wszystkich analizowanych przypadków. Poprawnie udało się uzyskać jedynie wartość parametru S_v powierzchni modelowanych (co jest zgodne z przypuszczeniami). Średnie absolutne wartości błędów względnych parametrów S_p , S_v , S_q , S_k , S_dq i Str były równe odpowiednio 70% (zakres 62 – 80%), 2.7% (zakres 0.1 – 4.9%), 7.2% (zakres 3.1 – 12.3%), 690% (zakres 171 – 1460%), 35.5% (zakres 8.1 – 61.2%) oraz 8.5% (zakres 1.3 – 36.1%).

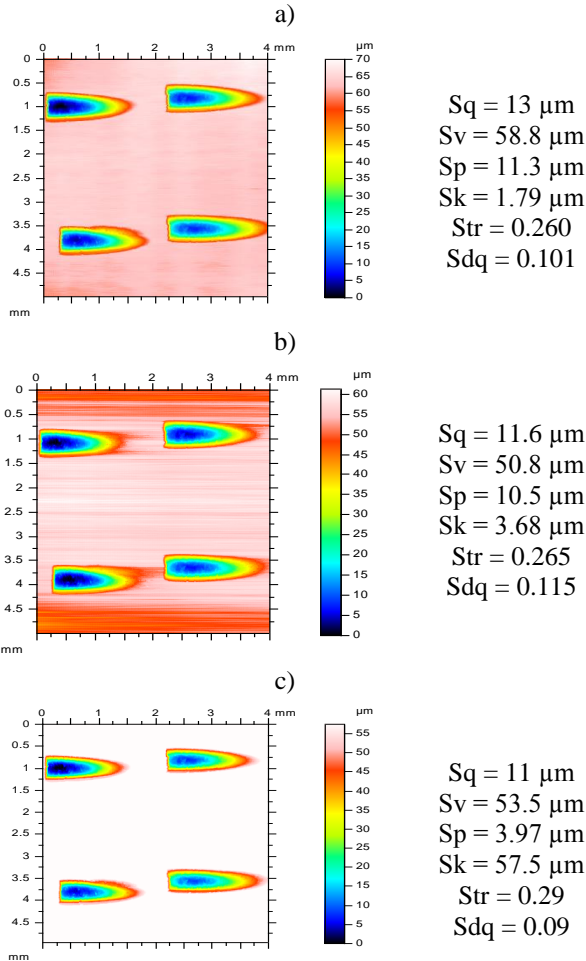


Rys. 5.8. Mapy konturowe powierzchni z kieszeniami sferycznymi ($S = 12.5\%$) przed zużyciem (a), po zużyciu (b) i po odcięciu części wierzchołkowej (c)

Jak można zauważyć, dokładność dopasowania w przypadku wykorzystania tego modelu jest dość niska. Tendencja zmiany parametrów potwierdziła się jedynie w przypadku parametrów: Sq , Sv (wartości tych parametrów zmalały

podczas symulacji) oraz S_k (tu nastąpił wzrost wartości parametru). Wartość parametru S_{dq} uległa zmniejszeniu na skutek obcięcia powierzchni, co jest zjawiskiem odwrotnym dla zmian tych parametrów, jakie uzyskano podczas przeprowadzonych badań odporności na zużycie ścierne.

Symulacja zużycia w przypadku modelu prostego odcięcia jest mocno uproszczona, ponieważ w rzeczywistości powierzchnia próbki podczas testu nie jest odcinana; generowana powierzchnia ma swoją własną charakterystykę rozkładu rzędnych, a cały system reprezentuje topografię przejściową. Rysunki 5.8. i 5.9. przedstawiają przykłady map konturowych topografii powierzchni pierścienia przed zużyciem, po zużyciu i po odcięciu (modelowane).



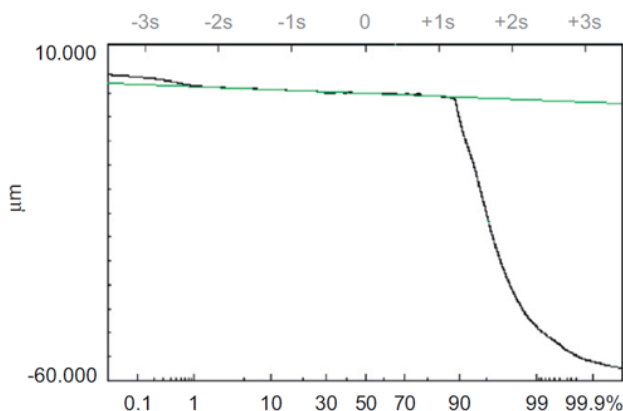
Rys. 5.9. Mapy konturowe powierzchni z kieszeniami o kształcie kropli ($S = 12.5\%$) przed zużyciem (a), po zużyciu (b) i po odcięciu części wierzchołkowej (c)

5.3.3.2. Nakładanie topografii powierzchni

Model odcięcia nie opisuje poprawnie struktury geometrycznej powierzchni zużytego pierścienia, ponieważ w trakcie rzeczywistego zużycia tworzona jest jednokierunkowa powierzchnia usytuowana równolegle do kierunku ruchu powierzchni. Można w niej wyróżnić dwa zakresy chropowatości: stosunkowo chropowata struktura dolin zawierająca kieszenie i względnie gładka struktura zawierająca wierzchołki (plateau).

Struktura dolin ma charakter zdeterminowany ze względu na to, że utworzona została poprzez wygniatanie, natomiast struktura plateau ma charakter losowy, tworzony podczas obróbki przez szlifowanie, a w trakcie pracy przez zużycie. Jej losowy charakter potwierdzono poprzez analizę fragmentów powierzchni niezawierającej kieszeni (obszary te cechowały się wykładniczym kształtem funkcji autokorelacji, typowym dla powierzchni losowych) oraz przez to, że wyższa część (plateau) obrobionej lub zużytej powierzchni pierścienia może być aproksymowana za pomocą linii prostej na wykresie przedstawiającym krzywą prawdopodobieństwa materiałowego w układzie laplaso-normalnym.

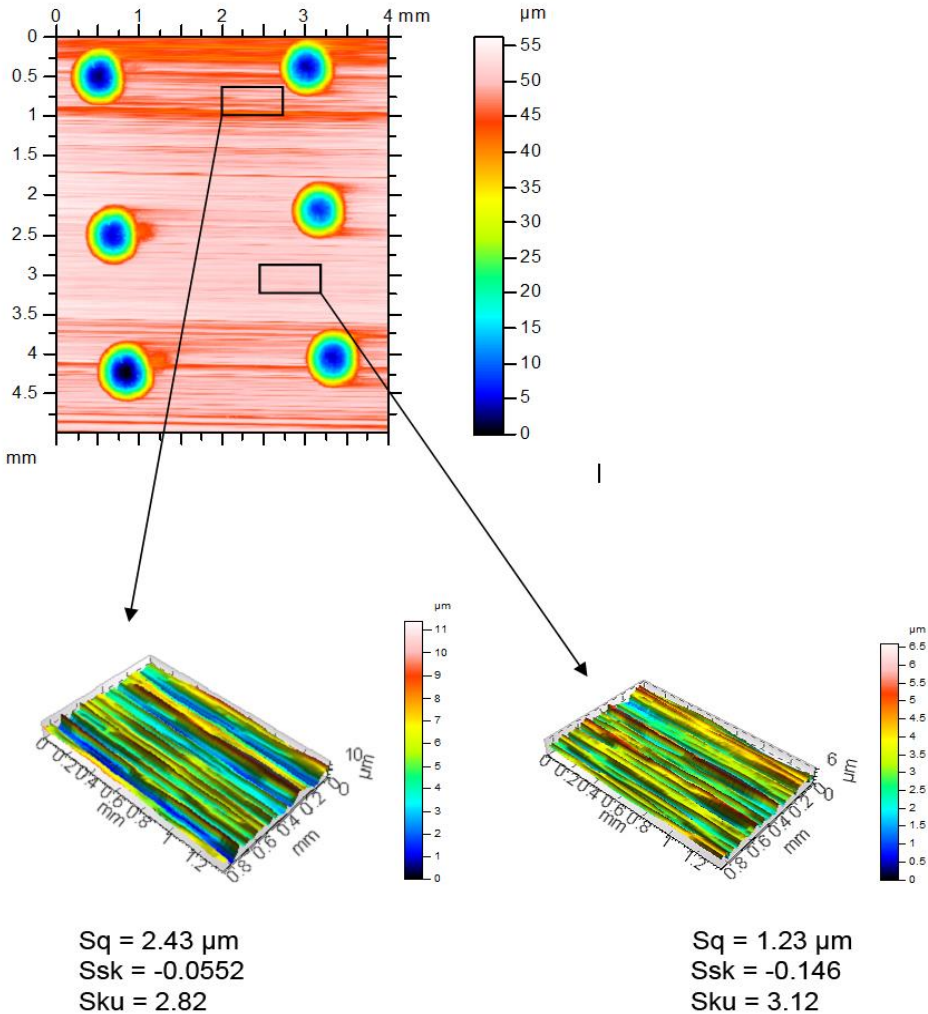
W przypadku powierzchni zużytego pierścienia na krzywej udziału materiałowego za pomocą linii prostej można przybliżyć tylko część zawierającą wierzchołki (rys. 5.10.). Ponadto, wartość parametru Ssk bliska 0 oraz wartość parametru Sku bliska 3 struktury geometrycznej powierzchni zużytej, wolnej od wgłębień, świadczy o tym, że gładka część powierzchni wykazuje Gaussowski rozkład rzędnych.



Rys. 5.10. Przykład wykresu udziału materiałowego topografii powierzchni zużytego pierścienia w układzie laplaso-normalnym

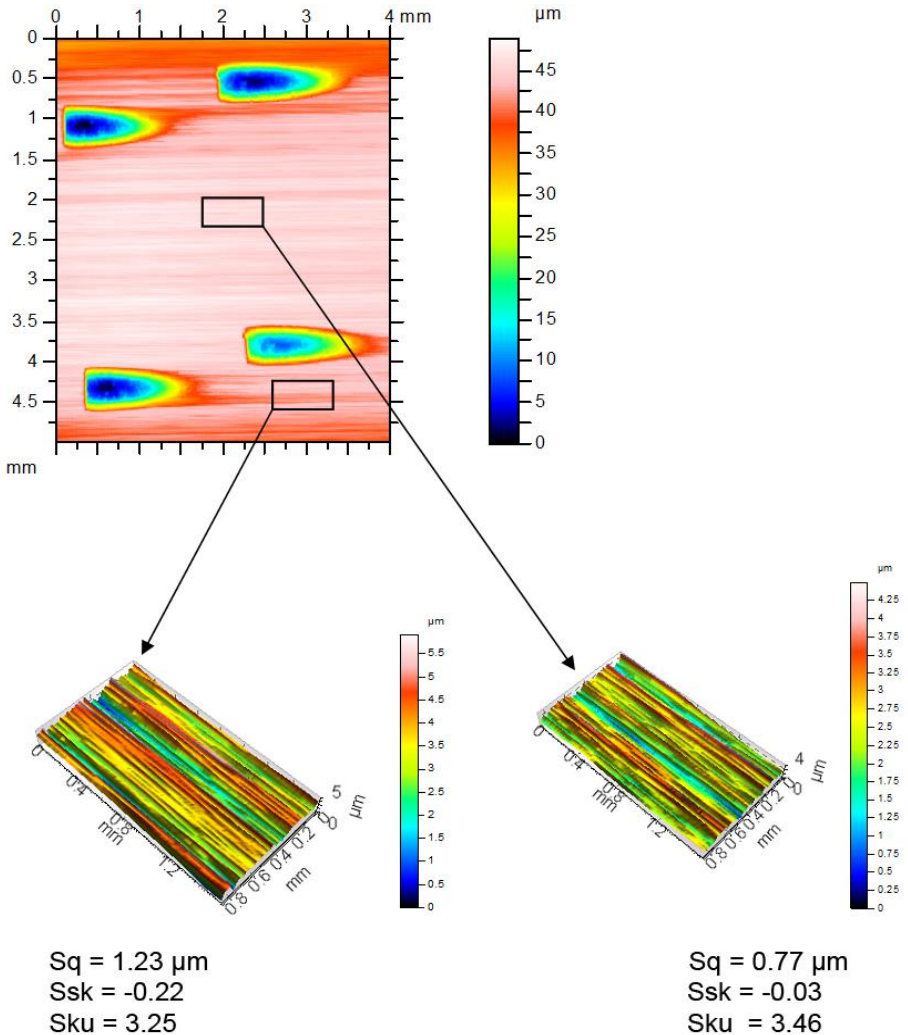
Można założyć, że wartość parametru Sq fragmentów powierzchni niezawierających kieszeni smarowych jest równa wartości parametru Spq zużytej powierzchni teksturowanej. Może ona być określona na podstawie analizy frag-

mentów powierzchni pomiędzy kieszeniami. Zauważono, że w tych fragmentach wysokość tekstury powierzchni po zużyciu jest wyższa niż po obróbce (szlifowaniu) przed zużyciem. Wartości parametrów Str i Sal charakteryzujące strukturę geometryczną powierzchni tworzoną podczas zużycia były mniejsze niż te uzyskane po szlifowaniu. Wartości parametrów hybrydowych wzrastały podczas zużycia. W wielu przypadkach wykazano, że wartość parametru Sq na obszarach bez kieszeni była wyższa w bliskim sąsiedztwie tych kieszeni niż w przypadku obszarów znajdujących się w znacznej odległości od nich (rys. 5.11. i 5.12.).



