

Prof. dr hab. inż. Wit GRZESIK (Politechnika Opolska):

## MOŻLIWOŚCI PROGNOZOWANIA WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNYCH CZĘŚCI MASZYN NA PODSTAWIE CECH TOPOGRAFII POWIERZCHNI

### Streszczenie

Przedstawiono obecne możliwości oceny i prognozowania właściwości funkcjonalnych powierzchni wytwarzanych w różnych procesach obróbki ubytkowej na podstawie parametrów chropowatości powierzchni 2D i 3D. Zamieszczono przykłady topografii powierzchni o różnych właściwościach funkcjonalnych, m.in.: wytrzymałości zmęczeniowej, właściwościach tribologicznych (związanych z tarciem ślizgowym i zużyciem ściernym) czy przyczepności adhezyjnej. Dla każdego z przykładów podano zbiory istotnych parametrów chropowatości powierzchni oraz warunki ubytkowego kształtowania powierzchni.

**Słowa kluczowe:** *topografia powierzchni, właściwości eksploatacyjne, właściwości tribologiczne, przyczepność adhezyjna*

## POSSIBILITIES OF PREDICTION OF PERFORMANCE PROPERTIES OF MACHINE PARTS ON THE BASIS OF SURFACE TOPOGRAPHY CHARACTERISTICS

### Abstract

The article presents the current possibilities of assessment and prediction of functional properties of surfaces manufactured in various removal machining processes on the basis of roughness parameters of 2D and 3D surfaces. It contains examples of topography of surfaces with different functional properties, including: fatigue strength, tribological properties (connected with sliding friction and abrasive wear) or adhesion. For each example, sets of relevant surface roughness parameters and conditions of removal surface forming have been given.

**Keywords:** *surface topography, performance properties, tribological properties, adhesion*

# MOŻLIWOŚCI PROGNOZOWANIA WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNYCH CZĘŚCI MASZYN NA PODSTAWIE CECH TOPOGRAFII POWIERZCHNI

Wit GRZESIK<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Praktyczne możliwości polepszania jakości technologicznej i użytkowej części funkcjonalnie ważnych w wykańczających operacjach obróbki wiórowej, ściernej i nagniatania podano w publikacjach [1-3]. Do ich oceny wykorzystano zarówno parametry profilu powierzchni (2D) jak i charakterystyki stereometryczne chropowatości powierzchni z grupy S i V (3D), które decydują o właściwościach funkcjonalnych. Pomimo rozwiniętych technik w metrologii powierzchni nadal brak jest metodycznego podejścia do przewidywania funkcjonalności wyrobów w oparciu o pomiary chropowatości powierzchni 2D i 3D. Inżynier mechanik musi mieć świadomość, że w projektowaniu i wytwarzaniu elementów maszyn ważne są nie tylko tolerancje wymiarów i dokładność kształtu, ale powiązania funkcjonalności powierzchni z jej stanem geometrycznym, który jest jednym z elementów struktury geometrycznej powierzchni (SGP). Funkcjonalność elementów maszyn dotyczy takich właściwości jak: wytrzymałość zmęczeniowa, odporność na zużycie i korozję, naciski kontaktowe (wytrzymałość stykową), opory przepływu, czy szczelność połączeń.

Obecnie inżynierowie mają do dyspozycji liczne narzędzia umożliwiające ocenę i symulację takich związków, a w szczególności 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 możliwe jest przewidzenie jak zachowa się powierzchnia części we współpracy i jak spełni założone funkcje w eksploatacji [4-6]. Naczelną zasadą jest integracja funkcjonalności powierzchni

---

<sup>1</sup> Politechnika Opolska, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, 45-271 Opole, Mikołajczyka 5

z zachowaniem się części w czasie eksploatacji, co zgodnie z polską terminologia techniczną określa się mianem jakości technologicznej i eksploatacyjnej [7]. Stan wiedzy odnośnie możliwości prognozowania funkcjonalności powierzchni na podstawie warunków obróbki przedstawił B. Nowicki w pracy [8]. Wytwarzanie i użytkowanie warstw powierzchniowych jest szczegółowo opisane przez T. Burakowskiego w aerologii [9], czyli nowego działu nauki i techniki równoważnego inżynierii powierzchni.

