

Wpływ topografii powierzchni na właściwości eksploatacyjne części maszyn

Effect of the machine parts surface topography features on the machine service

WIT GRZESIK*

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.493

Przedstawiono związki pomiędzy parametrami topografii powierzchni a właściwościami użytkowymi części maszyn kształtowanych w różnych procesach obróbki ubytkowej. Określono dominujące parametry chropowatości 2D i 3D w odniesieniu do: odkształceń stykowych, wytrzymałości zmęczeniowej, tarcia i zużycia oraz odporności korozyjnej. Podano praktyczne przykłady wizualizacji cech stereometrycznych powierzchni o określonych właściwościach eksploatacyjnych.

SŁOWA KLUCZOWE: struktura powierzchni, obróbka skrawaniem, właściwości użytkowe, procesy technologiczne

Explained is relevancy of the surface topography features with functional properties of machine parts produced in different subtractive process operations. Dominant roughness parameters 2D and 3D are preset with respect to the contact deformation, fatigue, friction and wear as well as corrosion resistance. Also given are practical visual examples of the surface 3D features offering specific service effects.

KEYWORDS: surface texture, machining, service properties, production processes

W poprzednich publikacjach autora w *Mechaniku* [1÷3] wielokrotnie były omawiane praktyczne możliwości polepszenia jakości technologicznej i użytkowej części za pomocą wykończeniowych operacji obróbki wiórowej i ścierniej oraz nagniatania. Rozważania te zostały oparte zarówno na parametrach profilu powierzchni (2D), jak i charakterystykach stereometrycznych chropowatości powierzchni (3D), decydujących o jej właściwościach funkcjonalnych. Wiedza inżynierska w tym obszarze nadal jest niewystarczająca pomimo rozwiniętych technik inżynierii powierzchni, a zwłaszcza metrologii powierzchni. W projektowaniu inżynierskim ważne

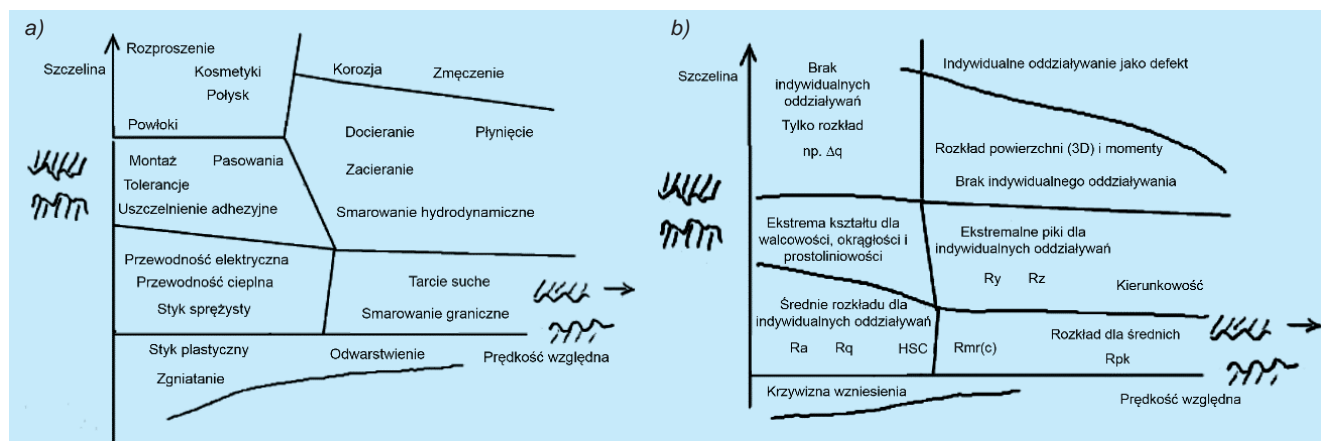
są nie tylko tolerancje wymiarów i dokładność kształtu, lecz także zależności pomiędzy funkcjonalnością powierzchni a jej stanem geometrycznym, który jest jednym z elementów struktury geometrycznej powierzchni (SGP). SGP ma bowiem wpływ na wiele właściwości funkcjonalnych, takich jak: wytrzymałość zmęczeniowa, odporność na zużycie i korozję, odporność na naciski kontaktowe (wytrzymałość stykowa), opory przepływu czy szczelność połączeń.

Obecnie inżynierowie mają do dyspozycji liczne narzędzia pozwalające na ocenę i symulację takich związków – przede wszystkim parametry 2D i 3D chropowatości powierzchni (ujęte np. w normach ISO 25178 i ISO 16610). Metrologia stereometrycznych cech powierzchni jest już na tyle rozwinięta, że w jakimś stopniu można przewidzieć zachowanie się powierzchni danej części we współpracy z innym elementem oraz stopień spełnienia przez nią założonych funkcji podczas eksploatacji [4÷6]. Zgodnie z polską terminologią techniczną jest to powiązanie jakości technologicznej z jakością eksploatacyjną [7].

Związki między funkcjonalnością powierzchni a warunkami obróbki przedstawił w sposób uporządkowany B. Nowicki [8], natomiast problematykę wytwarzania i użytkowania warstw powierzchniowych szczegółowo opisał T. Burakowski w monografii [9] poświęconej areologii, czyli działowi nauki i techniki równoważnemu inżynierii powierzchni.