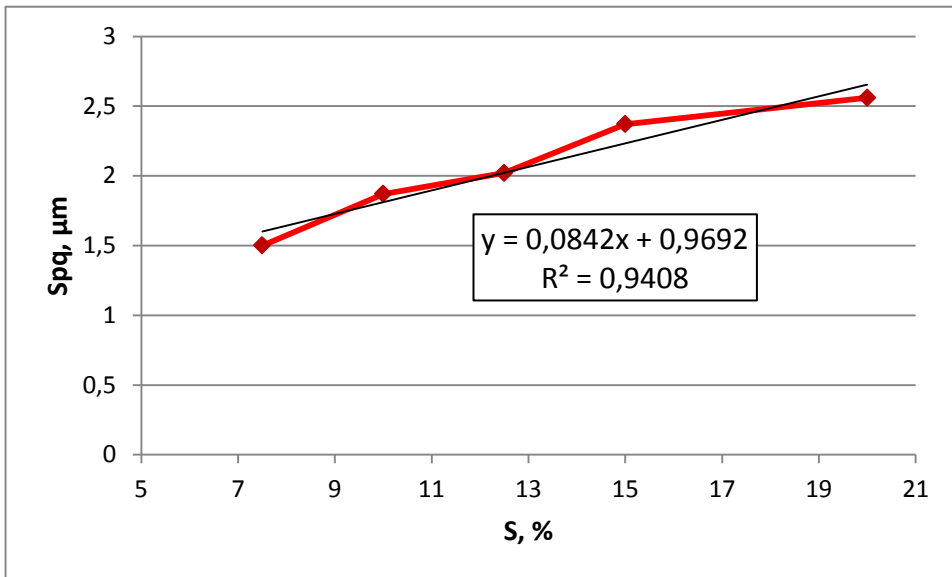
Rys. 5.11. Fragmenty topografii powierzchni po zużyciu pomiędzy kieszeniami o kształcie sferycznym ($S = 20\%$)

Wspomniane różnice w wartościach parametru S_q w zależności od badanego obszaru powierzchni powstałej na skutek zużycia potwierdziły analizy wykresu udziału materiałowego, na którym można zauważyć dwie linie proste opisujące część plateau (rys. 5.10.). Ta niejednorodność struktury geometrycznej powierzchni pomiędzy kieszeniami olejowymi może być spowodowana osadzeniem się wokół tych kieszeni cząstek powstałych na skutek ścierania współpracujących powierzchni (ze względu na to, że kieszenie smarowe są pułapkami na cząstki ściernie).



Rys. 5.12. Fragmenty topografii powierzchni po zużyciu pomiędzy kieszeniami o kształcie kropli ($S = 7.5\%$)

W związku z tym w badaniach obliczano średnią wartość parametru Sq dla obszarów pomiędzy kieszeniami, czyli parametru Spq zużytej teksturowanej powierzchni pierścienia. Wykazano, że parametr ten osiągał wartości większe w przypadku większego stopnia pokrycia powierzchni wgłębieniami (stosunku powierzchni zajmowanych przez kieszenie do pola zajmowanej powierzchni), co można argumentować zwiększeniem częstości występowania obszarów sąsiadujących z kieszeniami olejowymi, wynikającym z faktu większego zagęszczenia tych kieszeni. Rys. 5.13. przedstawia zależność średniej wartości parametru Spq od stopnia pokrycia powierzchni wgłębieniami S (dla obu kształtów kieszeni smarowych).



Rys. 5.13. Zależność pomiędzy stopniem pokrycia powierzchni wgłębieniami S a odchyleniem standardowym amplitudy zużytej powierzchni – Spq

Na podstawie przedstawionych obserwacji modelowano topografię zużytej powierzchni pierścienia poprzez nakładanie losowych anizotropowych (jedno-kierunkowych) topografii powierzchni o Gaussowskim rozkładzie rzędnych (wygenerowanych za pomocą metody opracowanej przez Wu [245]) na rzeczywistą powierzchnię pierścienia po obróbce. Nakładana topografia powierzchni definiowana była za pomocą trzech parametrów: odchylenia standardowego wysokości nierówności powierzchni – Sq (równego wartości parametru Spq uzyskanego przy pomocy prostej aproksymującej przedstawionej na rys. 5.13.), długości korelacji w kierunku zużycia oraz długości korelacji w kierunku do niego prostopadłym. Długości korelacji oszacowano na podstawie pomiaru sze-

ściu profili nierówności w dwóch prostopadłych kierunkach, a ich wartości wynosiły odpowiednio: 750 μm w kierunku zużycia oraz 25 μm w kierunku doń prostopadłym. Podobnie jak w modelu odcięcia przyjęto, że zużycie objętościowe jest równe zmianie wartości parametru S_v o 5.3 μm .

Podczas modelowania powierzchni po zużyciu, dla uzyskania zmian w wartości parametru S_v na poziomie 5.3 μm , w algorytmie zastosowano iteracyjną procedurę określania odległości pomiędzy średnimi płaszczyznami dwóch składowanych ze sobą topografii powierzchni (tzw. głębokość plateau P_d). Po wstępnym oszacowaniu głębokości plateau wygenerowana komputerowo losowa topografia powierzchni o Gaussowskim rozkładzie rzędnych została nałożona na zmierzoną powierzchnię po obróbce, po czym obliczono wartość parametru S_v uzyskanej powierzchni oraz określono wartość, o jaką się ona zmieniła, i przyrównano ją do wartości 5.3 μm . W kolejnym kroku, jeśli istniała taka potrzeba (tj. jeśli zmiana wartości parametru S_v była inna niż 5.3 μm), odległość pomiędzy średnimi płaszczyznami dwóch nakładanych topografii powierzchni ulegała zmianie i powierzchnie były nakładane ponownie. Procedurę tę powtarzano do momentu uzyskania poprawnej wartości zmiany dla parametru S_v (w granicach tolerancji).

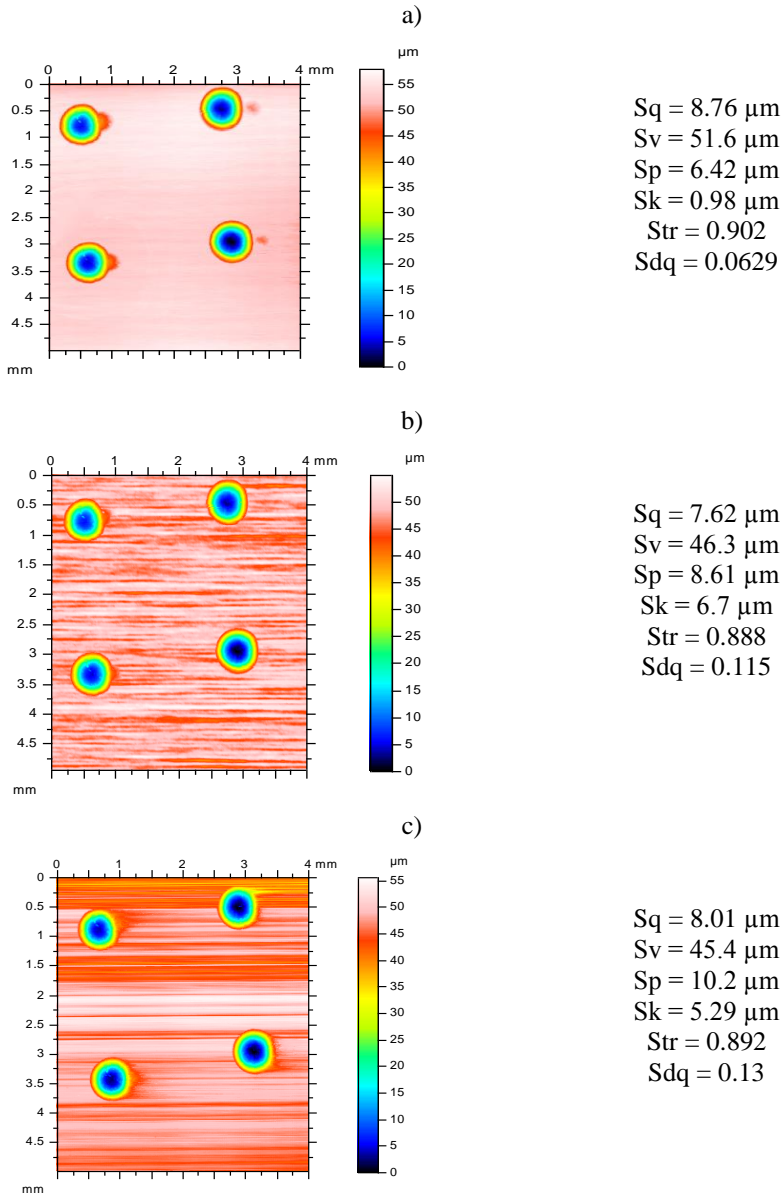
Metoda nakładania wykorzystuje następujące parametry: trzy parametry nakładanych powierzchni (odchylenie standardowe wysokości rzędnych S_q i dwie długości korelacji: w kierunku zużycia i prostopadłym do niego), a także odległość pomiędzy średnimi płaszczyznami nakładanych na siebie topografii powierzchni. Na wartość parametrów powierzchni uzyskanej podczas modelowania wpływały przede wszystkim wartości parametrów powierzchni nakładanej (wygenerowanej komputerowo), powierzchni nagniatanej (uzyskanej po obróbce) oraz głębokość plateau.

Podobnie jak w przypadku modelu odcięcia, kryteria dopasowania uznano za satysfakcjonujące wówczas, gdy różnice pomiędzy wartościami parametrów powierzchni modelowanej i zużytej były mniejsze niż błędy graniczne poszczególnych parametrów. Warunki te zostały spełnione w 90% analizowanych przypadków. Wartości parametrów S_{tr} , S_k , S_p , S_v i S_{dq} były poprawnie prognozowane w 100% przypadków, natomiast parametru S_q w 90% wszystkich przypadków (w jednym przypadku różnica wynosiła 0.8 μm). Średnia wartość błędów dla parametru S_q wynosiła 5.5%, parametru S_v – 2.91%, S_p – 10.14%, S_k – 13.89%, S_{tr} – 5.73% i S_{dq} – 11.14%.

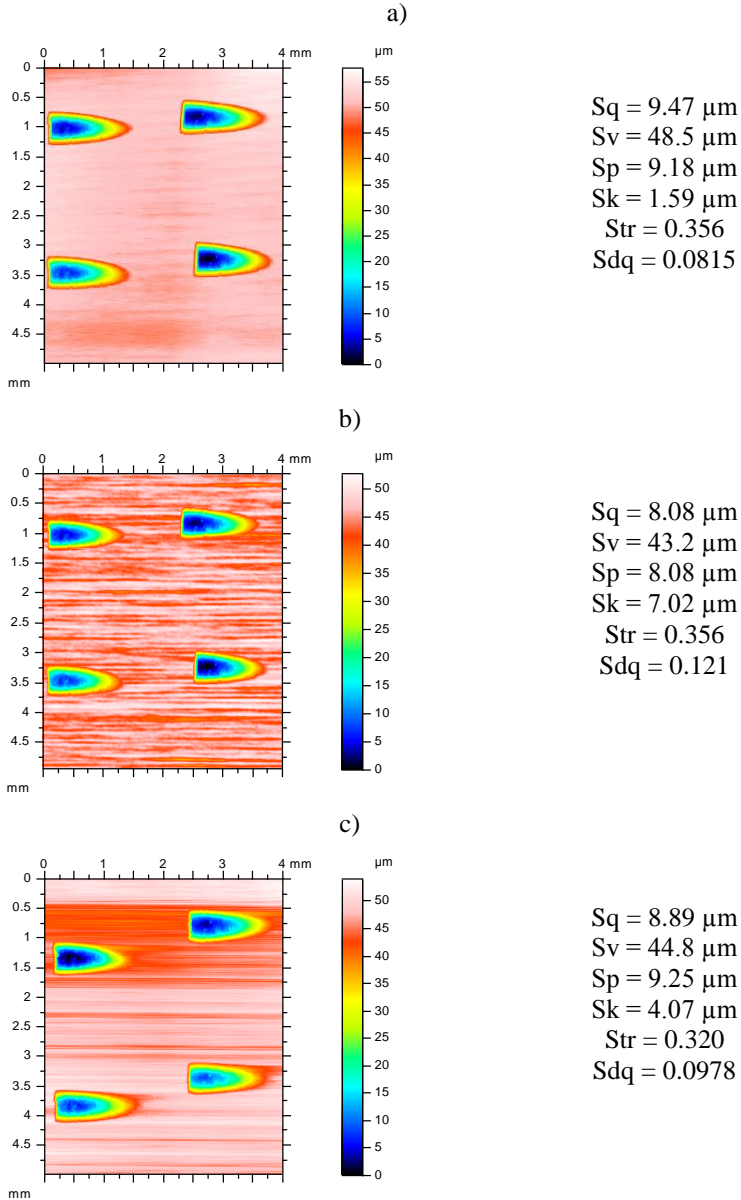
Po zastosowaniu modelu nakładania potwierdzono rzeczywiste tendencje do zmiany parametrów w trakcie zużycia. Wartość statystycznych parametrów wysokościowych S_q i S_v zmniejszyła się, natomiast wartość pochylenia S_{dq} uległa zwiększeniu.

Dokładność dopasowania dla modelowanej powierzchni była dobra, biorąc pod uwagę skomplikowany charakter topografii zużytej powierzchni pierścienia.

Rysunki 5.14. i 5.15. przedstawiają mapy konturowe powierzchni po obróbce, powierzchni modelowanej oraz topografii rzeczywistych powierzchni zużytych o różnym kształcie kieszeni.