Tabela 1. Fizykalna/funkcjonalna ważność niektórych parametrów chropowatości 2D i falistości powierzchni [6]. Oznaczenia: \*\* wpływ istotny, \* wpływ mało istotny

Właściwości funkcjonalne	$Ra, Rq$	$Rp, Rpm$	$Rt, Rz$	$Rsk$	$Rku$	$Rsm$	$Rdq (R\Delta q)$	$Wa$
Odkształcenia stykowe/Sztywność stykowa	*		**	*	*	**	*	*
Wytrzymałość zmęczeniowa	*	*	**	-	*	-	**	-
Tarcie i zużycie	*	-	**	**	**	*	**	*
Smarowanie	*	*	**	**	*	-	*	**
Szczelność mechaniczna	*	-	**	**	-	-	**	**
Korozyja zmęczeniowa	*	*	-	*	-	*	*	-
Tolerancje montażowe	*	-	**	-	-	-	*	**

Trudności, jakie inżynieria powierzchni napotyka w powiązaniu jakości technologicznej i eksploatacyjnej są obecnie zbyt duże, aby prognozować poszczególne właściwości eksploatacyjne na podstawie zmierzonych parametrów chropowatości powierzchni. Zasadniczo jest możliwe przypisanie różnych reżimów funkcjonalnych odpowiednim, granicznym zmianom parametrów chropowatości powierzchni [10]. W przypadku zagadnień kontaktowych i tarcia obszary te są wydzielane w oparciu o bezwymiarowe parametry w układzie współrzędnych - odstęp między kontaktującymi się powierzchniami i prędkość ruchu.

W tabl. 1 i 2 zestawiono ważniejsze korelacje między właściwościami funkcjonalnymi obrabianych powierzchni a parametrami chropowatości powierzchni. Należy dodać, że w większości opierają się one na klasycznym pomiarze profilu powierzchni. W tabl. 1 przedstawiono związki między właściwościami fizykalnymi i funkcjonalnymi powierzchni a parametrami chropowatości 2D i falistością powierzchni. Można zauważyć, że oprócz parametrów wysokościowych i amplitudowych istotne znaczenie dla funkcjonalności powierzchni mają także parametry poziome (średnia szerokość rowków profilu  $Rsm$ ) i mieszane (średnie pochYLENIE Wzniesień profilu  $R\Delta q$ ). W przypadku smarowania, uszczelnienia i tolerancji montażowych większe znaczenie od wysokościowych parametrów  $Ra$  i  $Rq$  ma falistość (średnia arytmetyczna rzędnych profilu falistości –  $Wa$ ).

Tabela 2. Związki różnych grup parametrów chropowatości 2D i 3D z właściwościami funkcjonalnymi powierzchni [3, 11]. Oznaczenia: \*\*\* wpływ istotny, \*\*zauważalne oznaki wpływu, \* wpływ mało istotny lub marginalny

Z W I A Z K I  F U N K C J O N A L N E	Funkcja	Wysokościowe	Amplitudowe i kształt nierówności	Mieszane i krzywizna nierówności	Odległościowe	Ślady obróbkowe i kierunkowość
	Nośność	***	***	**	**	***
	Szczelność	***	***	***	**	***
	Tarcie	***	***	***	***	***
	Sztynność stykowa	***	***	**	**	**
	Połączenia ślizgowe (przewadnice)	***	***	**	***	***
	Zużycie	***	***	***	***	***
	Odporność na zatarcie	***	**	***	*	-
	Zmęczenie	***	**	*	*	***
	Naprężenia kontaktowe i pękanie	***	*	**	-	***
P O M I A R	Typowe parametry 2D	$Ra, Rq, Rt$	$Rsk, Rku, Rmr(c)$	$R\Delta a, R\Delta q$ , krzywizna wzniesienia	$R\lambda a, R\lambda q, PC$ , długość korelacji	zaden
	Typowe parametry 3D	$Sa, Sq$	$Ssk, Sku, Ssc$	$S\Delta a, Ssc$	$Sal, Sdr$	$Std, Svi$

W tabl. 2 podano możliwy wpływ poszczególnych grup parametrów 2D i 3D na różne właściwości funkcjonalne powierzchni. Wskazują one jednoznacznie, że decydujące znaczenie mają parametry amplitudowe (wysokościowe) z grupy 12 S-parametrów i funkcjonalne z grupy 13 V-parametrów ujęte w normie ISO 25178-2 (2012) [5,6].