Trudności, jakie inżynieria powierzchni wciąż jeszcze napotyka w powiązaniu jakości technologicznej z eksploatacyjną, są zbyt duże, by prognozować konkretne właściwości eksploatacyjne na podstawie zmierzonych parametrów chropowatości powierzchni. Zdaniem Whitehouse'a [10] obecnie możliwe jest przypisanie różnych reżimów funkcjonalnych (rys. 1a) odpowiednim, granicznym zmianom parametrów chropowatości powierzchni (rys. 1b). W przypadku zagadnień kontaktowych i tarcia obszary te są wydzielane na podstawie bezwymiarowych parametrów w układzie współrzędnych: odstęp między kontaktującymi się powierzchniami – prędkość ruchu względnego (*normal gap vs. relative movement*).

* Prof. dr hab. inż. Wit Grzesik (w.grzesik@po.opole.pl) – Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Opolskiej



Rys. 1. Skojarzenie funkcjonalnych obszarów (a) z granicznymi zakresami parametrów chropowatości powierzchni (b) [10]

Termin *indywidualne oddziaływanie* należy rozumieć jako dominujący mechanizm kształtowania chropowatości powierzchni – mechaniczny, termiczny i chemiczny (np. przejście ziarna ściernego w szlifowaniu, wyładowanie elektryczne w obróbce elektroerozyjnej).

W tabl. I i II zestawiono ustalone doświadczalnie korelacje między właściwościami funkcjonalnymi obrabianych powierzchni a parametrami chropowatości. Należy zwrócić uwagę, że w większości opierają się one na klasycznym pomiarze profilu powierzchni. W tabl. I przedstawiono związki między właściwościami fizycznymi i funkcjonalnymi a parametrami chropowatości 2D i falistością powierzchni. Można dostrzec, że oprócz parametrów wysokościowych i amplitudowych istotne znaczenie z punktu widzenia funkcjonalności powierzchni mają też parametry poziome (średnia szerokość rowków profilu R_{sm}) i mieszane (średnie pochylenie wznie-

sień profilu $R_{\Delta q}$). W przypadku smarowania, uszczelnienia i tolerancji montażowych większe znaczenie niż wysokościowe parametry R_a i R_q ma falistość (średnia arytmetyczna rzędnych profilu falistości W_a).

W tabl. II podano potencjalny wpływ poszczególnych grup parametrów 2D i 3D na różne właściwości funkcjonalne powierzchni. Z danych tych wynika jednoznacznie, że decydujące są parametry amplitudowe (wysokościowe) z grupy 12 S-parametrów i funkcjonalne z grupy 13 V-parametrów ujęte w normie ISO 25178-2 (2012) [5, 6].

Z drugiej strony takie właściwości, jak tarcie i zużycie ściernie, zależą od wszystkich parametrów chropowatości 3D. Związki niektórych właściwości funkcjonalnych (odkształceń stykowych, tarcia, wytrzymałości zmęczeniowej i oporów przepływu) z parametrami profilu powierzchni 2D podaje (według stanu wiedzy z końca XX w.) B. Nowicki [8].

Oznaczenia parametrów chropowatości i falistości powierzchni stosowane w artykule

R_a	– średnie arytmetyczne odchylenie profilu
R_q	– średnie kwadratowe odchylenie profilu
R_p	– wysokość najwyższego wzniesienia profilu
R_{pm}	– średnia wysokość największego wzniesienia profilu chropowatości
R_t	– całkowita wysokość profilu (między szczytem najwyższego wierzchołka a najniższym zagłębieniem)
R_z	– największa wysokość profilu
R_{sk}	– współczynnik asymetrii (skośność profilu)
R_{ku}	– współczynnik spłaszczenia (skupienia) – kurtoza
R_{sm}	– średni odstęp pomiędzy wzniesieniami profilu (średnia szerokość rowków profilu)
R_{dq} ($R_{\Delta q}$)	– średnie kwadratowe pochylenie profilu
W_a	– średnia arytmetyczna rzędnych profilu falistości
$R_{mr}(c)$	– udział materiałowy profilu na wysokości c
$R_{\Delta a}$	– średnie arytmetyczne pochylenie profilu
$R_{\lambda a}$	– średnia długość fali profilu chropowatości
$R_{\lambda q}$	– średnia kwadratowa długość fali profilu chropowatości
P_c	– liczba lokalnych wniesień wewnątrz odcinka elementarnego
S_a	– średnie arytmetyczne odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia
S_q	– średnie kwadratowe odchylenie wysokości nierówności powierzchni od płaszczyzny odniesienia
S_{sk}	– współczynnik skośności rozkładu wysokości topografii (rzędnych) powierzchni
S_{ku}	– współczynnik skupienia rozkładu wysokości topografii (rzędnych) powierzchni
S_{sc}	– średnia arytmetyczna krzywizna wierzchołków nierówności powierzchni
$S_{\Delta a}$	– średnie arytmetyczne pochylenie nierówności powierzchni
$S_{\lambda l}$	– najmniejsza długość odcinka, na którym funkcja autokorelacji osiąga wartość 0,2
S_{dr}	– wskaźnik względnego przyrostu (rozwinienia) powierzchni
S_{td}	– odchylenie głównego kierunku tekstury powierzchni od osi 90° prostopadłej do kierunku zbierania danych
S_{vi}	– wskaźnik utrzymania środka smarowego przez wgłębienia położone poniżej rdzenia
Z	– wytrzymałość graniczna
ψ	– indeks plastyczności