Rys. 5.14. Topografia powierzchni z kieszeniami o kształcie sferycznym ($S = 15\%$) przed zużyciem (a), modelowana z użyciem metody nakładania powierzchni (b) i po zużyciu (c)



Rys. 5.15. Topografia powierzchni z kieszeniami o kształcie kropli ($S = 15\%$) przed zużyciem (a), modelowana z użyciem metody nakładania powierzchni (b) i po zużyciu (c)

Badania wykonano w celu znalezienia miary zużycia pierścienia. Jedną z metod określenia wielkości zużycia jest obserwacja zmian w wartościach parametrów struktury geometrycznej powierzchni, ale w celu oceny zużycia

wykorzystuje się również inne metody. Jedną z nich polega na analizie zmian głębokości dolin Δd topografii powierzchni. Dno dolin może służyć jako wartość odniesienia ze względu na swoją niezmienność podczas zużycia. Biorąc pod uwagę fakt, że intensywność zużycia była różna dla różnych obszarów powierzchni pierścienia, zmierzono oraz uśredniono wartości zmian głębokości wszystkich widocznych dolin. Średnia wartość błędu granicznego Δd wynosiła $0.65 \mu\text{m}$. W prognozowaniu liniowego zużycia pierścienia wykorzystano tylko model nakładania, a uzyskane wyniki dla zużycia liniowego powierzchni zmierzonej i modelowanej przedstawiono w tabeli 5.1.

Jak widać, zużycie liniowe pierścienia dla powierzchni modelowanych było w 90% przypadków dobrze dopasowane do zużycia dla powierzchni zmierzonych. W przypadku, w którym kryterium to nie było spełnione, różnica pomiędzy zużyciem rzeczywistym i modelowanym – Δd wynosiła $0.8 \mu\text{m}$, można więc stwierdzić, że dokładność dopasowania była dobra.

Tabela 5.1. Rzeczywiste i modelowane średnie zużycie teksturowanej próbki – Δd

Stopień pokrycia powierzchni wgłębieniami	Zużycie teksturowanych powierzchni o różnym kształcie kieszeni olejowych Δd , μm			
	Kształt sferyczny		Kształt kropli	
	Powierzchnia rzeczywista	Powierzchnia modelowana	Powierzchnia rzeczywista	Powierzchnia modelowana
S = 7.5%	3.92	4.32	5.57	6.07
S = 10%	5.86	5.92	6.48	6.39
S = 12.5%	3.57	4.12	6.13	6.23
S = 15%	4.43	5.23	5.95	6.55
S = 20%	4.08	3.76	6.04	6.64

Przedstawione wyniki obrazują, dlaczego zużycie liniowe próbek z kieszeniami olejowymi o kształcie sferycznym było mniejsze niż próbek z kieszeniami o kształcie kropli. Należy pamiętać, że w algorytmie modelu spadek wartości parametru S_v był jednakowy we wszystkich analizowanych przypadkach ($5.3 \mu\text{m}$). Zaobserwowana wcześniej tendencja została potwierdzona – modelowana wartość zużycia liniowego próbek z kieszeniami o kształcie sferycznym była mniejsza niż w przypadku próbek z kieszeniami o kształcie kropli. Dlatego też można założyć, że zarówno w przypadku powierzchni modelowanych, jak i rzeczywistych różnica w zużyciu liniowym próbek o różnym kształcie kieszeni olejowych wynikała z tych różnic kształtu.

5.3.3.3. Modelowanie działania ziaren ściernych

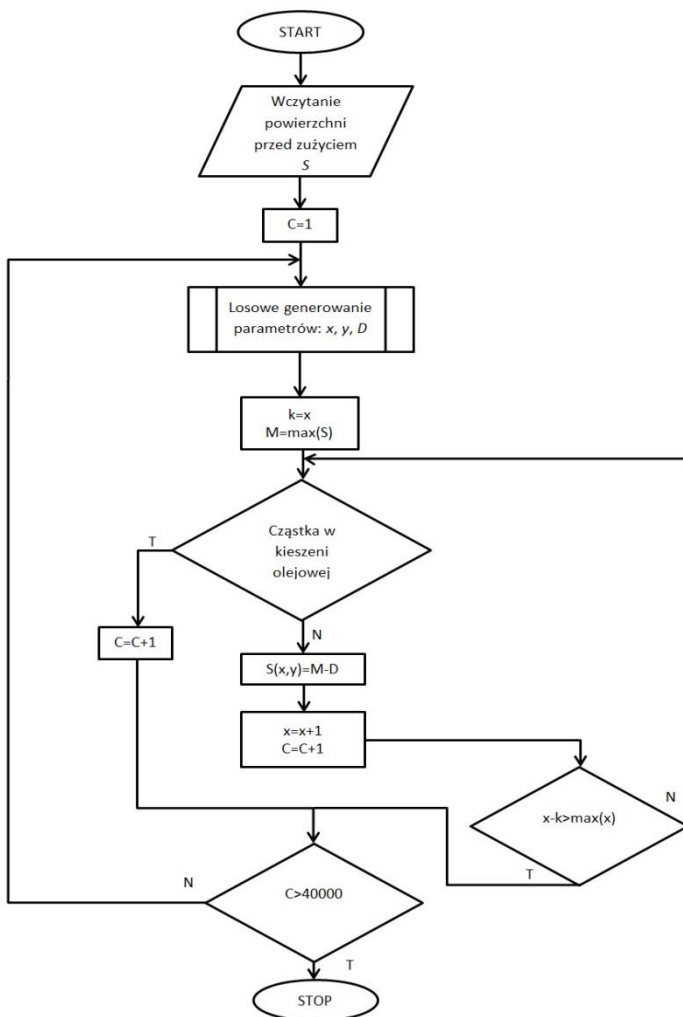
Na potrzeby symulacji procesu ścierania w obecności trzech ciał opracowano model numeryczny. Ograniczono go tylko do samego mikroskrawania powierzchni pierścienia bez przemieszczenia materiału, ponieważ twardość części ściernych była dużo większa niż twardość próbki stalowej. W rozważaniach

brano pod uwagę względy geometryczne bez analizy danych materiałowych. Założono, że cząstki ściernie o kształcie kulistym przetaczały się pomiędzy dwiema kontaktującymi się powierzchniami, tworząc rysy na powierzchni pierścienia. Przeprowadzono numeryczne ścieranie poprzez sukcesywne wykonywanie rys na powierzchni pierścienia przez pojedyncze cząstki ściernie. Pod uwagę brane były jedynie zmiany powierzchni pierścienia. Badania doświadczalne przeprowadzono w warunkach smarowania mieszanego, dlatego w modelu występował styk pomiędzy płaską powierzchnią przeciwpróbki (klocka) a najwyższymi wierzchołkami chropowatej powierzchni pierścienia. Założono, że kieszenie olejowe mogły gromadzić ścierniwo. W sytuacji, gdy cząstka ścierna napotykała kieszeń smarową (odległość pionowa pomiędzy cząstką i powierzchnią bloku była znaczna), kończyło się zużycie poprzez usuwanie materiału z próbki pierścienia. Średnica cząstki jest parametrem zmiennym. Liczbę cząstek ściernych usuwających materiał z powierzchni pierścienia uzyskano ze składu granulometrycznego pyłu kwarcowego (tabela 5.2.). Był to pył występujący na drogach Polski.

Tabela 5.2. Skład granulometryczny pyłu kwarcowego

Zakres wymiaru ziarna, μm	Udział masowy, %	Udział ilościowy, %
0–2	15	97.105
2–5	13	2.53
5–10	16	0.307
10–20	21	0.05
20–40	23	0.007
> 40	12	0.001

Założono, że cząstka ścierna jest kulką o średnicy D będącej średnią wartością zakresu wymiaru ziaren. Dla końcowej wartości zakresu z tabeli 5.2. wartość D wynosiła $50 \mu\text{m}$. Przed każdym cyklem skrawania powierzchni pierścienia wykorzystywano generator liczb losowych (1) w celu ustalenia początkowej pozycji cząstki ścierniej w kierunku ruchu (x) z wykorzystaniem rozkładu jednostajnego oraz (2) do wybrania pozycji cząstki prostopadle do kierunku skrawania powierzchni (y), również z wykorzystaniem rozkładu jednostajnego. Po każdym cyklu mikroskrawania wyznaczana była struktura geometryczna uzyskanej powierzchni, którą następnie zapisywano w pamięci. Na podstawie początkowych badań numerycznych wykonanych dla jednej powierzchni obliczono liczbę zdarzeń, dla których wartość zużycia objętościowego (zmiany wartości parametru S_v) była zbliżona do wartości zużycia powierzchni rzeczywistej. Dlatego też każda symulacja przerywana była po 40 000 zdarzeń. Rys. 5.16. przedstawia uproszczony algorytm symulacji. M jest rzędną najwyższego punktu powierzchni pierścienia, natomiast C jest liczbą cykli skrawania powierzchni pierścienia.

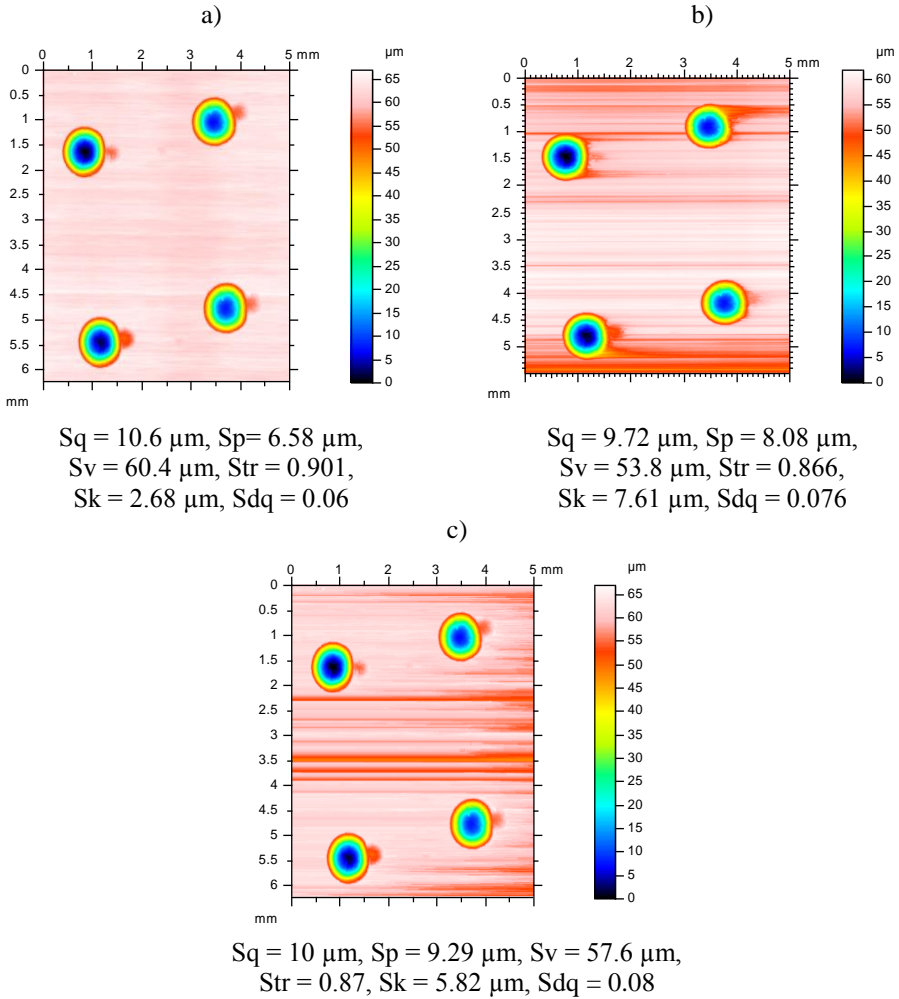


Rys. 5.16. Uproszczony algorytm symulacji działania ziaren ściernych

5.3.3.4. Wyniki modelowania

Do oceny poprawności dopasowania zmierzonej i symulowanej topografii powierzchni teksturowanego pierścienia wykorzystano parametry: S_p , S_v , S_q , S_k , S_dq i S_{tr} . Podobnie jak w pozostałych przypadkach analizowanych w rozdziale piątym, kryterium dopasowania uznano za satysfakcjonujące, gdy różnice pomiędzy wartościami parametrów zmierzonej i modelowanej topografii powierzchni pierścienia były mniejsze niż błędy graniczne dla poszczególnych parametrów. Kryterium to zostało spełnione w 80% analizowanych przypadków. Parametry S_k , S_q oraz S_v zostały poprawnie zaprognozowane w 100% przypadków, parametry