N uwagę zasługuje fakt, że 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) według stanu wiedzy z końca XX w. podaje Nowicki [8]. Z zestawienia związków korelacyjnych w tabl. 2 wynika, że w odróżnieniu od zależności opartych na parametrach chropowatości 2D, w przypadku charakterystyki stereometrycznej 3D na funkcjonalność powierzchni ma wpływ układ geometryczny śladów obróbkowych i związana z nimi kierunkowość struktury obrobionej powierzchni (parametr *Std*).

## 2. WYTRZYMAŁOŚĆ ZMĘCZENIOWA I ZUŻYCIE ZMĘCZENIOWE (FRETTING)

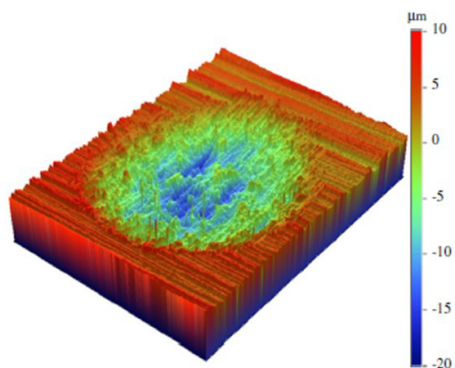
Problem wpływu chropowatości powierzchni części maszyn na wytrzymałość zmęczeniową jest jednym z najstarszych zagadnień konstrukcyjnych [9]. W świetle obecnej wiedzy można ogólnie stwierdzić, że mniejsza chropowatość przyczynia się do wzrostu wytrzymałości zmęczeniowej, ale w zakresie wartości parametru  $Ra = 2,5 \div 5 \mu\text{m}$  większy wpływ mają naprężenia własne i mikrostruktura materiału [14]. W przypadku braku naprężeń własnych, chropowatość powierzchni  $Ra > 0,1 \mu\text{m}$  ma silny wpływ na wytrzymałość zmęczeniową. W temperaturze pracy części powyżej  $400^\circ\text{C}$  wpływ naprężeń (wskutek ich relaksacji) i chropowatości powierzchni jest znacznie zmniejszony. Trudnością w ocenie wpływu topografii powierzchni na wytrzymałość zmęczeniową jest 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. 3 przedstawiono wpływ amplitudowych parametrów chropowatości powierzchni  $Ra$  i  $Rt$  na wytrzymałość zmęczeniową części ze stali AISI 4140 (40Cr6).

Tabela 3. Zależność wytrzymałości zmęczeniowej od amplitudowych parametrów chropowatości powierzchni [12]

Rodzaj obróbki powierzchni	Parametr $Ra$ [ $\mu\text{m}$ ]	Parametr $Rt$ [ $\mu\text{m}$ ]	Wytrzymałość graniczna $Z$ [MPa]
Polerowanie	0,1 ÷ 0,3	3 ÷ 5	775
Szlifowanie	0,5 ÷ 1,4	7 ÷ 14	690
Frezowanie wykańczające	1,0 ÷ 2,2	11 ÷ 15	775
Frezowanie zgrubne	1,1 ÷ 1,8	26 ÷ 34	773

Na podstawie danych zestawionych w tabl. 3 można stwierdzić, że powierzchnia szlifowana ma mniejszą wytrzymałość zmęczeniową od powierzchni frezowanej wykańczająco wskutek odmiennej struktury śladów obróbkowych i zdecydowanie większej wysokości chropowatości powierzchni  $Rt$ . Natomiast wyraźnie korzystny jest efekt polerowania powierzchni w porównaniu ze szlifowaniem wykańczającym, który prowadzi do zmniejszenia wartości parametru  $Rt$ .

Wielu badaczy dostrzega, że amplitudowe parametry takie jak  $Rt$  i  $Rz$  są lepszymi wskaźnikami wytrzymałości zmęczeniowej niż parametr  $Ra$ . Ponadto zaleca się łączną ocenę parametru wysokościowego  $Rt$  i kurtozy  $Rku$ , ponieważ nie tylko głębokość rowków profilu powierzchni, ale ich kształt decydują o koncentracji naprężeń.