TABLICA I. Fizyczna/funkcjonalna ważność niektórych parametrów chropowatości 2D i falistości powierzchni [6]: ●● wpływ istotny, ● wpływ mało istotny

Właściwości funkcjonalne	Parametry chropowatości								
	R_a, R_q	R_p, R_{pm}	R_t, R_z	R_{sk}	R_{ku}	R_{sm}	R_{dq} ($R_{\Delta q}$)	W_a	
Odkształcenia stykowe/ /sztywność stykowa	●		●●	●	●	●●	●	●	
Wytrzymałość zmęczeniowa	●	●	●●		●		●●		
Przewodność cieplna	●	●●				●●	●	●	
Przewodność elektryczna	●					●	●	●	
Refleksyjność			●●				●●		
Tarcie i zużycie	●		●●	●●	●●	●	●●	●	
Smarowanie	●	●	●●	●●	●		●	●●	
Szczelność mechaniczna	●		●●	●●			●●	●●	
Korozyja zmęczeniowa	●	●		●		●	●		
Tolerancje montażowe	●		●●				●	●●	

TABLICA II. Związki różnych grup parametrów chropowatości 2D i 3D z właściwościami funkcjonalnymi powierzchni [3, 11]: ●● wpływ istotny, ● wpływ zauważalny, ● wpływ mało istotny lub marginalny

Funkcja	Parametry chropowatości		Amplitudowe i kształt nierówności	Mieszane i krzywizna nierówności	Odległościowe	Ślady obróbkowe i kierunkowość
	Wysokościowe					
Związki funkcjonalne	Nośność	●●	●●	●	●	●●
	Szczelność	●●	●●	●●	●	●●
	Tarcie	●●	●●	●●	●●	●●
	Sztywność stykowa	●●	●●	●	●	●
	Połączenia ślizgowe (prowadnice)	●●	●●	●	●●	●●
	Kontakt elektryczny/ /termiczny	●●	●●	●●	●●	
	Zużycie	●●	●●	●●	●●	●●
	Odporność na zatarcie	●●	●	●●	●	
	Łączenie i adhezja	●●	●●	●	●	●
	Powłoki i plater	●●	●	●	●	
	Kształtowanie plastyczne	●●	●●	●●	●●	●●
	Zmęczenie	●●	●	●	●	●●
	Naprężenia kontaktowe i pękanie	●●	●	●		●●
	Refleksyjność	●●		●●	●	●
	Zastosowania biomedyczne	●●	●	●		
	Pomiar	Typowe parametry 2D	R_a, R_q, R_t	$R_{sk}, R_{ku}, R_{mr}(c)$	$R_{\Delta a}, R_{\Delta q}$, krzywizna wzniesienia	$R_{\lambda a}, R_{\lambda q}, P_c$, długość korelacji
Typowe parametry 3D		S_a, S_q	S_{sk}, S_{ku}, S_{sc}	$S_{\Delta a}, S_{sc}$	$S_{\lambda l}, S_{dr}$	S_{td}, S_{vi}

Jak wskazują dane zawarte w tabl. II, inaczej niż w przypadku zależności opartych na parametrach chropowatości 2D, w przypadku charakterystyki stereometrycznej 3D na funkcjonalność powierzchni ma wpływ układ geometryczny śladów obróbkowych i związana z nim kierunkowość struktury obrobionej powierzchni (parametr Std).

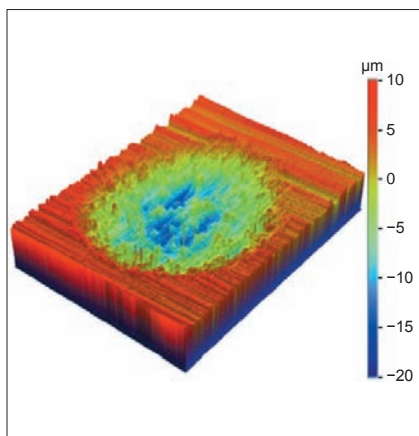
Wytrzymałość zmęczeniowa i zużycie zmęczeniowe (fretting)

Problem wpływu chropowatości powierzchni części maszyn na wytrzymałość zmęczeniową jest jednym z najstarszych zagadnień konstrukcyjnych [9]. W świetle obecnej wiedzy można ogólnie stwierdzić, że mniejsza chropowatość przyczynia się do wzrostu wytrzymałości zmęczeniowej, ale w zakresie wartości parametru $Ra = 2,5 \div 5 \mu\text{m}$ większy wpływ mają naprężenia własne i mikrostruktura materiału [14]. Przy braku naprężeń własnych chropowatość powierzchni $Ra > 0,1 \mu\text{m}$ ma silny wpływ na wytrzymałość zmęczeniową. W temperaturze pracy części powyżej 400°C wpływ naprężeń (wskutek ich relaksacji) i chropowatości powierzchni jest znacznie ograniczony. Trudność w ocenie wpływu topografii powierzchni na wytrzymałość zmęczeniową stwarza wymóg przygotowania próbek bez naprężeń własnych. Wskazuje się także na znaczny rozrzut wartości oszacowanej wytrzymałości zmęczeniowej – zwykle 20% dla powierzchni o tej samej wartości Ra .