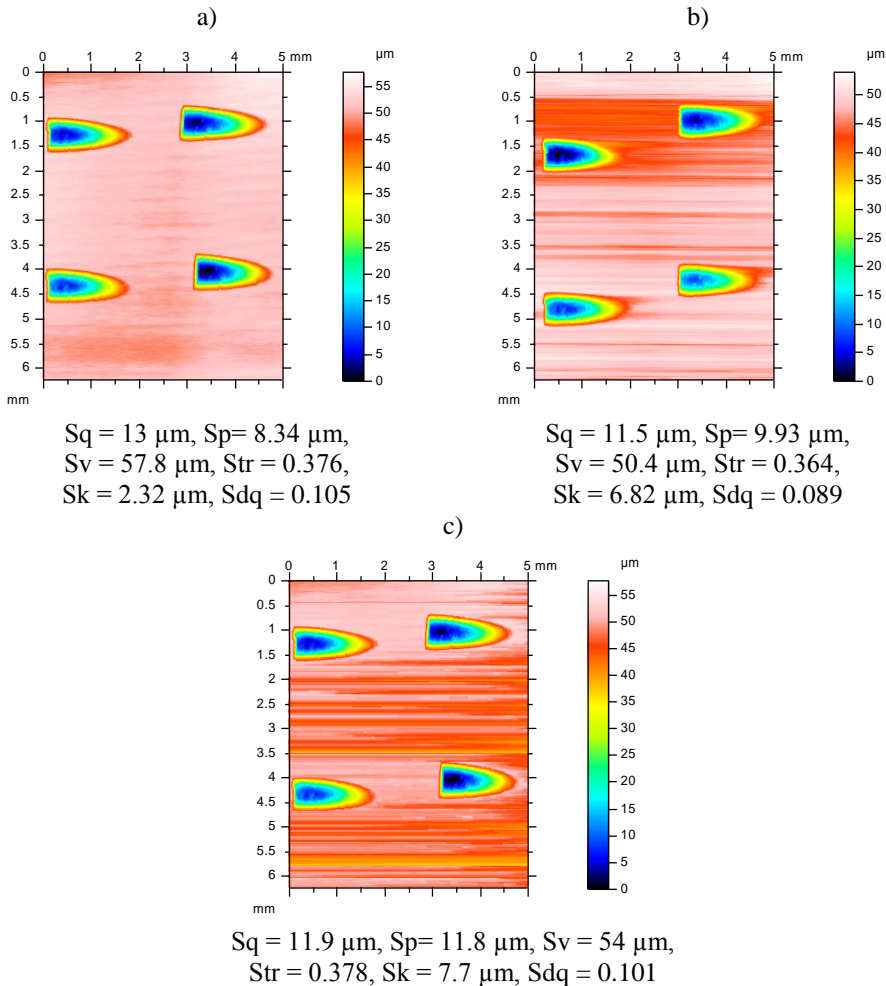
Str oraz *Sdq* w 90%, natomiast parametr *Sp* w 80% analizowanych przypadków. Średnie wartości różnic dla poszczególnych parametrów wynosiły: *Sq* – 4.4%, *Sv* – 4.6%, *Sp* – 19.1%, *Sk* – 17.2%, *Str* – 4.51%, a dla *Sdq* – 10.6%.



Rys. 5.17. Powierzchnia pierścienia z kieszeniami o kształcie sferycznym ($S = 10\%$) przed zużyciem (a), po zużyciu (b) oraz modelowana komputerowo powierzchnia po zużyciu (c)

Potwierdzono tendencje zmiany parametrów podczas zużycia, kiedy wartości statystycznych parametrów wysokościowych Sq i Sv malały, natomiast głębokość rdzenia Sk wzrastała. Dokładność dopasowania była stosunkowo dobra. Rysunki 5.17. i 5.18. przedstawiają mapy konturowe stereometrii pierścienia o różnych kształtach kieszeni – po obróbce, po zużyciu oraz po modelowaniu

zużycia. Choć symulacja ścierania zapewniła nieco gorsze wyniki od nakładania powierzchni losowej na powierzchnię obrabianą, kształt modelowanej powierzchni zużytej był bardziej podobny do powierzchni zmierzonej po zastosowaniu symulacji działania cząstek ściernych.



Rys. 5.18. Powierzchnia pierścienia z kieszeniami o kształcie kropli ($S = 10\%$) przed zużyciem (a), po zużyciu (b) oraz modelowana komputerowo powierzchnia po zużyciu (c)

5.4. Wnioski

Metoda modelowania struktury geometrycznej powierzchni tworzonych podczas zużycia poprzez nakładanie losowej topografii powierzchni (o normalnym rozkładzie rzędnych) na honowaną topografię powierzchni tulei cylindra

zapewniła dobre wyniki modelowania procesu zużycia nieprzekraczającego początkowej wysokości nierówności. Możliwe jest prognozowanie struktury geometrycznej powierzchni zużytej tulei cylindra, jeśli znana jest wartość parametru S_k powierzchni zużytej. Model opiera się na proporcjonalności odchylenia standardowego wysokości części wierzchołkowej powierzchni zużytego cylindra do wysokości chropowatości rdzenia. Kryteria dopasowania zostały spełnione w 91% analizowanych przypadków.

Sposób ten (nakładanie powierzchni) zastosowano z powodzeniem do modelowania zużycia zerowego. Przeprowadzone badania wykazały, że dopasowanie parametrów otrzymanej powierzchni modelowanej i rzeczywistej było zgodne w 90% analizowanych przypadków. Model był zdeterminowany przez dwie zależności. Jedną z nich była stała wartość zużycia objętościowego próbek pierścienia określona jako zmiana wartości parametru S_v podczas zużycia. Drugą była proporcjonalność odchylenia standardowego wysokości obszaru zawierającego wierzchołki (parametru S_{pq}) topografii powierzchni zużytej do stopnia pokrycia powierzchni obrabianej wgłębieniami. Zastosowanie modelu nakładania potwierdziło rzeczywiste tendencje do zmiany parametrów podczas zużycia oraz umożliwiło uzyskanie znacznie lepszych wyników dopasowania wartości analizowanych parametrów niż w przypadku modelu prostego odcięcia.

Proponowany model został wykorzystany również do prognozowania zużycia liniowego stalowych pierścieni. Kryteria dopasowania podczas modelowania liniowego zużycia pierścienia zostały spełnione w 90% analizowanych przypadków. Modelowanie zużycia, zakładające to samo zużycie objętościowe, potwierdza, że zróżnicowany kształt topografii powierzchni teksturowanej po obróbce skutkuje mniejszym liniowym zużyciem próbek ze sferycznymi kieszeniami olejowymi niż w przypadku próbek z kieszeniami o kształcie kropli.

Model symulujący skrawanie powierzchni stalowego pierścienia przez cząstki pyłu kwarcowego zapewnił spełnienie kryteriów dopasowania wartości parametrów zużytej powierzchni mierzonej i modelowanej w 80% analizowanych przypadków. Podczas symulacji topografii powierzchni tulei cylindra oraz pierścienia w procesie zużycia zerowego dokładność dopasowania była porównywalnie dobra, biorąc pod uwagę skomplikowany charakter struktury geometrycznej powierzchni próbki po zużyciu. W przypadku symulacji działania cząstek ściernych potwierdzona została również rzeczywista tendencja zmiany parametrów w trakcie zużycia.

6. Podsumowanie

Zastosowanie modelowania struktury geometrycznej powierzchni uwzględniającego warunki ich wytwarzania umożliwia prognozowanie topografii powierzchni w zależności od warunków obróbki ścierniej. Umożliwia ono analizę cech geometrycznych powierzchni bez konieczności często trudnego, czasochłonnego i kosztownego ich wytwarzania. Może uwzględniać wpływ wielu parametrów procesu obróbkowego. Modelowanie powierzchni po obróbce skrawaniem, oparte zazwyczaj na odwzorowaniu geometrii ostrza na przedmiocie obrabianym, jest łatwiejsze od modelowania powierzchni po obróbce ścierniej, wymagającego często korzystania z generatorów liczb losowych. Szczególnie trudne jest modelowanie wpływu parametrów procesu honowania płaskowierzchołkowego na strukturę geometryczną powierzchni cylindrów. Przyczynami są zarówno dwuprosowy charakter SGP cylindrów, jak również istnienie struktury skrzyżowanej.

Modelowanie topografii powierzchni zużytej w zależności od parametrów badań tarcia i zużycia ma istotne znaczenie praktyczne. Pozwala na zmniejszenie kosztów i czasu żmudnych badań tribologicznych. Modelowanie powinno przyczynić się do wyjaśnienia zjawisk zachodzących w węźle ciernym, uwzględniając dominujący mechanizm zużycia.

Tarcie może oddziaływać destrukcyjnie na powierzchnie cierne. Wpływa na zużywanie się elementów współpracujących oraz na wzrost temperatury w węźle ślizgowym. Jednym z rozwiązań wpływających korzystnie na współpracę elementów w kontakcie jest wykonywanie wgłębień zwykle na jednej ze współpracujących powierzchni. Wgłębienia te gromadzą smar i produkty zużycia, mogą być również źródłem dodatkowej siły hydrodynamicznego unoszenia wpływającej na zmniejszenie oporów tarcia. Szczególnie korzystne jest modelowanie struktury geometrycznej powierzchni teksturowanych.

Przeprowadzono badania doświadczalne procesu honowania płaskowierzchołkowego tulei cylindrowych stosowanych do silników samochodowych o zapłonie samoczynnym. Zastosowano oselki ceramiczne i oselki z warstwą diamentową. W monografii przedstawiono autorską metodę modelowania stereometrii powierzchni cylindrów podczas procesu honowania płaskowierzchołkowego. Opierało się ono na wgłębianiu się obróconej powierzchni jednokierunkowej w nowo powstałą powierzchnię modelowaną, w przypadku honowania ostatecznego na wysokość odpowiadającą tej samej wartości udziału materiałowego. Liczba cykli była wówczas proporcjonalna do czasu honowania ostatecznego. Modelowanie SGP tulei cylindrowych po honowaniu wykończeniowym w większości analizowanych przypadków zapewniło znaczne podobieństwo wartości parametrów powierzchni modelowanych i zmierzonych. Podobne wy-

niki osiągnięto dla powierzchni po honowaniu ostatecznym ośłkami ceramicznymi, natomiast w przypadku honowania ośłkami z warstwą diamentową – dla najkrótszego oraz średniego czasu obróbki. W przypadku najdłuższego czasu obróbki modelowane powierzchnie po honowaniu ośłkami z warstwą diamentową charakteryzowały się mniejszymi wartościami parametrów amplitudowych w porównaniu z powierzchniami zmierzonymi – otrzymaną rozbieżność można wytłumaczyć pogorszeniem zdolności ośłek do usuwania materiału w trakcie honowania ostatecznego. Modelowanie zapewniło poprawniejsze wyniki w odniesieniu do parametrów z grupy Sq w porównaniu do parametrów z grupy Sk . Eliminacja pojedynczych wierzchołków (szpilek) i dolin pozwala na poprawę dokładności przybliżenia parametrów opisujących maksymalną wysokość nierówności powierzchni modelowanych oraz współczynnika skośności i kurtozy do odpowiednich parametrów powierzchni zmierzonych. Tendencje zmian ukształtowanych powierzchni modelowanych były podobne do zaobserwowanych w odniesieniu do powierzchni zmierzonych.

Modelowano również strukturę powierzchni teksturowanych. Były to powierzchnie tulei cylindrowej po badaniach tribologicznych w ruchu posuwisto-zwrotnym oraz powierzchnie pierścienia z wygniatanymi kieszeniami smarowymi współpracującego z żeliwnym klockiem w warunkach sztucznie zwiększonego zapylenia. W modelowaniu obu typów powierzchni wykorzystano metodę nakładania powierzchni losowej jednokierunkowej o normalnym rozkładzie rzędnych na powierzchnię obrabianą. W odniesieniu do pierścienia zastosowano dodatkowo symulację oddziaływania cząstek ściernych oraz odcinanie części wierzchołkowej powierzchni.

Modelowanie SGP cylindra opiera się na proporcjonalności odchylenia standardowego wysokości części wierzchołkowej powierzchni zużytego cylindra do wysokości chropowatości rdzenia. Kryteria dopasowania zostały spełnione w 91% analizowanych przypadków. Dokładność dopasowania parametrów należy uznać za dobrą, biorąc pod uwagę skomplikowany charakter stereometrii struktury geometrycznej powierzchni tulei cylindra po procesie zużycia. Modelowanie potwierdziło rzeczywistą tendencję zmian parametrów stereometrii powierzchni podczas zużycia.

Modelowanie nierówności powierzchni pierścienia stalowego za pomocą nakładania powierzchni było zdeterminowane przez proporcjonalność odchylenia standardowego wysokości obszaru zawierającego wierzchołki topografii powierzchni zużytej do stopnia pokrycia powierzchni obrabianej wgłębieniami oraz przyjęcie stałej wartości zużycia objętościowego. Warunki dopasowania wybranych parametrów topografii powierzchni zostały spełnione w 90% analizowanych przypadków. Modelowanie potwierdziło rzeczywiste tendencje zmian parametrów SGP w trakcie zużycia – wartości statystycznych parametrów wysokościowych Sq i Sv zmniejszyły się, natomiast pochylenie średniokwadratowe

Sdq zwiększyło się. Zastosowanie modelu nakładania umożliwiło uzyskanie znacznie lepszych wyników dopasowania wartości analizowanych parametrów stereometrii powierzchni niż odcinanie części wierzchołkowej powierzchni. Model nakładania powierzchni został zastosowany również do prognozowania zużycia liniowego stalowych pierścieni.

Przeprowadzono także symulowanie mikroskrawania powierzchni pierścienia przez cząstki pyłu kwarcowego. Modelowano wykonywanie rys na powierzchni pierścienia przez pojedyncze cząstki ściernie. Gdy cząstka ścierna napotykała kieszeń smarową, kończyło się zużycie ściernie pierścienia. Model symulujący działanie cząstek ściernych na powierzchnię pierścienia zapewnił spełnienie kryteriów dopasowania w 80% analizowanych przypadków. Kształt modelowanej powierzchni zużytej był podobny do kształtu powierzchni zmierzanej, potwierdzona została również rzeczywista tendencja zmiany parametrów SGP w trakcie zużycia.