Rys. 1. Ślad zużycia typu fretting na próbce z tytanu Ti-6Al-4V [14]

Ponieważ w większości procesów obróbki skrawaniem wytwarza się powierzchnie o rozkładzie nie Gaussowskim ( $Rsk\#0$  i  $Rku\#3$ ), to zarówno  $Ra$  ( $Sa$ ) jak i  $Rku$  ( $Sku$ ) pełnią ważną rolę w kontrolowaniu zmęczenia powierzchni. Poza wymienionymi parametrami 2D, także parametry 3D, takie jak kierunkowość tekstury  $Std$ , długość autokorelacji powierzchni  $Sal$ , objętościowe parametry  $Sci$  (wskaźnik retencji płynu w rdzeniu) i  $Svi$  (wskaźnik retencji płynu we wgłębieniach), a także parametr hybrydowy  $Ssc$  (średni arytmetyczny promień wierzchołków) powinny być uwzględniane w doborze powierzchni elementów obciążonych zmiennie [13].

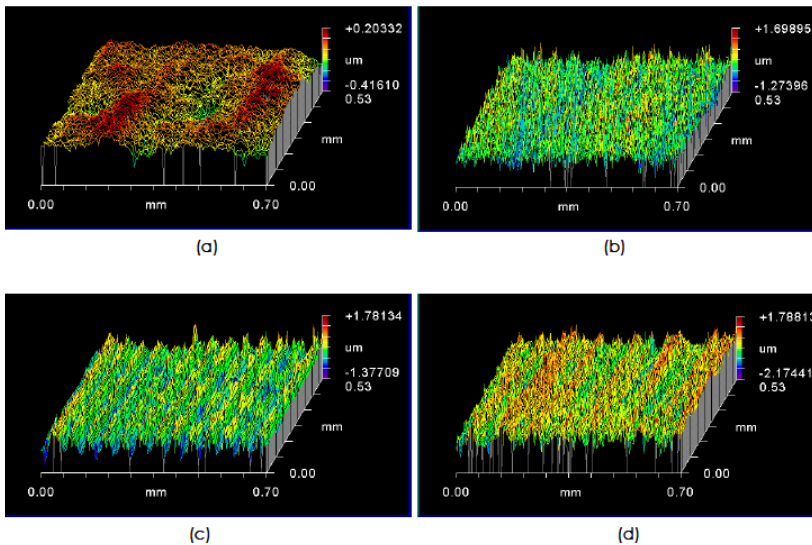
### 3. TARCIE ŚLIZGOWE

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, w układzie pierścienie tłokowe-cylinder, dąży się do najczęściej 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 (WI), honowania (H), szlifowania (SZ) i toczenia na twardo (TT). Widoki izometryczne poszczególnych powierzchni przedstawiono na rys.2, a zmierzone wartości parametrów chropowatości powierzchni 3D zestawiono w tabl. 4. Próby tarcia przeprowadzono na urządzeniu typu *ball-on-flat* ( kulka po płaszczyźnie) z kulką o twardości około 60 HRC.

Tabela 4. Wartości przestrzennych parametrów chropowatości powierzchni wytwarzanych na stali łożyskowej AISI 52100 i średniego współczynnika tarcia [15]

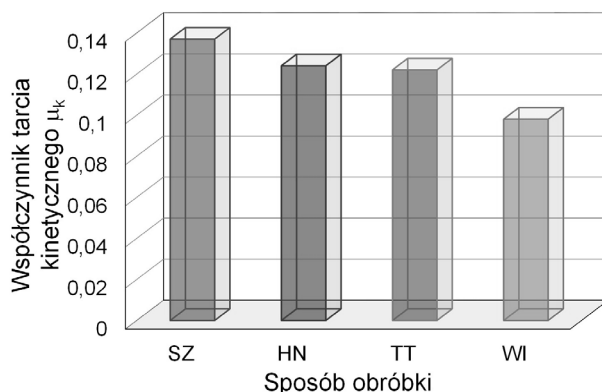
Rodzaj obróbki	$Sq$ ( $\mu\text{m}$ )	$Sds$ ( $\text{mm}^{-2}$ )	$Sal$ ( $\mu\text{m}$ )	$S\Delta q$	Indeks plastyczności $\psi$	Średni współczynnik tarcia
Szlifowanie	0,424	5806,97	5,50	0,194	3,50	0,137
Honowanie	0,196	3009,71	6,59	0,119	2,15	0,124
Toczenie na twardo	0,331	61,11	48,51	0,201	3,62	0,122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



Rys. 2. Topografie powierzchni po wyglądaniu w pojemniku (a), honowaniu (b), toczeniu na twardo (c) i szlifowaniu (d) [15]