W tabl. III przedstawiono wpływ amplitudowych parametrów chropowatości powierzchni Ra i Rt na wytrzymałość zmęczeniową części ze stali AISI 4140 (40Cr6). Na podstawie tych danych można stwierdzić, że powierzchnia szlifowana ma mniejszą wytrzymałość zmęczeniową w porównaniu z powierzchnią frezowaną wykończeniowo, co wynika z odmiennej struktury śladów obróbkowych. Wyraźnie korzystny jest natomiast efekt polerowania powierzchni w porównaniu ze szlifowaniem wykończeniowym. W wielu publikacjach zwraca się uwagę na fakt, że amplitudowe parametry – np. Rt i Rz – są lepszymi wskaźnikami wytrzymałości zmęczeniowej niż parametr Ra . Jednocześnie zaleca się, aby parametr wysokościowy Rt rozpatrywać łącznie z kurtozą Rku , ponieważ nie tylko głębokość rowków profilu powierzchni, lecz

TABLICA III. Zależność wytrzymałości zmęczeniowej od amplitudowych parametrów chropowatości powierzchni [12]

Parametr	$Ra, \mu\text{m}$	$Rt, \mu\text{m}$	Z, MPa
Rodzaj powierzchni			
Polerowana	0,1÷0,3	3÷5	775
Szlifowana	0,5÷1,4	7÷14	690
Frezowana wykończeniowo	1,0÷2,2	11÷15	775
Frezowana zgrubnie	1,1÷1,8	26÷34	773
Strugana wykończeniowo	27÷33	210÷280	620
Strugana zgrubnie	35÷44	360÷390	520



Rys. 2. Widok izometryczny śladu zużycia typu fretting na próbce z tytanu Ti-6Al-4V [14]

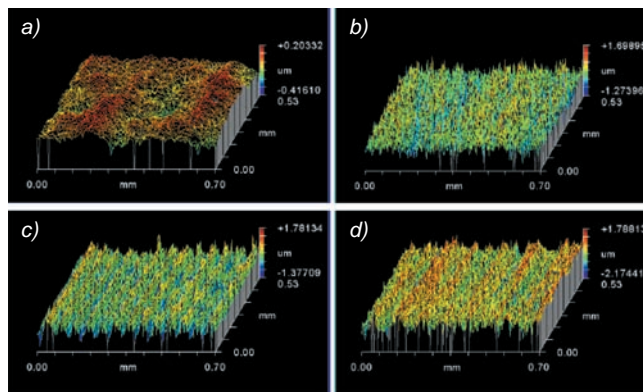
także ich kształt decydują o koncentracji naprężeń. Mimo że w większości procesów obróbki skrawaniem wytwarzane powierzchnie nie charakteryzują się rozkładem Gaussowskim ($Rsk \neq 0$ i $Rku \neq 3$), to zarówno Ra (Sa), jak i Rku (Sku) pełnią ważną rolę w kontrolowaniu zmęczenia powierzchni. Poza wymienionymi parametrami 2D również parametry 3D – np. Std (kierunkowość tekstury), Sal (długość autokorelacji powierzchni), objęściowe parametry Sci (wskaźnik retencji płynu w rdzeniu) i Svi (wskaźnik retencji płynu we wgłębieniach) czy parametr hybrydowy Ssc (średni arytmetyczny promień wierzchołków) – powinny być uwzględniane w doborze powierzchni elementów obciążonych zmiennie [13].

Wyjściowa topografia powierzchni wpływa także na intensywność zużycia ścierno-zmęczeniowego – określanego jako fretting [9] – które występuje w złączach i jest efektem mikroprzemieszczeń ich elementów (np. łożyska tocznego). Ubytki materiału powstają wskutek cyklicznego oddziaływania obciążeń. Na rys. 2 przedstawiono przestrzenny obraz śladu zużycia po próbie frettingu na urządzeniu kulowym z elektrodynamicznym napędem wibratora i przemieszczeniem kulki (elementu kontaktowego wykonanego ze stali łożyskowej AISI 52100) równym $200 \mu\text{m}$. Badano stop tytanu Ti-6Al-4V. Ustalono, że wyjściowa chropowatość powierzchni Ra , mieszcząca się w zakresie $0,25 \div 1,5 \mu\text{m}$, wpływa zarówno na współczynnik tarcia, jak i objętość zużycia (energii aktywacji zużycia), dlatego powinna być uwzględniana przy projektowaniu elementów narażonych na fretting [14].

Tarcie ślizgowe

Właściwości tribologiczne par trących ocenia się ilościowo na podstawie współczynnika tarcia, zużycia i trwałości tribologicznej [9]. Problem tarcia jest niezwykle ważny, ponieważ według szacunków ok. 30% światowej produkcji energii zużywa się na pokonanie różnych oporów tarcia. W celu zwiększenia trwałości użytkowej dwóch współpracujących elementów (np. w łożyskach, przekładniach, układzie „pierścienie tłokowe – cylinder”) zazwyczaj dąży się do zmniejszenia współczynnika tarcia.