Kontynuacja prac z tego zakresu powinna obejmować modelowanie SGP po trzech i więcej procesach, uwzględnienie w modelowaniu analizy styku powierzchni chropowatych oraz modelowanie topografii powierzchni tworzonych za pomocą wytwarzania przyrostowego.

Literatura

1. Acayaba G.M.A., Munoz de Escalona P.: *Prediction of surface roughness in low speed turning of AISI316 austenitic stainless steel*. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, 11, 2015, 62–67.
2. Adamczak S.: *Pomiary geometryczne powierzchni*. WNT, Warszawa 2009
3. Agarwal S., Rao P.V.: *Modeling and prediction of surface roughness in ceramic grinding*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 50(12), 2010, 1065–1076.
4. Agrawal A., Goel S. Rashid W.B., Price M.: *Prediction of surface roughness during hard turning of AISI 4340 steel(69 HRC)*. Applied Soft Computing, 30, 2015, 279–286.
5. Amanov A., Cho I.S., Pyoun Y.S., Lee C.S., Park I.G.: *Micro-dimpled surface by ultrasonic nanocrystal surface modification and its tribological effects*. Wear, 286–287, 2012, 136–144.
6. Ancio F., Gámez A.J., Marcos M.: *Factors influencing the generation of a machined surface. Application to turned pieces*. Journal of Materials Processing Technology, 215, 2015, 50–61.
7. Anderberg C., Pawlus P., Rosén B.G., Thomas T.R.: *Alternative descriptions of roughness for cylinder liner production*. Journal of Materials Processing Technology, 209(4), 2009, 1936–1942.
8. Aslan D., Budak E.: *Surface roughness and thermo-mechanical force modeling for grinding operations with regular and circumferentially grooved wheels*. Journal of Materials Processing Technology, 223, 2015, 75–90.
9. Bagherifard S., Ghelichi R., Guagliano M.: *Numerical and experimental analysis of surface roughness generated by shot peening*. Applied Surface Science, 258(18), 2012, 6831–6840.
10. Bakolas V.: *Numerical generation of arbitrary oriented non-Gaussian three-dimensional rough surfaces*. Wear, 254(5–6), 2003, 546–554.
11. Bałasz B., Kacalak W., Królikowski T., Szatkiewicz T.: *Wybrane problemy modelowania i symulacji procesów wygładzania powierzchni*. W: *Technologie informacyjne, Narzędzia i zastosowania*, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Gorzowie Wielkopolskim, 2012, 101–116.
12. Bazan A.: *Model topografii czynnej powierzchni ściernicy z cBN uwzględniający jej zużycie*. Praca doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, 2018.
13. Bernardos P.G., Vosniakos G.-C.: *Predicting surface roughness in machining: a review*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 43(8), 2003, 833–844.
14. Bernardos P.G., Vosniakos G.C.: *Prediction of surface roughness in CNC face milling using neural networks and Taguchi's design of experiments*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 18(5–6), 2002, 343–354.
15. Biboulet N., Bouassida H., Lubrecht A.A.: *Cross hatched texture influence on the load carrying capacity of oil control rings*. Tribology International, 82(A), 2015, 12–19.
16. Blatter A., Maillat M., Pimenov S.M., Shafeev G.A., Simakin A.V., Loubnin E. N.: *Lubricated sliding performance of laser-patterned sapphire*. Wear, 232(2), 1999, 226–230.
17. Blunt L., Ebdon S.: *The application of three-dimensional surface measurement techniques to characterizing grinding wheel topography*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 36(11), 1996, 1207–1226.
18. Bolander N.W., Sadeghi H.: *Deterministic modeling of honed cylinder liner friction*. Tribology Transactions, 50(2), 2007, 248–256.
19. Boryczko A.: *Measurement of relative tool displacement to the workpiece for the assessment of influences of machining errors on surface profiles*. Measurement, 31(2), 2002, 93–105.
20. Boryczko A.: *Nierówności powierzchni z odwzorowania zarysu narzędzia jednoostrzowego z zakłóceniami obróbkowymi*. Konferencja naukowo-techniczna „Metrologia w Technikach Wytwarzania Maszyn”, Częstochowa, 2001, 215–224.

21. Bouassida H., Biboulet N., Sainsot P., Lubrecht A.A.: *Piston ring load carrying capacity: influence of cross-hatching parameters*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 228(6), 2014, 642–648.
22. Box G.E.P., Jenkins G.M.: *Analiza szeregów czasowych. Prognozowanie i sterowanie*. PWN, Warszawa, 1983.
23. Buj-Corral I., Vivancos-Calvet J., Coba-Salcedo M.: *Modelling of surface finish and material removal rate in rough honing*. Precision Engineering, 38(1), 2014, 100–108.
24. Campbell J.C.: *Cylinder bore surface roughness in internal combustion engines: Its appreciation and control*. Wear, 19(2), 1972, 163–168.
25. Chang W.R., Etsion I., Bogy D.B.: *An elastic-plastic model for the contact of rough surfaces*. Journal of Tribology – Transactions of the ASME, 109(2), 1987, 257–263.
26. Chen W., Xie W., Huo D., Yang K.: *A novel 3D surface generation model for micro milling based on homogeneous matrix transformation and dynamic regenerative effect*. International Journal of Mechanical Sciences, 144, 2018, 146–157.
27. Chen X., Rowe B.: *Analysis and simulation of the grinding process. Part I: Generation of the grinding wheel surface*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 36(8), 1996, 871–892.
28. Cieloszyk J.: *Ocena powierzchni wirtualnej jako narzędzie wyboru warunków pomiaru i parametrów struktury geometrycznej powierzchni*. Konferencja Naukowo-Techniczna Metrologia w Technikach Wytwarzania, Gliwice, Piekary Śląskie, 2018, 119–128.
29. Cieślak T.: *Wpływ wybranych parametrów procesu gładzenia na strukturę geometryczną powierzchni cylindrów*. Rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, 2009.
30. Codgell J.D.: *A convolved multi-Gaussian probability distribution for surface topography application*. Precision Engineering, 32(1), 2008, 34–46.
31. Conradi M., Drnovšek A., Gregorič P.: *Wettability and friction control of a stainless steel surface by combining nanosecond laser texturing and adsorption of superhydrophobic nanosilica particles*. Scientific Reports, 8, 2018, 7457.
32. Costes J.-P.: *A predictive surface profile model for turning based on spectral analysis*. Journal of Materials Processing Technology, 213(1), 2013, 94–100.
33. Decenciere E., Jeulin D.: *Morphological decomposition of the surface topography of an internal combustion engine cylinder to characterize wear*. Wear 249(4–5), 2001, 482–488.
34. Denkena B., Böß V., Nesper D., Gilge P., Hohenstein S., Seume J.: *Prediction of the 3D surface topography after ball end milling and its influence on aerodynamics*. Procedia CIRP, 31, 2015, 221–227.
35. DeVries W.R.: *A three-dimensional model of surface asperities developed using moment theory*. ASME Journal of Engineering for Industry, 104(4), 1982, 342–348.
36. DIN 8589-14, *Fertigungsverfahren Honen – Teil 14*. Beute – Verlag, Berlin, 1985.
37. Doman D.A., Warkentin A., Bauer R.: *A survey of recent grinding wheel topography models*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46(3–4), 2006, 343–352.
38. Dumitru G., Romano V., Weber H.P., Haefke H., Gerbig Y., Pfluger E.: *Laser microstructuring of steel surfaces for tribological applications*. Applied Physics A, 70(4), 2000, 485–487.
39. Ernst P., Barbezat G.: *Thermal spray applications in powertrain contribute to the saving of energy and material resources*. Surface and Coatings Technology, 202(18), 2008, 4428–4431.
40. Etsion I., Burstein L.: *A model for mechanical seals with regular microsurface structure*. Tribology Transactions 39(3), 1996, 677–683.
41. Etsion I.: *State of the art in laser surface texturing*. Proceedings of the 12th Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Rzeszów (Poland), 2009, 17–20.
42. Felho C., Karpuschewski B., Kundrak J.: *Surface roughness modeling in face milling*. Procedia CIRP, 31, 2015, 136–141.
43. Feng C.X., Wang X., Yu Z.: *Neural networks modeling of honing surface roughness parameters defined by ISO 13565*. Journal of Manufacturing Systems, 21(5), 2003, 395–408.

44. Francisco A., Brunetière N.: *A hybrid method for fast and efficient rough surface generation*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 230(7), 2016, 747–768.
45. Franco P., Estrems M., Faura F.: *Influence of radial and axial runouts on surface roughness in face milling with round insert cutting tools*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 44(15), 2004, 1555–1565.
46. Fujii Y., Maeda Y., Ifuku R.: *Prediction of surface roughness on rolled sheet by texture roll*. Procedia Engineering, 81, 2014, 161–166.
47. Gachot C., Grützmacher P., Rosenkranz A.: *Laser surface texturing of TiAl multilayer films – Effects of microstructure and topography on friction and wear*. Lubricants, 6, 2018, art. nr 36.
48. Gachot C., Rosenkranz A., Reinert L., Ramos-Moore E., Souza N., Müser M.H., Mücklich F.: *Dry friction between laser-patterned surfaces: role of alignment, structural wavelength and surface chemistry*. Tribology Letters, 49(1), 2013, 193–202.
49. Gachot, C., Rosenkranz A., Hsu S.M., Costa H.L.: *A critical assessment of surface texturing for friction and wear improvement*. Wear, 372–373, 2017, 21–41.
50. Galda L., Dzierwa A., Pawlus P., Reizer R.: *Improvement of tribological properties of coating elements by oil pockets creation on sliding surfaces*. Meccanica, 46(3), 2011, 523–534.
51. Galda L., Dzierwa A., Sep J., Pawlus P.: *The effect of oil pockets shape and distribution on seizure resistance in lubricated sliding*. Tribology Letters, 37(2), 2010, 301–311.
52. Galda L., Pawlus P., Sep J.: *Dimples shape and distribution effect on characteristics of Stribeck curve*. Tribology International, 42 (10), 2009, 1505–1512.
53. Gałda L.: *Wpływ mikrokieszeni smarowych wygniatanych udarowo na właściwości tribologiczne elementów ślizgowych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, 2008.
54. Ganti S., Bushan B.: *Generalised fractal analysis and its application to engineering surfaces*. Wear, 180(1–2), 1995, 17–34.
55. Ghosh A., Sadeghi F.: *A novel approach to model effects of surface roughness parameters on wear*. Wear, 338–339, 2015, 73–94.
56. Goedel B., El Mansori M., Dumur D.: *Simulation of roughness and surface texture evolution at macroscopic scale during cylinder honing process*. Procedia CIRP, 8, 2013, 27–32.
57. Goetze Honing Guide. Rating Criteria For The Honing of Cylinder Running Surfaces. GOETZE AG HAPTVERWALTUNG D-5093 BURSCHEID. Part 1: Fax Film and Transverse Section. Part 2: Roughness Trace. GOETZE AG Technik Metall, 1988.
58. Gołąbczak A., Konstantynowicz A., Gołąbczak M.: *Modelowanie mikrogeometrii powierzchni polerowanej stopu magnezu*. Mechanik, 8–9, 2014, 79–90.
59. Grabon W., Koszela W., Pawlus P., Ochwat S.: *Improving tribological performance of piston ring – cylinder liner frictional pair by liner surface texturing*. Tribology International, 61, 2013, 102–108.
60. Grabon W., Pawlus P., Koszela W., Reizer R.: *Proposals of methods of oil capacity calculation*. Tribology International, 75, 2014, 117–122.
61. Grabon W., Pawlus P., Sep J.: *Tribological characteristics of one-process and two-process cylinder liner honed surfaces under reciprocating sliding conditions*. Tribology International, 43(10), 2010, 1882–1892.
62. Grabon W., Pawlus P., Wos S., Koszela W., Wieczorowski M.: *Effects of cylinder liner surface topography on friction and wear of liner-ring system at low temperature*. Tribology International, 121, 2018, 148–160.
63. Grabon W., Pawlus P., Wos S., Koszela W., Wieczorowski M.: *Effects of honed cylinder liner surface texture on tribological properties of piston ring-liner assembly in short time tests*. Tribology International, 113, 2017, 137–148.