Z rys. 3 wynika, że największy i najmniejszy współczynnik tarcia wyznaczono odpowiednio dla powierzchni szlifowanej i wyglądanej izotropowo. Wzrost wartości współczynnika tarcia jest rzędu 40% (dane w tabl. 4). Powierzchnie po honowaniu i toczeniu na twardo mają zbliżone właściwości tribologiczne. Można zauważyć, że dla powierzchni szlifowanej zmierzono największe wartości parametrów chropowatości  $Sq$  i  $Sds$ , które potwierdzają, że takie powierzchnie mają najwyższe nierówności

i największą gęstość pików na jednostkę powierzchni. Z kolei dla powierzchni wygładzonej izotropowo parametr  $Sq$  jest o 75% mniejszy, a pików jest o 85% mniej.



Rys. 3. Wartości współczynnika tarcia dla różnych topografii powierzchni stali łożyskowej AISI 52100 [15]. Sz- szlifowanie, HN- honowanie, TT- toczenie, WI- wygładzanie

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  $Sq$ , ale prawie 50 razy więcej pików, a więc silne oddziaływanie adhezyjne i słabsze mechaniczne (odwrotnie jest dla powierzchni toczonej). Wartości długości autokorelacji powierzchni  $Sal$  w tabl. 4 potwierdzają, że w strukturze powierzchni toczonej i dogładzanej izotropowo występują składowe długookresowe. Należy dodać, że minimalne tarcie wyznaczone dla powierzchni wygładzonej izotropowo dobrze koreluje ze zmierzonym momentem obrotowym i temperaturą pracy łożyska – są 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 zamiast prostopadle-wzdłuż śladów. W tabl. 4 podano także wartości tzw. indeksu plastyczności  $\psi$ , który określa czy nierówności o pochyleniu  $S\Delta q$  będą się odkształcać plastycznie w kontakcie ślizgowym- im więcej wartość  $\psi$  przekracza 1, tym intensywniej mikronierówności powierzchni będą odkształcać się plastycznie. To kryterium również preferuje powierzchnię wygładzaną izotropowo o minimalnej wartości nachylenia nierówności  $S\Delta q=0,081$ .

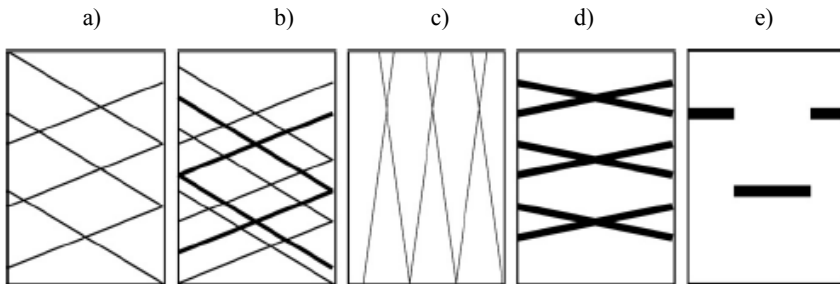
Praktyczne inżynierskie znaczenie może mieć uwzględnienie wpływu skośności i kurtozy na statyczny współczynnik tarcia. Wykazano [17], że dodatnia skośność wpływa na obniżenie współczynnika tarcia, natomiast w przypadku ujemnej skośności ( $Rsk<0$ ) tarcie jest bardziej intensywne niż dla rozkładu Gaussa ( $Rsk=0$ ,  $Rsk=3$ ).



Wpływ kurtozy, gdy  $Rku > 3$  jest odwrotny. Badania tarcia na urządzeniu *pin-on-disc* (trzcina po tarczy) powierzchni toczonych, frezowanych i szlifowanych ze stali łożyskowej 100Cr6, na sucho i ze smarowaniem, wykazały natomiast, że powierzchnia z ujemną skośnością powoduje zmniejszenie tarcia z obecnością środka smarnego [18]. Również, efekt ten wystąpi, jeśli zredukowana głębokość wgłębień  $Rvk$  jest większa niż zredukowana wysokość pików  $Rpk$  ( $Rvk > Rpk$ ).