W omawianym przykładzie rozpatrzono wpływ topografii powierzchni stali łożyskowej AISI 52100 wytwarzanej w precyzyjnych operacjach obróbki ścierniej i wiórowej – wygładzania izotropowego w pojemnikach, honowania, szlifowania



Rys. 3. Topografie powierzchni po: a) wygładzaniu w pojemniku, b) honowaniu, c) toczeniu na twardo, d) szlifowaniu [15]

TABLICA IV. Wartości przestrzennych parametrów chropowatości powierzchni (stal łożyskowa AISI 52100) i średniego współczynnika tarcia [15]

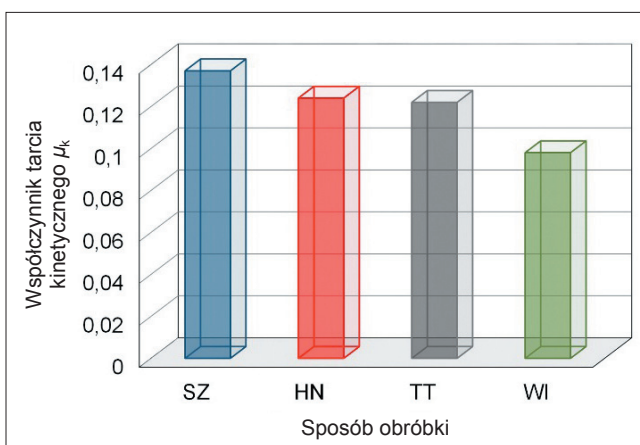
Rodzaj obróbki	$Sq, \mu\text{m}$	Sds, mm^{-2}	$Sal, \mu\text{m}$	$S\Delta q$	ψ	Średni współczynnik tarcia
Szlifowanie	0,424	5806,97	5,50	0,194	3,50	0,137
Honowanie	0,196	3009,71	6,59	0,119	2,15	0,124
Toczenie na twardo	0,331	61,11	48,51	0,201	3,62	0,122
Wygładzanie izotropowe	0,083	422,53	20,00	0,081	1,46	0,098

i toczenia na twardo. Widoki izometryczne poszczególnych powierzchni przedstawiono na rys. 3, a zmierzone wartości parametrów chropowatości powierzchni 3D zestawiono w tabl. IV. Próby tarcia przeprowadzono na urządzeniu typu *ball-on-flat* z kulką o twardości ok. 60 HRC.

Z rys. 4 wynika, że największy i najmniejszy współczynnik tarcia wyznaczono odpowiednio dla powierzchni szlifowanej i wygładzanej izotropowo – różnica pomiędzy wartością maksymalną i minimalną wynosi ok. 40%. Powierzchnie po honowaniu i toczeniu na twardo mają zbliżone właściwości tribologiczne. Dla powierzchni szlifowanej zmierzono największe wartości parametrów chropowatości S_q i S_{ds} , co potwierdza, że takie powierzchnie mają najwyższe nierówności i największą gęstość pików na jednostkę powierzchni. Z kolei dla powierzchni wygładzonej izotropowo parametr S_q jest o 75% mniejszy, a pików jest o 85% mniej. Z tych powodów współczynnik tarcia jest dla powierzchni szlifowanej o 27% większy niż dla powierzchni wygładzonej w pojemniku z kształtkami ściernymi. Powierzchnia honowana ma w porównaniu z powierzchnią toczoną mniejszą wartość S_q , ale prawie 50 razy więcej pików, co świadczy o silnym oddziaływaniu adhezyjnym i słabszym mechanicznym (odwrotnie jest dla powierzchni toczonej). Wartości długości autokorelacji powierzchni S_a wskazują, że w strukturze powierzchni toczonej i dogładzanej izotropowo występują składowe długookresowe. Należy dodać, że minimalne tarcie wyznaczone dla powierzchni wygładzonej izotropowo dobrze koresponduje ze zmierzonymi wartościami momentu obrotowego i temperatury pracy łożyska – są one odpowiednio o 20% i 40% mniejsze niż dla powierzchni szlifowanej [16]. W przypadku silnie anizotropowej powierzchni szlifowanej uwidacznia się efekt kierunkowości śladów obróbkowych i z tego względu współczynnik tarcia wzrasta o 44,5%, gdy próbę prowadzi się wzdłuż śladów, a nie prostopadle.

W tabl. IV podano także wartości tzw. indeksu plastyczności ψ , który określa, czy nierówności o pochyleniu $\Delta\alpha_q$ będą się odkształcać plastycznie w kontakcie ślizgowym – im bardziej wartość ψ przekracza 1, tym intensywniej będą się odkształcać plastycznie mikronierówności powierzchni. To kryterium preferuje również powierzchnię wygładzaną izotropowo o minimalnej wartości nachylenia nierówności $\Delta\alpha_q = 0,081$.