64. Grabon W., Pawlus P., Wos S., Koszela W., Wieczorowski M.: *Evolutions of cylinder liner surface texture and tribological performance of piston ring-liner assembly*. Tribology International, 127, 2018, 545–556.
65. Grabon W., Pawlus P.: *Improvement of the Rpq parameter calculation*. Measurement, 129, 2018, 236–244.
66. Graboń W.: *Badanie struktury geometrycznej powierzchni o warstwowym właściwościach funkcjonalnych*. Rozprawa doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, 2009.
67. Gropper D., Harvey T. J., Wang L.: *Numerical analysis and optimization of surface textures for a tilting pad thrust bearing*. Tribology International, 124, 2018, 134–144.
68. Grover V., Singh A.K.: *Modelling of surface roughness in a new magnetorheological honing process for internal finishing of cylindrical workpieces*. International Journal of Mechanical Sciences, 144, 2018, 679–695.
69. Grzesik W.: *A revised model for predicting surface roughness in turning*. Wear, 194(1–2), 1996, 143–148.
70. Gu X., Huang Y.: *The modeling and simulation of rough surface*. Wear, 137(2), 1990, 275–285.
71. Haasis G., Weigmann U.: *New honing technique reduces oil consumption*. Industrial Diamond Review, 59(582), 1999, 205–210.
72. Hadad M., Ramezani M.: *Modeling and analysis of a novel approach in machining and structuring of flat surfaces using face milling process*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 105, 2016, 32–44.
73. Haifeng C., Jinyuan T., Wei Z.: *Modeling and predicting of surface roughness for generating grinding gear*. Journal of Materials Processing Technology, 213(5), 2013, 717–721.
74. Hasegawa M., Seireg A., Lindberg R.A.: *Surface roughness model for turning*. Tribology International, 9(6), 1976, 285–289.
75. He C.L., Zong W.J., Sun T.: *Origins for the size effect of surface roughness in diamond turning*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 106, 2016, 22–42.
76. Hegadekatte V., Huber N., Kraft O.: *Modeling and simulation of wear in a pin on disc tribometer*. Tribology Letters, 24(1), 2006, 567–575.
77. Hiegemann L., Weddeling C., Khalifa N.B., Tekkaya A.E.: *Analytical prediction of roughness after ball burnishing of thermally coated surfaces*. Procedia Engineering, 81, 2014, 1921–1926.
78. Hill I.D., Hill R., Holder R.L.: *Algorithm AS 99: Fitting Johnson Curves by Moments*. Applied Statistics, 25(2), 1976, 180–189.
79. Hong M.S., Ehmann K.F.: *Three-dimensional surface characterisation by two-dimensional autoregressive models*. ASME Journal of Tribology, 117(3), 1995, 385–393.
80. Hsu S.M., Jing Y., Zhao F.: *Self-adaptive surface texture design for friction reduction across the lubrication regimes*. Surface Topography: Metrology and Properties, 4(1), 2015, 014004.
81. Hu S., Brunetiere N., Huang W., Liu X., Wang Y.: *Bi-Gaussian surface identification and reconstruction with revised autocorrelation function*. Tribology International, 110, 2017, 185–194.
82. Hu S., Brunetiere N., Huang, Liu X., Wang Y.: *Evolution of bi-Gaussian surface parameters of silicon-carbide and carbon-graphite discs in a dry sliding wear process*. Tribology International, 112, 2017, 75–85.
83. Hu S., Brunetiere N., Huang, Liu X., Wang Y.: *The bi-Gaussian theory to understand sliding wear and friction*. Tribology International, 114, 2017, 186–191.
84. Hu S., Huang W., Shi X., Peng Z., Liu X.: *Mechanism of bi-Gaussian surface topographies on generating acoustic emissions under a sliding friction*. Tribology International, 131, 2019, 64–72.
85. Hu Y.Z., Tonder K.: *Simulation of 3-D random rough surface by 2-D digital filter and Fourier analysis*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 32(1–2), 1992, 83–90.

86. Inasaki I.: *Grinding process simulation based on the wheel topography measurement*. CIRP Annals, 45(1), 1996, 347–350.
87. Jabłoński J., Reizer R.: *Estimation of hone stone wear on basis of surface roughness sections*. 10th International Conference Metrology and Properties of Engineering Surfaces, France, Saint Etienne, 2005, 307–310.
88. Jabłoński J.: *Digital generation of surface of asymmetrical height distribution*. Measurement, 34(3), 2003, 187–191.
89. Jeng Y.-R., Gao C.-C.: *Changes of surface topography during wear for surfaces with different height distribution*. Tribology Transactions 43(4), 2000, 749–757.
90. Jeng Y.-R.: *Impact of plateaued surfaces on tribological performance*. Tribology Transactions, 39(2), 1996, 354–361.
91. Jocsak J., Li Y., Tian T., Wong V.: *Modeling and optimizing honing texture for reduced friction in internal combustion engines*. SAE 2006-01-0647, 2006.
92. Jocsak J., Li Y., Tian T., Wong V.W.: *Analyzing the effects of three-dimensional cylinder liner surface texture on ring-pack performance with a focus on honing groove cross-hatch angle*. W: Proceedings of the ASME 2005 Internal combustion engine division fall technical conference (ICEF2005), Canada, Ontario, 2005, 621–632.
93. Johansson S, Nilsson P.H., Ohlsson R., Anderberg C., Rosen B.-G.: *New cylinder liner surfaces for low oil consumption*. Tribology International, 41(9–10), 2008, 854–859.
94. Joliet R., Kansterner M., Kersting P.: *A process model for force-controlled honing simulations*. Procedia CIRP, 28, 2015, 46–51.
95. Joliet R., Kansterner M.: *A high-resolution surface model for the simulation of honing processes*. Advanced Materials Research, 769, 2013, 69–76.
96. Jung J., Kim P., Kim H., Seok J.: *Dynamic modeling and simulation of a nonlinear, non-autonomous grinding system considering spatially periodic waviness on workpiece surface*. Simulation Modelling Practice and Theory, 57, 2015, 88–99.
97. Kacalak W., Szafraniec F.: *Modelowanie topografii powierzchni po procesie szlifowania z zastosowaniem mechanizmów kumulacji składowych o różnym wymiarze fraktalnym*. Mechanik, 8–9, 2015, 152–158.
98. Kacalak W., Szafraniec F., Kunc R., Remelska H.: *Zastosowanie teorii fraktali do tworzenia i wizualizacji powierzchni o określonej topografii*. Materiały XXXIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej w: Podstawy i technika obróbki ściernej, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Łódzkiej, Łódź, 2010, 500–512.
99. Kacalak W., Szafraniec F., Kunc R.: *Modelowanie procesów mikroszlifowania płaszczyzn z zastosowaniem ściernic o stożkowej lub hiperboloidalnej powierzchni czynnej*. W: Innovative Manufacturing Technology, Edition: 1, Instytut Zaawansowanych Technologii Wytworzenia, Kraków, 2011, 164–177.
100. Kacalak W., Szafraniec F., Lipiński D.: *Metodyka modelowania powierzchni czynnej ściernic*. Mechanik, 10, 2018, 907–914.
101. Kacalak W., Szafraniec F., Tandecka K.: *Metodyka modelowania powierzchni czynnej narzędzi ściernych z uwzględnieniem korelacji przestrzennego rozmieszczenia ich wierzchołków dla określonych ściernic rzeczywistych*, Mechanik, 9, 2014, 185–192.
102. Kacalak W., Szafraniec F.: *Metodyka i algorytmy modelowania i symulacji oraz badań i analizy procesów obróbki ściernej*. Mechanik, 8–9, 2012, 205–234.
103. Kacalak W., Tomkowski R., Lipiński D., Szafraniec F.: *System oceny struktury geometrycznej powierzchni po obróbce ściernej*. Mechanik, 9, 2014, 219–226.
104. Kacalak W.: *Wprowadzenie do modelowania procesów szlifowania z uwzględnieniem probabilistycznego charakteru topografii powierzchni oraz zużycia ściernicy*. W: Prace XI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Łódź, 1988, 7–16.
105. Kalaa P., Sharma V., Pandey P.M.: *Surface roughness modelling for Double Disk Magnetic Abrasive Finishing process*. Journal of Manufacturing Processes, 25, 2017, 37–48.

106. Kawalec, M., Jankowiak M.: *Kształtowanie mikronierówności powierzchni w procesie dokładnego toczenia ostrzami polikrystalicznymi*. Postępy Technologii Maszyn i Urządzeń, 22(3), 1998, 79–91.
107. Kersting P., Joliet R., Kansteiner M.: *Modeling and simulative analysis of the micro-finishing process*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 64(1), 2015, 321–324.
108. Khare S.K., Agarwal S.: *Predictive modeling of surface roughness in grinding*. Procedia CIRP, 31, 2015, 375 – 380.
109. Kim B.H., Chu C.N.: *Effect of cutter mark on surface roughness and scallop height in sculptured surface machining*. Computer-Aided Design, 26(3), 1994, 179–188.
110. Kim B.H., Chu C.N.: *Texture prediction of milled surfaces using texture superposition method*. Computer-Aided Design, 31(8), 1999, 485–494.
111. Knuefermann M.M.W.: *A Model for Surface Roughness in Ultraprecision Hard Turning*. CIRP Annals, 53(1), 2004, 99–102.
112. Koszela W., Pawlus P., Reizer R., Liskiewicz T.: *The combined effect of surface texturing and DLC coating on the functional properties of internal combustion engines*. Tribology International, 127, 2018, 470–477.
113. Kovalchenko A., Ajayi O., Erdemir A., Fenske G., Etsion I.: *The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact*. Tribology International, 38(3), 2005, 219–225.
114. Kovalchenko A., Ajayi O., Erdemir A., Fenske G.: *Friction and wear behavior of laser textured surface under lubricated initial point contact*. Wear, 271(9–10), 2011, 1719–1725.
115. Krzyzak Z., Pawlus P.: *Piston skirt surface topography modelling during a low wear process*, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 225(4), 2011, 229–241.
116. Lawrowski Z.: *Tribologia. Tarcie, zużycie i smarowanie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2008.
117. Leach R.K. (Ed.): *Characterisation of Areal Surface Texture*. Springer, Berlin, 2013.
118. Leefe S.E.: *“Bi-Gaussian” representation of worn surface topography in elastic contact problems*. Tribology Series, 34, 1998, 281–290.
119. Lenart A., Pawlus P., Wos S., Dzierwa A.: *The effect of surface texturing on dry gross fretting*. Lubricants, 6, 2018, art. nr 92.
120. Li J., Liu S., Yu A., Xiang S.: *Effect of laser surface texture on CuSn6 bronze sliding against PTFE material under dry friction*. Tribology International, 118, 2018, 37–45.
121. Li K., Yao Z., Hu Y., Gu W.: *Friction and wear performance of laser peen textured surface under starved lubrication*. Tribology International, 77, 2014, 97–105.
122. Liao D., Shao W., Tang J., Li J.: *An improved rough surface modeling method based on linear transformation technique*. Tribology International, 119, 2018, 786–794.
123. Liao T.W.: *Fractal and DDS characterization of diamond wheel profiles*. Journal of Materials Processing Technology, 53(3–4), 1995, 567–581.
124. Lin S.C., Chang M.F.: *A study on the effects of vibrations on the surface finish using a surface topography simulation model for turning*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 38(7), 1998, 763–782.
125. Lipiński D., Kacalak W., Szafranec F., Tomkowski R.: *Metodyka tworzenia modeli neuronowych procesu szlifowania z wykorzystaniem wiedzy analitycznej i doświadczalnej*. Mechanik, 9, 2014, 255–260.
126. Liu N., Wang S.B., Zhang Y.F., Lu W.F.: *A novel approach to predicting surface roughness based on specific cutting energy consumption when slot milling Al-7075*. International Journal of Mechanical Sciences, 118, 2016, 13–20.
127. Liubimov W., Oczóś K.E.: *Składowa zdeterminowana struktur geometrycznych powierzchni (SGP) o charakterze mieszanym*. Prace Naukowe Instytutu Technologii Maszyn i Automatykacji Politechniki Wrocławskiej, nr 74, 1999, 125–134.

128. Liubimov W., Pawlus P., Miszuris G.: *Surface topography determinity coefficient*. X International Coloquium on Surfaces, Germany, Chemnitz, 2000, 434–439.
129. Lu Y.S., Liu Y., Wang J., Liu H.: *Experimental investigation into friction performance of dimples journal bearing with phyllotactic pattern*. Tribology Letters, 55(2), 2014, 271–278.
130. Lu Y.S., Liu Y.M., Wang J., Liu H.: *Tribological performance with dimpled thrust bearings with phyllotactic patterns*. Wear, 346–347, 2016, 108–115.
131. Majumdar A., Bhushan B.: *Role of fractal geometry in roughness characterization and contact mechanics of surfaces*. ASME Journal of Tribology, 112(2), 1990, 205–216.
132. Majumdar A., Tien C.L.: *Fractal characterisation and simulation of rough surfaces*. Wear 136(2), 1990, 313–327.
133. Malburg M.C., Raja J., Whitehouse D.J.: *Characterization of surface texture generated by plateau-honing process*. CIRP Annals, 42(1), 1993, 637–639.
134. Manesh K.K., Ramamoorthy B., Singaperumal M.: *Numerical generation of anisotropic 3D non-Gaussian engineering surfaces with specified 3D surface roughness parameters*. Wear, 268(11–12), 2010, 1371–1379.
135. Mathia T.G., Zahouani T., Schissler J.M., Rakowski W.: *Analysis of cylinder bores – the relationship between metallurgical structure, manufacture and wear characterization*. Proceedings of International Congress on Tribology, 4, 1993, 311–316.
136. Mezghani S., Demirci I., Yousfi M., El Mansori M.: *Mutual influence of crosshatch angle and superficial roughness of honed surfaces on friction in ring-pack tribo-system*. Tribology International, 66, 2013, 54–59.
137. Mezghani S., Demirci I., Yousfi M., El Mansori M.: *Running-in wear modeling of honed surface for combustion engine cylinder liners*. Wear, 302(1–2), 2013, 1360–1369.
138. Mezghani S., Demirci I., Zahouani H., El Mansori M.: *The effect of groove texture patterns on piston-ring pack friction*. Precision Engineering, 36(2), 2012, 210–217.
139. Mia M., Dhar N.R.: *Prediction of surface roughness in hard turning under high pressure coolant using Artificial Neural Network*. Measurement, 92, 2016, 464–474.
140. Michail S.K., Barber G.C.: *The effect of roughness on piston ring lubrication. Part I: Model development*. Tribology Transactions, 38(1), 1995, 19–26.
141. Michail S.K., Barber G.C.: *The effects of roughness on piston ring lubrication part II: The relationship between cylinder wall surface topography and oil film thickness*. Tribology Transactions, 38(1), 1995, 173–177.
142. Michalski J.: *Wpływ drgań samowzbudnych i wymuszonych na główne wskaźniki gładzenia cylindrów oselkami z warstwą diamentową*. Mechanik, 55(5), 1982, 283–288.
143. Michalski J.: *Technologie wytwarzania bloków cylindrowych silników spalinyowych o korzystnej wartości masowego wskaźnika mocy i wytrzymałości*. Systems and Means of Motor Transport. Selected Problems, Seria: Transport, 1, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2010, 161–168.
144. Miko E.: *Chropowatość powierzchni frezowanych walcowo*. Przegląd Mechaniczny, 11, 2002, 30–36.
145. Misra A., Pandey P.M., Dixit U.S.: *Modeling and simulation of surface roughness in ultrasonic assisted magnetic abrasive finishing process*. International Journal of Mechanical Sciences, 133, 2017, 344–356.
146. Muñoz-Escalona P., Maropoulos P.G.: *A geometrical model for surface roughness prediction when face milling Al 7075-T7351 with square insert tools*. Journal of Manufacturing Systems, 36, 2015, 216–223.
147. Müser M.H., Dapp W.B., Bugnicourt R., Sainsot P., Lesaffre N., Lubrecht T.A., Persson B.N.J., Harris K., Bennett A., Schulze K., Rohde S., Ifju P., Sawyer W.G., Angelini T., Esfahani H.A., Kadkhodaei M., Akbarzadeh S., Wu J.-J., Vorlauffer G., Vernes A., Solhjoo S., Vakis A.I., Jackson R.L., Xu Y., Streator J., Rostami A., Dini D., Medina S., Carbone G.,