#### 4. ODPORNOŚĆ NA ZUŻYCIE ŚCIERNE

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

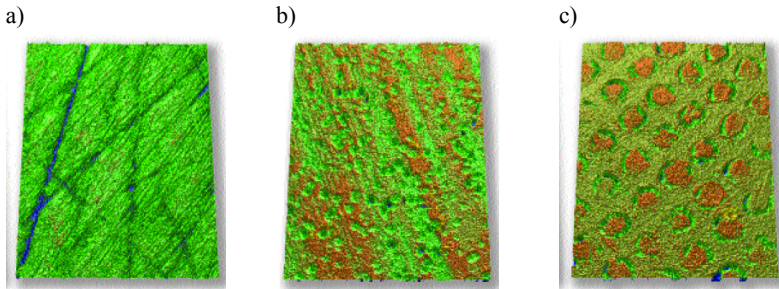


Rys. 4. Modyfikacja topografii powierzchni tulei cylindrowych w celu zmniejszenia zużycia [4]. Honowanie jednozabiegowe (a), honowanie plateau (b), honowanie śrubowe (c), teksturuwanie (honowanie) laserowe (d), uporządkowana struktura rezerwuarów oleju (e)

Na rys. 4 przedstawiono rozwój technologii wytwarzania tulei cylindrowej (ang. cylinder liner) począwszy od tradycyjnej siatki śladów skrzyżowanych pod kątem  $45^{\circ}$ , z dodatkowymi głębszymi rysami tworzącymi powierzchnię plateau, wykonywania spiralnych rowków pod kątem  $140^{\circ}$ , aż do teksturuwania laserowego zamiast tradycyjnej obróbki ścierniej. Spiralna siatka rowków zmniejsza o 40% zużycie tulei w porównaniu ze strukturą plateau, natomiast strukturyzowanie laserowe zmniejsza wydatnie tarcie i ogranicza ryzyko wystąpienia zatarcia [4].

Wykonanie uporządkowanej struktury rezerwuarów oleju (rys. 4e) zamiast siatki zmniejsza zużycie w układzie tuleja-pierścienie tłokowe i pozwala zredukować 2-3 razy zużycie oleju. Należy dodać, że do opisu powierzchni plateau według ISO 13565-3 zaleca się stosować (zamiast pięciu parametrów funkcjonalnych –  $Rpk$ ,  $Rk$ ,  $Rvk$ ,  $Mr1$  i  $Mr2$  według ISO 13565-2) trzy parametry wyznaczone z dystrybuanty udziału materiałowego – nachylenie prostej regresji w obszarze plateau  $Rpq$ , nachylenie

nie prostej regresji w obszarze wgłębień  $Rvq$  i względny udział materiałowy na przecięciu obszaru plateau i wgłębień  $Rmq$  [4, 19].

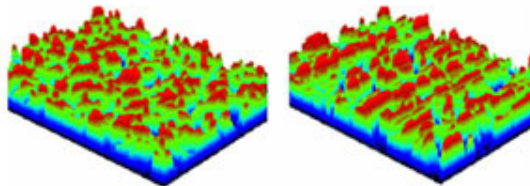


Rys. 5. Powierzchnie tarcz sprzęgłowych o różnych topografiach [20]: a) z siatką skrzyżowanych śladów, b) dogładzana (microfinish), c) strukturyzowana z regularnymi występami

Strukturyzowanie laserowe jako sposób ograniczenia zużycia tribologicznego rozszerza się m.in. na pierścienie tłokowe, bieżnie łożyskowe, tarcze hamulcowe i tarcze sprzęgieł ciernych (rys. 5c). Należy tu dodać, że w przypadku takich elementów tribologicznych jak tarcze hamulcowe i sprzęgłowe dąży się do zwiększenia współczynnika tarcia [9]. W przypadku oceny tarcia i zużycia powierzchni przedstawionych na rys. 5 wykorzystano ich zależność od parametrów amplitudowych - skości  $Ssk$  i kurtozy  $Sku$ .

## 5. ŁĄCZENIE OBRABIANYCH POWIERZCHNI

W przypadku łączenia powierzchni i nakładania najważniejszym wydaje się być rozwinięcie powierzchni  $Sdr$  wyrażane w %, z prostego powodu, że rzeczywista powierzchnia styku jest ważniejsza niż wartość parametru  $Sa$  ( $Sz$ ). Należy przypomnieć, że dla idealnie płaskiej powierzchni  $Sdr=0$ . Na rys. 6 przedstawiono dwie powierzchnie o prawie jednakowej wartości parametru  $Sa$ , ale różniących się o 200% rozwinięciu powierzchni  $Sdr$ .