Praktyczne inżynierskie znaczenie może mieć uwzględnienie wpływu skośności i kurtozy na statyczny współczynnik tarcia. Wykazano [17], że dodatnia skośność wpływa na obniżenie współczynnika tarcia, natomiast w przypadku ujemnej skośności ($R_{sk} < 0$) tarcie jest bardziej intensywne niż dla rozkładu Gaussa ($R_{sk} = 0$, $R_{ku} = 3$). Gdy $R_{ku} > 3$, wpływ kurtozy jest odwrotny. Prowadzone na urządzeniu *pin-on-disc* badania tarcia powierzchni toczonych, frezowanych i szlifowanych ze stali łożyskowej 100Cr6, na sucho



Rys. 4. Wartości współczynnika tarcia dla różnych topografii powierzchni stali łożyskowej AISI 52100 [15]. Oznaczenia: SZ – szlifowanie, HN – honowanie, TT – toczenie, WI – wygładzanie

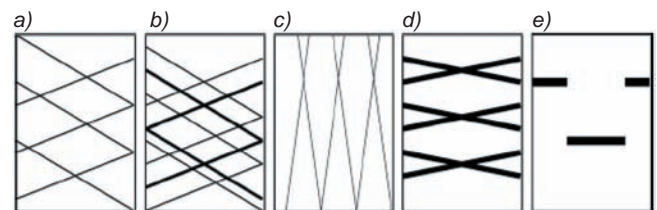
i ze smarowaniem, wykazały natomiast, że powierzchnia z ujemną skośnością powoduje zmniejszenie tarcia w obecności środka smarnego [18]. Efekt ten wystąpi też, gdy zredukowana głębokość wgłębień R_{vk} jest większa niż zredukowana wysokość pików R_{pk} ($R_{vk} > R_{pk}$).

Oporność na zużycie ściernie

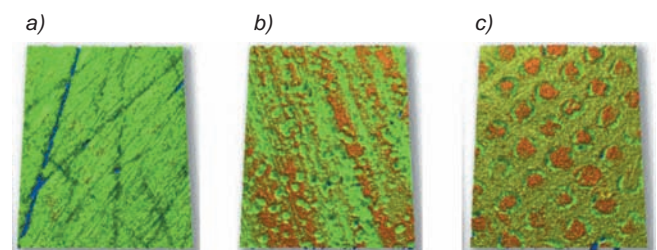
Rezultatem współpracy trących o siebie elementów jest zużywanie tribologiczne, które w dużym stopniu zależy od właściwości stereometrycznych powierzchni triboelementów zarówno w warunkach tarcia suchego, jak i ze smarowaniem [9]. Zmniejszenie intensywności zużywania się współpracujących cienne elementów jest ważnym zadaniem konstrukcyjnym i technologicznym.

Na rys. 5 przedstawiono rozwój technologii wytwarzania tulei cylindrowej: od tradycyjnej siatki śladów skrzyżowanych pod kątem 45° i podobnej siatki z dodatkowymi głębszymi rysami tworzącymi powierzchnię *plateau*, przez wykonywanie spiralnych rowków pod kątem 140° , do teksturowania laserowego zamiast tradycyjnej obróbki ścierniej. Spiralna siatka rowków zmniejsza o 40% zużycie tulei w porównaniu ze strukturą *plateau*, natomiast strukturyzowanie laserowe wydatnie zmniejsza tarcie i ogranicza ryzyko wystąpienia zatarcia [4]. Wykonanie uporządkowanej struktury rezerwarów oleju (rys. 5e) zamiast siatki zmniejsza zużycie w układzie „tuleja – pierścienie tłokowe” i pozwala zredukować 2+3 razy ilość potrzebnego oleju. Należy dodać, że do opisu powierzchni *plateau* według ISO 13565-3 zaleca się stosowanie trzech parametrów (zamiast pięciu parametrów funkcjonalnych – R_{pk} , R_k , R_{vk} , M_r1 i M_r2 według ISO 13565-2) wyznaczanych z dystrybuanty udziału materiałowego. Są to: nachylenie prostej regresji w obszarze *plateau* R_{pq} , nachylenie prostej regresji w obszarze wgłębień R_{vq} i względny udział materiałowy na przecięciu obszaru *plateau* i wgłębień R_{mq} [4, 19].

Strukturyzowanie laserowe jako sposób ograniczenia zużywania tribologicznego rozszerza się m.in. na pierścienie tłokowe, bieżnie łożyskowe, tarcze hamulcowe i tarcze sprzęgieł ciernych (rys. 6). Warto dodać, że w przypadku takich elementów tribologicznych, jak tarcze hamulcowe i sprzęgłowe, dąży się do zwiększenia współczynnika tarcia [9]. Do oceny tarcia i zużycia powierzchni przedstawionych na rys. 6 wykorzystano ich zależność od parametrów amplitudowych – skośności S_{sk} i kurtozy S_{ku} .



Rys. 5. Modyfikacja topografii powierzchni tulei cylindrowych w celu zmniejszenia zużycia [4]: a) honowanie jednozabiegowe, b) honowanie *plateau*, c) honowanie śrubowe, d) teksturowanie (honowanie) laserowe, e) uporządkowana struktura rezerwarów oleju



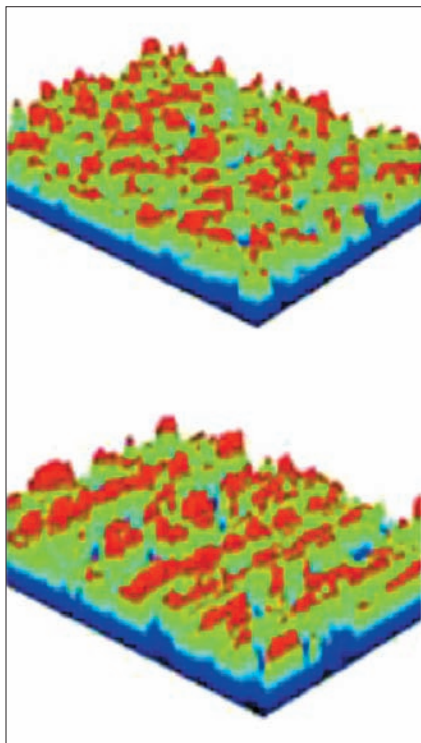
Rys. 6. Powierzchnie tarcz sprzęgłowych o różnych topografiach [20]: a) z siatką skrzyżowanych śladów, b) dogładzana (*microfinish*), c) strukturyzowana z regularnymi występnymi