- Bottiglione F., Afferrante L., Monti J., Pastewka L., Robbins M.O., Greenwood J.A.: *Meeting the contact-mechanics challenge*, Tribology Letters, 65(4), 2017, art. nr 118.
148. Nemoto K., Yanagi K., Aketagawa M., Kanda D., Yoshida I., Uchidate M.: *A study on surface materials measures for areal surface texture instruments: Measuring conditions for areal profiling*. Key Engineering Materials, 381–382, 2008, 241–244.
 149. Newland D.E.: *An Introduction to Random Vibration and Spectral Analysis, 2nd edition*. Longman, London, 1984.
 150. Nguyen A.T., Butler D.L.: *Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of three-dimensional surface characterisation*. Journal of Materials Processing Technology, 208(1–3), 2008, 14–23.
 151. Niketh S., Samuel G.L.: *Drilling performance of micro textured tools under dry, wet and MQL condition*. Journal of Manufacturing Processes, 32, 2018, 254–268.
 152. Nilsson B., Rosen B.-G., Thomas T.R., Wiklund D.: *Oil pockets and surface topography: mechanism of friction reduction*. XI International Colloquium on Surfaces, Chemnitz (Germany), 2004.
 153. Nizankowski C.: *The influence the structure of the abrasive materials made of sintered corundum on the grindability of the grinding wheels with ceramic class-crystalline binders*. Archives of Mechanical Technology and Automation, 31(4), 2011, 39–48.
 154. Nonogaki M., Morimoto T., Nakahara T.: *Method of determination of truncation parameters from measured surface profile*. Tribology International, 36(10), 2003, 745–752.
 155. Nowicki B.: *Chropowatość i falistość powierzchni*. WNT, Warszawa, 1991.
 156. Oczóś K.E., Lubimow W.: *Struktura geometryczna powierzchni. Podstawy klasyfikacji wraz z atlasem powierzchni*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2003.
 157. Ozcelik B., Bayramoglu M.: *The statistical modeling of surface roughness in high-speed flat end milling*. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 46(12–13), 2006, 1395–1402.
 158. Pandit S.M., Sathyanarayan G.: *Data-dependent systems approach to surface topography generation in grinding*. Transaction of the ASME, Journal of Engineering for Industry, 106(3), 1984, 205–212.
 159. Patir N.: *A numerical procedure for random generation of rough surfaces*. Wear, 47(2), 1978, 263–277.
 160. Patrikar R.M.: *Modeling and simulation of surface roughness*. Applied Surface Science 228(1–4), 2004, 213–220.
 161. Pawlus P., Michalski J.: *Simulation of cylinder “zero-wear” process*. Wear, 266(1–2), 2009, 208–213.
 162. Pawlus P., Galda L., Dzierwa A., Koszela W.: *Abrasive wear resistance of textured steel rings*. Wear, 267(11), 2009, 1873–1882.
 163. Pawlus P., Grabon W.: *The method of truncation parameters measurement from material ratio curve*. Precision Engineering 32(4), 2008, 342–347.
 164. Pawlus P., Michalski J., Reizer R.: *Progress of cylinder honing. Part I: Honing of blind holes*. W: *Innovative manufacturing technology vol.2*. Edited by Piotr Rusek, ISO Instytut Zawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków, 2012, 103–126.
 165. Pawlus P., Michalski J., Reizer R.: *Progress of cylinder honing. Part II: Honing of cylinder liners from highly loaded internal combustion engines*. W: *Innovative manufacturing technology vol.2*. Edited by Piotr Rusek, ISO Instytut Zawansowanych Technologii Wytwarzania, Kraków, 2012, 127–153.
 166. Pawlus P., Reizer R., Dzierwa A.: *Simulation of profiles of normal ordinate distribution*. Key Engineering Materials, 381–382, 2008, 635–638.
 167. Pawlus P., Reizer R., Galda L., Dzierwa A.: *Surface topography after vapour blasting forecasting*. 10th International Symposium on Measurement and Quality Control 2010, ISMQC 2010, Japan, Osaka, 2010.

168. Pawlus P., Reizer R., Lenart A.: *Comparison of parameters describing stratified surface topography*. Journal of Physics: Conference Series, 483, 2014, 012021.
169. Pawlus P., Reizer R.: *Modeling profiles after vapour blasting*. Metrology and Measurement Systems, 17 (1), 2010, 119–125.
170. Pawlus P., Wieczorowski M., Mathia T.: *The errors of stylus methods in surface topography measurements*. ZAPOL, Szczecin, 2014.
171. Pawlus P., Zelasko W., Reizer R., Wieczorowski M.: *Calculation of plasticity index of two-process surfaces*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 231(5), 2017, 572–582.
172. Pawlus P.: *A study on the functional properties of honed cylinder surface during running-in*. Wear, 176(2), 1994, 247–254.
173. Pawlus P.: *Simulation of stratified surface topographies*. Wear, 264(5–6), 2008, 457–463.
174. Pawlus P.: *Topografia powierzchni. Pomiar, analiza, oddziaływanie*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2006.
175. Podulka P., Pawlus P., Dobrzanski P., Lenart A.: *Spikes removal in surface measurement*. Journal of Physics: Conference Series, 483(1), 2014, 01202.
176. Pontes F.J., de Paiva A.P., Balestrassi P.P., Ferreira J.R., da Silva M.B.: *Optimization of Radial Basis Function neural network employed for prediction of surface roughness in hard turning process using Taguchi's orthogonal arrays*. Expert Systems with Applications, 39(9), 2012, 7776–7787.
177. Ranjan R., Lambeth D.N., Tromel M., Goglia P., Li Y.: *Laser texturing for low-flying-height media*. Journal of Applied Physics, 69(8), 1991, 5745–5747.
178. Rapoport L., Moshkovich A., Perfilyev V., Lapsker I., Halperin G., Itovich Y., Etsion I.: *Friction and wear of MoS₂ films on laser textured steel surfaces*. Surface and Coatings Technology, 202(14), 2008, 3332–3340.
179. Reizer R., Galda L., Dzierwa A., Pawlus P.: *Simulation of textured surface topography during a low wear process*. Tribology International, 44(11), 2011, 1309–1319.
180. Reizer R., Pawlus P., Galda L., Grabon W., Dzierwa A.: *Modeling of worn surface topography formed in a low wear process*. Wear, 278–279, 2012, 94–100.
181. Reizer R., Pawlus P.: *3D surface topography of cylinder liner forecasting during plateau honing process*. Journal of Physics: Conference Series, 311 012021, 2011.
182. Reizer R., Pawlus P.: *Modelling of plateau honed cylinder surface topography*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture 226(9), 2012, 1564–1578.
183. Reizer R., Pawlus P.: *Modelowanie profili nierówności powierzchni cylindrów po gladzeniu płaskowierzchołkowym*. Pomiar Automatyka Robotyka, 6, 2012, 64–69.
184. Reizer R.: *Modelowanie struktury geometrycznej powierzchni kształtowanych procesami ściernymi*. Praca doktorska, Politechnika Rzeszowska, Rzeszów, 2008.
185. Reizer R.: *Simulation of 3D Gaussian surface topography*. Wear, 271(3–4), 2011, 539–543.
186. Rosen B.-G., Crafford R.: *Interactive surface modelling: Model of a function oriented expert system for specification of surface properties*. Industrial Metrology, 2(2), 1992, 107–119.
187. Russ J.C.: *Fractal Surfaces*. Plenum Press, New York, 1994.
188. Salisbury E.J., Domala K.V., Moon K.S., Miller M., Sutherland J.W.: *A three-dimensional model for the surface texture in surface grinding. Part I. Surface generation model*. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 123(4), 2001, 576–581.
189. Sannareddy H., Raja J., Chen K.: *Characterization of surface texture generated by multi-process manufacture*. Transactions of the 7th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Gothenburg, Sweden, 1997, 111–118.
190. Santochi M., Vignale M., Giusti F.: *A study on the functional properties of a honed surface*. CIRP Annals, 31(1), 1982, 431–434.

191. Schmid J.: *Honing technology for optimal cast-iron cylinder liners*. Engine Technology International, 1–2, 1999, 108–109.
192. Schmitz T.L., Couey J., Marsh E., Mauntler N., Hughes D.: *Runout effects in milling: Surface finish, surface location error, and stability*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 47(5), 2007, 841–851.
193. Schwartzentruber J., Spelt J.K., Papini M.: *Prediction of surface roughness in abrasive waterjet trimming of fiber reinforced polymer composites*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 122, 2017, 1–17.
194. Segu D.Z., Choi S.G., Choi J.H., Kim S.S.: *The effect of multi-scale laser textured surface on lubrication regime*. Applied Surface Science, 270(1), 2013, 58–63.
195. Segu D.Z., Hwang P.: *Friction control by multi-shape textured surface under pin-on-disc test*. Tribology International, 91, 2015, 111–117.
196. Sęp J.: *Łożyskowania ślizgowe z nietypową konstrukcją współpracujących elementów*. ITE-PIB, Radom, 2013.
197. Shaikh J.H., Jain N.K.: *Modeling of material removal rate and surface roughness in finishing of bevel gears by electrochemical honing*. Journal of Materials Processing Technology, 214(2), 2014, 200–209.
198. Shen C., Khonsari M. M.: *Numerical optimization of texture shape for parallel surfaces under unidirectional and bidirectional sliding*. Tribology International, 82(A), 2015, 1–11.
199. Shewchuk J.R.: *An introduction to the Conjugate Gradient Method without the agonizing pain*. www.cs.cmu.edu/~quake-papers/painless-conjugate-gradient.pdf [dostęp: 01.12.2018].
200. Sivatte-Adroera M., Llanas-Parrab X., Buj-Corral I., Vivancos-Calvet J.: *Indirect model for roughness in rough honing processes based on artificial neural networks*. Precision Engineering, 43, 2016, 505–513.
201. Spencer A., Almqvist, Larsson R. *A numerical model to investigate the effect of honing angle on the hydrodynamic lubrication between a combustion engine piston ring and cylinder liner*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 225(7), 2011, 683–689.
202. Spencer A., Almqvist A, Larsson R.: *A semi – deterministic texture – roughness model of the piston ring – cylinder contact*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 225(6), 2011, 1–9.
203. Sreenath A.V., Raman N.: *Running-in wear of a compression ignition engine: Factors influencing the conformance between cylinder liner and piston ring*. Wear, 38(2), 1976, 271–289.
204. Srivastava D.K., Agarwal A.K., Kumar J.: *Effect of liner surface properties on wear and friction in a non-firing engine simulator*. Materials & Design, 28(5), 2007, 1632–1640.
205. 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.
206. Steiner L., Bouvier V., May U., Hegadekatte V., Huber N.: *Modelling of unlubricated oscillating sliding wear of DLC-coatings considering surface topography, oxidation and graphitization*. Wear, 268(9), 2010, 1184–1194.
207. Stout K.J., Speding T.A.: *The characterization of the combustion engine bores*. Wear, 83(2), 1982, 311–326.
208. Stout K.J., Davis E.J., Sullivan P.J.: *Atlas of Machined Surfaces*. Chapman and Hall, London, 1990.
209. Stout K.J., Davis E.J.: *Surface topography of cylinder bores – the relationship between manufacture, characterization and function*. Wear, 95(2), 1984, 111–125.
210. Stout K.J., King T.G., Whitehouse D.J.: *Analytical techniques in surface topography and their application to a running-in experiment*. Wear, 43(1), 1977, 99–115.
211. Sudarshan T.S., Bhaduri S.B.: *Wear in cylinder liners*. Wear, 91(3), 1983, 269–279.