Rys. 6. Porównanie topografii powierzchni o zbliżonej wartości parametru  $Sa$ , ale różniących się o prawie 200% wartości rozwinięcia powierzchni  $Sdr$  [21]

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

## 7. PODSUMOWANIE

W artykule omówiono stan wiedzy w zakresie wpływu chropowatości powierzchni na podstawowe właściwości funkcjonalne powierzchni maszyn, takie jak wytrzymałość na zmęczenie, właściwości tribologiczne i przyczepność podłoża przy nakładaniu powłok. Chociaż wiedza nie jest kompletna to bezspornie istnieją liczne związki korelacyjne między parametrami 2D/3D chropowatości powierzchni i mierzalnymi wskaźnikami funkcjonalnych cech powierzchni. Generalnie można stwierdzić, że charakterystyka powierzchni oparta na jednym ( $Ra$ ) lub nawet kilku ( $Ra$ ,  $Rq$ ,  $Rz$ ,  $Rt$ ) parametrach wysokościowych 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 ( $Std$ ,  $Sal$ ). Dokonana ocena możliwości prognozowania funkcjonalności powierzchni na podstawie danych o topografii powierzchni jest sygnałem do podjęcia tej tematyki przez zespoły badawcze w kraju.

## LITERATURA

- [1] GRZESIK W., *Polepszanie jakości technologicznej i użytkowej części z materiałów utwardzonych. Cz. II. Integracja skrawania na twardo i wykończeniowej obróbki ściernej*, Mechanik, 8-9, 2011, 650-657.
- [2] GRZESIK W., *Polepszanie jakości technologicznej i użytkowej części z materiałów utwardzonych. Cz. II. Nagniatanie toczne i ślizgowe twardych stali*, Mechanik, 7, 2012, 558-563.
- [3] GRZESIK W., *Wpływ obróbki sekwencyjnej na topografię powierzchni stali utwardzonej*, Mechanik, 5-6, 2014, 350-363.
- [4] MATHIA T.G., PAWLUS P., M WIECZOROWSKI., *Recent trends in surface metrology*, Wear, 271, 2011, 494-508.
- [5] JIANG X.J., WHITEHOUSE D.V., *Technological shifts in surface metrology*, CIRP-Manufacturing Technology, 61/1, 2012, 815-836.
- [6] LEACH R., *Characterization of areal surface texture*, Springer, Berlin, 2013.
- [7] FELD M., *Technologia budowy maszyn*, WNT, Warszawa, 1993.
- [8] NOWICKI B., *Struktura geometryczna. Chropowatość i falistość powierzchni*, WNT, Warszawa, 1991.
- [9] BURAKOWSKI T., *Areologia. Podstawy teoretyczne*. Wydawnictwo Naukowe Instytutu Technologii Eksploatacji, Radom, 2013.
- [10] WHITEHOUSE D. J., *Function maps and the role of surfaces*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41, 2001, 1847-1861.
- [11] GRIFFITHS B., *Manufacturing Surface Technology*, Penton Press, London, 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, 44, 2004, 125-134.
- [13] STOUT K.J., BLUNT L., Three dimensional surface topography. Penton Press, London, 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, 44, 2011, 1427-1432.
- [15] SING R., MELKOTE S.N., HASHIMOTO F., *Frictional response of precision finished surfaces in pure sliding*, Wear, 258, 2005, 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 10<sup>th</sup> International Workshop on Modeling of Machining Operations, Sintra, 2010, 21-26.
- [17] TAYEBI N., POLYCARPOU A.A., *Modeling the effect of skewness and kurtosis on the static coefficient of rough surfaces*, Tribology International, 37, 2004, 491-505.
- [18] SEDLACEK M., PODGORNIK B., VIZITIN J., *Influence of surface preparation on roughness parameters, friction and wear*, Wear, 266, 2009, 482-487.
- [19] ADAMCZAK A., *Pomiary geometryczne powierzchni*, WNT, Warszawa, 2008.
- [20] ZECCHINO M., *Characterizing surface quality: Why average roughness is not enough*, 2003, [www.veeco.com](http://www.veeco.com).
- [21] NOVAK M., *Surface metrology: measuring form and function*, American Machinist, 16 luty, 2012, [www.americanmachinist.com](http://www.americanmachinist.com).