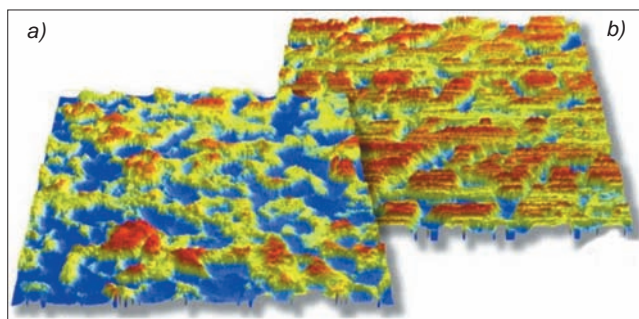
Łączenie obrabianych powierzchni

Z punktu widzenia możliwości łączenia powierzchni i nakładania powłok najważniejszym parametrem wydaje się rozwinięcie powierzchni Sdr (wyrażone w %) – z prostego powodu, a mianowicie dlatego, że rzeczywista powierzchnia styku ma większe znaczenie niż wartość parametru Sa (Sz). Należy przypomnieć, że dla idealnie płaskiej powierzchni $Sdr = 0$. Na rys. 7 porównano dwie powierzchnie o prawie jednakowej wartości parametru Sa , ale różniących się o 200% rozwinięciem powierzchni Sdr .

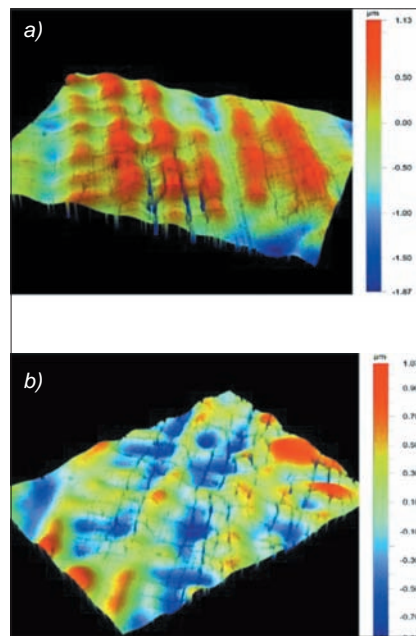
Praktyka i logika wskazują jednoznacznie, że powierzchnia o większym rozwinięciu będzie się mocniej łączyć z inną powierzchnią, a powlekanie będzie bardziej efektywne.



Rys. 7. Porównanie topografii dwóch powierzchni o zbliżonych wartościach parametru Sa i różniących się o prawie 200% wartościach rozwinięcia powierzchni Sdr [21]



Rys. 8. Porównanie topografii powierzchni: a) odpornej na korozję, b) podatnej na korozję [4, 21]



Rys. 9. Widoki izometryczne powierzchni frezowanych przedstawiające typowe, wywołane korozją naprężeniową pęknięcia: a) zlokalizowane pomiędzy sąsiednimi wzniesieniami, b) rozwijane pomiędzy śladami na wzniesieniach lub zboczach [22]

Odporność na korozję

Zasadniczo większa chropowatość powierzchni osłabia odporność korozyjną wskutek zwiększenia rzeczywistej powierzchni styku korodującego elementu [9]. Z tego względu największy wpływ na intensywność zużycia korozyjnego mają wysokościowe parametry chropowatości powierzchni (tabl. 1) i promień krzywizny wgłębieni mikronierówności. Ważną, choć negatywną rolę przypisuje się zgniotowi w warstwach przypowierzchniowych, który ułatwia tworzenie się mikroogniw korozyjnych.

Jak widać na rys. 8, powierzchnie podatne na korozję mają strukturę z dominacją głębszych dolin (rys. 8b), natomiast bardziej odporne na korozję – strukturę o większej anizotropowości (rys. 8a). W drugim przypadku rozkład chropowatości jest zbliżony do normalnego ($Ssk = 0$, $Sku = 3$) [4]. Odporność na korozję można również powiązać z kształtem krzywej udziału materiałowego powierzchni (wartością wskaźnika retencji płynu we wgłębieniach Svf). Powierzchnie z liniową krzywą udziału materiałowego są bardziej odporne na korozję niż powierzchnie z degresywno-progresywną charakterystyką udziału materiałowego i ujemną skośnością Ssk .