212. Suresh P.V.S., Rao P.V., Deshmukh S.G.: *A genetic algorithm approach for optimization of surface roughness prediction model*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 42(6), 2002, 675–680.
213. Suzuki K., Uematsu T., Ohashi H., Kitajima K., Suga T., Imanaka O., Kobayashi A.: *Development of a new mechanochemical polishing method with a polishing film for ceramic round bars*. CIRP Annals – Manufacturing Technology, 41(1), 1992, 339–342.
214. Tang M.-K., Huang X.-J., Yu J.-G., Li X.-W., Zhang Q.-X.: *The effect of textured surfaces with different roughness structures on the tribological properties of Al alloy*. Journal of Materials Engineering and Performance, 25(10), 2016, 4115–4125.
215. Tang W., Zhou Y., Zhu H., Yang H.: *The effect of surface texturing on reducing the friction and wear of steel under lubricated sliding contact*. Applied Surface Science, 273, 2013, 199–204.
216. Taro M., Chaise T., Nélias D.: *A methodology to predict the roughness of shot peened surfaces*. Journal of Materials Processing Technology, 217, 2015, 65–76.
217. Tayebi N., Polycarpou A.A.: *Modeling the effect of skewness and kurtosis on the static friction coefficient of rough surfaces*. Tribology International, 37(6), 2004, 491–505.
218. Teja S.R., Jayasingh T.: *Characterisation of ground surface profiles – A comparison of AR, MA and ARMA modelling methods*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 33(1), 1993, 103–110.
219. Thomas T.R.: *Rough Surfaces. Second edition*. Imperial College Press, UK, London, 1999.
220. Tomkowski R., Kacalak W., Lipinski D.: *Evaluation of the surface topography after precision machining*. Journal of Machine Engineering, 12(4), 2012, 71–80.
221. Uchidate M., Shimizu T., Iwabuchi A., Yanagi K.: *Generation of reference data of 3D surface texture using the non-causal 2D AR model*. Wear, 257(12), 2004, 1288–1295.
222. Urbikain G., López de Lacalle L.N.: *Modelling of surface roughness in inclined milling operations with circle-segment end mills*. Simulation Modelling Practice and Theory, 84, 2018, 161–176.
223. Usman A., Park C.W.: *Optimizing the tribological performance of textured piston ring–liner contact for reduced frictional losses in SI engine: Warm operating conditions*, Tribology International, 99, 2016, 224–236.
224. Varenberg M., Halperin G., Etsion I.: *Different aspects of the role of wear debris in fretting wear*. Wear, 252(11–12), 2002, 902–910.
225. Vlădescu S.-C., Medina S., Olver A.V., Pegg I.G., Reddyhoff T.: *Lubricant film thickness and friction force measurements in a laser surface textured reciprocating line contact simulating the piston ring–liner pairing*. Tribology International, 98, 2016, 317–329.
226. Wang M. Du S., Xi L.: *Predicting machined surface topography based on high definition metrology*. IFAC-PapersOnLine, 48(3), 2015, 1013–1017.
227. Wang X., Adachi K., Otsuka K., Kato K.: *Optimization of the surface texture for silicon carbide sliding in water*. Applied Surface Science, 253(3), 2006, 1282–1286.
228. Wang Y., Liu Y., Chu X., He Y., Zhang W.: *Calculation model for surface roughness of face gears by disc wheel grinding*, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 123, 2017, 76–88.
229. Watson W., King T.G., Spedding T.A., Stout K.J.: *The machined surface – time series modeling*. Wear, 57(1), 1979, 195–205.
230. Watson W., Spedding T.A.: *The time series modeling of non-Gaussian engineering processes*. Wear 83(2), 1982, 215–231.
231. Whitehouse D.J., Archard J.F.: *The properties of random surface of significance in their contact*. Proceedings of the Royal Society A, 316, 1970, 97–121.
232. Whitehouse D.J.: *Assessment of surface finish profiles produced by multi-process manufacture*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 199(4), 1985, 263–270.

233. Whitehouse D.J.: *Fractal or fiction*. Wear 249(5–6), 2001, 345–353.
234. Whitehouse D.J.: *Handbook of Surface Metrology*. Bristol and Philadelphia: Inst. Of Physics, 1994.
235. Wieczorowski M., Cellary A., Ehmann K.F.: *Trójwymiarowa analiza chropowości powierzchni za pomocą autoregresji*. Materiały konferencji: „Metrologia w Technikach Wytwarzania”, Rzeszów, 1995, 101–109.
236. Wieczorowski M.: *Metrologia nierówności powierzchni*. ZAPOL, Szczecin, 2013.
237. Wieczorowski M.: *Wykorzystanie analizy topograficznej w pomiarach nierówności powierzchni*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań, 2009.
238. Wiemann L.: *Die Bildung von Brandspuren auf den Laufflachen der Paarung Kolbenring-Zylinder in Verbrennungsmotoren*. MTZ, 32(2), 1971, 43–49.
239. Wojciechowski S., Twardowski P., Pelic M.: *Surface texture generation during cylindrical milling in the aspect of cutting force variations*. Journal of Physics: Conference Series, 483 012017, 2014.
240. Wojciechowski S., Twardowski P., Wieczorowski M.: *Surface texture analysis after ball end milling with various surface inclination of hardened steel*. Metrology and Measurement Systems, 21(1), 2014, 145–156.
241. Wos S., Koszela W., Pawlus P.: *Determination of oil demand for textured surfaces under conformal contact conditions*. Tribology International, 93(B), 2015, 602–613.
242. Wos S., Koszela W., Pawlus P.: *The effect of the shape of oil pockets on the friction force*. Tribologia, 4, 2018, 151–156.
243. Wos S., Koszela W., Pawlus P.: *Tribological behaviours of textured surfaces under conformal and non-conformal starved lubricated contact conditions*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology, 229(4), 2015, 398–409.
244. Wu J.-J.: *Simulation of non-Gaussian surfaces with FFT*. Tribology International, 37(4), 2004, 339–346.
245. Wu J.-J.: *Simulation of rough surfaces with FFT*. Tribology International, 33(1), 2000, 47–58.
246. Xing Y., Deng J., Feng X., Yu S.: *Effect of laser surface texturing on Si₃N₄/TiC ceramic sliding against steel under dry friction*. Materials & Design, 52, 2013, 234–245.
247. Xing Y., Deng J., Wu Z., Wu F.: *High friction and low wear properties of laser-textured ceramic surface under dry friction*. Optics & Laser Technology, 93, 2017, 24–32.
248. Yang J., Wang X., Kang M.: *Finite element simulation of surface roughness in diamond turning of spherical surfaces*. Journal of Manufacturing Processes, 31, 2018, 768–775.
249. Yao Z., Mei D., Chen Z.: *Modeling of metallic surface topography modification by high-frequency vibration*. Journal of Sound and Vibration, 363, 2016, 258–271.
250. Ye X., Guan J., Wang J., Wang L., Cao Y.: *Model for surface topography prediction in cylinder turning*. Procedia CIRP, 27, 2015, 286 – 291.
251. Yin B., Li X., Fu Y., Yun W.: *Effect of laser textured dimples on the lubrication performance of cylinder liner in diesel engine*. Lubrication Science, 24(7), 2012, 293–312.
252. You S.J., Ehmann K.F.: *Computer synthesis of three-dimensional surfaces*. Wear, 145(1), 1991, 29–42.
253. Yu H., Huang W.; Wang X.: *Dimple patterns for different circumstances*. Lubrication Science, 25(2), 2013, 67–78.
254. Zhang G.M., Yerrameddy S., Lee S.M., Lu S.C.-Y.: *Simulation of surface topography formed during the intermittent turning process*. ASME Journal of Dynamic System, Measurement and Control, 113(2), 1991, 273–279.
255. Zhang H., Hua M., Dong G., Zhang D., Chen W., Dong G.: *Optimization of texture shape based on Genetic Algorithm under unidirectional sliding*. Tribology International, 115, 2017, 222–232.
256. Zhang P., Liu Z.: *Modeling and prediction for 3D surface topography in finish turning with conventional and wiper inserts*. Measurement, 94, 2016, 37–45.

257. Zhang S.J., To S., Wang S.J., Zhu Z.W.: *A review of surface roughness generation in ultra-precision machining*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 91, 2015, 76–95.
258. Zhang X., Xu Y., Jackson R.L.: *An analysis of generated fractal and measured rough surfaces in regards to their multi-scale structure and fractal dimension*. Tribology International, 2017, 105, 94–101.
259. Zhang Y.L., Zhang X.G., Matsoukas G.: *Numerical study of surface texturing for improving tribological properties of ultra-high molecular weight polyethylene*. Biosurface and Biotribology, 1(4), 2015, 270–277.
260. Zipin R.B.: *The analysis of profile strata for surface texture specification*. Applications of Surface Science, 15(1–4), 1983, 334–358.

Streszczenie

MODELOWANIE STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI TEKSTUROWANYCH ODZWIERCIEDLAJĄCE WARUNKI POWSTAWANIA NIERÓWNOŚCI NA ETAPACH TECHNOLOGII I EKSPLOATACJI

Stan warstwy wierzchniej, w tym struktury geometrycznej powierzchni, wpływa na zdolność do spełniania wymagań eksploatacyjnych przez części maszyn. Struktura geometryczna powierzchni powstała w procesie technologicznym wpływa na zagadnienia styku, procesy tarcia i zużycia, zwłaszcza w początkowym okresie pracy skojarzenia cierne. Czas i koszty eksperymentalnych badań technologicznych można zmniejszyć przez numeryczne modelowanie powierzchni. Modelowanie SGP odzwierciedlające rzeczywiste warunki jej tworzenia może umożliwić zbadanie wpływu warunków obróbki na jej ukształtowanie, a wówczas badania doświadczalne można ograniczyć tylko do najbardziej korzystnego ukształtowania powierzchni. Prognozowanie stanu topografii powierzchni powstałej w trakcie zużycia spowoduje znaczną redukcję czasu i kosztów badań tribologicznych. Modelowanie struktury geometrycznej powierzchni na etapach technologii i eksploatacji ma istotne znaczenie praktyczne. Zagadnieniu modelowania SGP poświęcona jest niniejsza praca.

Monografia składa się z sześciu rozdziałów. Pierwszy rozdział – *Wstęp* – poświęcony jest wprowadzeniu w tematykę monografii. Opisano strukturę geometryczną powierzchni i jej modelowanie. W rozdziale drugim zamieszczono przegląd metod modelowania nierówności. Po krótkim wprowadzeniu do tematyki omówiono zagadnienia związane z modelowaniem, które nie uwzględnia warunków technologicznego lub eksploatacyjnego kształtowania powierzchni. W dalszej części przedstawiono dokonania badaczy w zakresie modelowania odzwierciedlającego rzeczywiste warunki tworzenia powierzchni. W rozdziale trzecim rozwinięto analizę literaturową dotyczącą tribologicznej istotności powierzchni teksturowanych. Opisano funkcjonalne znaczenie powierzchni teksturowanej oraz metody kształtowania funkcjonalnych nierówności powierzchni. Rozdział czwarty dotyczy modelowania powierzchni kształtowanych w procesie honowania płaskowierzchołkowego. W jego pierwszej części omówiono zagadnienia związane z honowaniem tulei cylindrowych silników spalinowych. Druga część zawiera prezentację badań doświadczalnych procesu honowania płaskowierzchołkowego. W części trzeciej przedstawiono istotę i wyniki zastosowania metody modelowania nierówności powierzchni cylindrów podczas procesu honowania płaskowierzchołkowego. W rozdziale piątym monografii zawarto modelowanie struktury powierzchni teksturowanych w trakcie eksploatacji. Mode-

lowano strukturę geometryczną powierzchni tulei cylindrowych po procesie zużycia z zastosowaniem metody nakładania powierzchni. Modelowano również topografię powierzchni teksturowanego pierścienia stalowego po badaniach tribologicznych w warunkach sztucznie zwiększonego zapylenia. Zastosowano metodę nakładania powierzchni oraz symulację działania ziaren ściernych. Szósty rozdział zawiera podsumowanie prac badawczych, wskazano również na konieczność dalszych badań.

Abstract

MODELING OF TOPOGRAPHIES OF TEXTURED SURFACES REFLECTING CONDITIONS OF IRREGULARITIES CREATION DURING MACHINING AND OPERATING

Subsurface layer, including surface topography, affects ability to fulfill functional requirements by machine elements. The surface topography created in machining process affects contact, friction and wear, especially at the beginning of frictional assembly operating. Time and costs of experimental machining can be reduced by numerical surface modeling. Surface topography modeling reflecting conditions of irregularities creation can allow to study the effect of machining parameters on the surface shape, in this case the experimental research can be reduced only to the best surface variant. Prediction of surface topography created during wear process will cause huge reduction of time and costs of tribological investigations. Surface topography modeling during machining and operating is a task of a great practical importance. The present work is concerned with problems related to surface topography modeling.

The monograph consists of six chapters. The first chapter – *Introduction* – tells what the rest of the book is about. Surface topography and its modeling were described. The second chapter presents a review of methods of surface topography modeling. After a short introduction, problems related to modeling not reflecting conditions of surface creation during machining or operating were described. The further part of this chapter presents achievements of scientists in the field of surface topography modeling taking into consideration conditions of irregularities forming. In the third chapter the literature analysis was extended to problems related with tribological importance of textured surfaces. Functional meaning of textured surfaces and methods of textured surfaces creation were described. The fourth chapter is concerned with modeling of surfaces created during the plateau honing process. In the first part of this chapter problems related with plateau honing of cylinder liners were described. The second part present results of plateau honing experimental investigations. The third part consists of the idea and results of cylinder liner surface topography modeling after the plateau honing process. The fifth chapter presents the results of modeling of worn textured surfaces during operating. Surface topographies of cylinder liners after the wear process were modeled using the superimposition method. Surface topography of textured steel rings after operating under artificially increased dustiness conditions were also modeled. In this case two methods were used: superimposition of surfaces and simulation of abrasion by grinding particles. This work ends with summary (chapter sixth), in which it was pointed out on the need for further research.