Rolę topografii powierzchni w rozwoju korozji naprężeniowej przedstawia rys. 9. W zależności od warunków frezowania czołowego i generowania naprężeń własnych pęknięcia mogą być zlokalizowane pomiędzy sąsiednimi wzniesieniami (rys. 9a) albo rozwijane pomiędzy śladami na wzniesieniach

lub zboczach (rys. 9b). W prowadzonych badaniach frezowania czołowego stali odpornej na korozję AISI 316Ti ustalono, że generowane są dwuosiowe naprężenia rozciągające, większe w kierunku ruchu narzędzia.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono stan wiedzy na temat wpływu chropowatości powierzchni na podstawowe właściwości funkcjonalne powierzchni części maszyn: wytrzymałość na zmęczenie, właściwości tribologiczne i korozyjne, przyczepność podłoża. Choć wiedza w tym obszarze nie jest kompletna, to jednak potwierdza istnienie licznych związków między parametrami 2D/3D chropowatości powierzchni i mierzalnymi wskaźnikami funkcjonalnych cech powierzchni. Generalnie można stwierdzić, że charakterystyka powierzchni oparta na jednym parametrze wysokościowym (Ra), a nawet na kilku takich parametrach (Ra , Rq , Rz , Rt), jest dalece niewystarczająca. Przykładowo, prognozowanie wytrzymałości zmęczeniowej musi dodatkowo uwzględniać parametry amplitudowe i hybrydowe (Rsk , Rku , Rdq) oraz kierunkowość śladów i strukturę powierzchni, co wymaga pomiarów parametrów 3D (Std , Sa). Wyzwaniem, jakie stoi przed instytucjami badawczymi, jest takie skorelowanie parametrów SGP z funkcjonalnymi cechami powierzchni, aby na podstawie pomiarów tych pierwszych można było przewidywać poszczególne właściwości użytkowe wytwarzanych części. Zdaniem autora krajowe zespoły badawcze powinny podjąć tę tematykę. O ile bowiem metrologia powierzchni jest dziedziną, która rozwija się dość dobrze, to inżynieria powierzchni nadal wymaga więcej uwagi.

LITERATURA

1. Grzesik W. „Polepszanie jakości technologicznej i użytkowej części z materiałów utwardzonych. Cz. II. Integracja skrawania na twardo i wykończeniowej obróbki ściernej”. *Mechanik*. Nr 8-9 (2011): s. 650÷657.
2. Grzesik W. „Polepszanie jakości technologicznej i użytkowej części z materiałów utwardzonych. Cz. III. Nagniatanie toczne i ślizgowe twardych stali”. *Mechanik*. Nr 7 (2012): s. 558÷563.
3. Grzesik W. „Wpływ obróbki sekwencyjnej na topografię powierzchni stali utwardzonej”. *Mechanik*. Nr 5-6 (2014): s. 350÷363.
4. Mathia T.G., Pawlus P., Wieczorowski M. “Recent trends in surface metrology”. *Wear*. Vol. 271 (2011): pp. 494÷508.
5. Jiang X.J., Whitehouse D.V. “Technological shifts in surface metrology”. *CIRP-Manufacturing Technology*. Vol. 61/1 (2012): pp. 815÷836.
6. Leach R. (ed.). “Characterization of areal surface texture”. Berlin: Springer, 2013.
7. Feld M. “*Technologia budowy maszyn*”. Warszawa: WNT, 1993.
8. Nowicki B. „*Struktura geometryczna powierzchni. Chropowatość i fałdowość powierzchni*”. Warszawa: WNT, 1991.
9. Burakowski T. „*Areologia. Podstawy teoretyczne*”. Radom: Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, 2013.
10. Whitehouse D.J. “Function maps and the role of surfaces”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Vol. 41 (2001): pp. 1847÷1861.
11. Griffiths B. “*Manufacturing Surface Technology*”. London: Penton Press, 2001.
12. Novocic D., Dewes R.C., Aspinwall D.K., Voice W., Bowen P. “The effect of machined topography and integrity on fatigue life”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. Vol. 44 (2004): pp. 125÷134.
13. Stout K.J., Blunt L. “*Three dimensional surface topography*”. London: Penton Press, 2000.
14. Kubiak K.J., Liskiewicz T.W., Mathia T.G. “Surface morphology in engineering applications: influence of roughness on sliding and wear in dry fretting”. *Tribology International*. Vol. 44 (2011): pp. 1427÷1432.
15. Sing R., Melkote S.N., Hashimoto F. “Frictional response of precision finished surfaces in pure sliding”. *Wear*. Vol. 258 (2005): pp. 1500÷1509.
16. Hashimoto F., Melkote S.N., Singh R., Kalil R. “Effect of finishing methods on surface characteristics and performance of precision components in rolling/sliding contact”. *Proceedings of 10th International Workshop on Modeling of Machining Operations*. Sintra, 2010: pp. 21÷26.
17. Tayebi N., Polycarpou A.A. “Modeling the effect of skewness and kurtosis on the static coefficient of rough surfaces”. *Tribology International*. Vol. 37 (2004): pp. 491÷505.
18. Sedlacek M., Podgornik B., Vizitin J. “Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear”. *Wear*. Vol. 266 (2009): pp. 482÷487.
19. Adamczak A. „*Pomiary geometryczne powierzchni*”. Warszawa: WNT, 2008.
20. Zecchino M. “*Characterizing surface quality: Why average roughness is not enough*”, www.veeco.com (dostęp: 2003).
21. Novak M. “Surface metrology: measuring form and function”. *American Machinist*. www.americanmachinist.com (dostęp: 16.02.2012).
22. Lyon K.L., Marrow T.J., Lyon S.B. “Influence of milling on the development of stress corrosion cracks in austenitic stainless steel”. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 218 (2015): pp. 32÷37. ■