

Dr inż. Ireneusz Piotr CHMIELIK
Taylor Hobson Polska

DOI: 10.17814/mechanik.2015.7.219

Dr hab. inż. Henryk CZARNECKI, prof. PCz
Instytut Marketingu
Politechnika Częstochowska

OCENA TOPOGRAFII 3D POWIERZCHNI ZĘBA KOŁA ZĘBATEGO

Streszczenie: W opracowaniu przedstawiono możliwości pomiaru struktury geometrycznej powierzchni koła zębatego z wykorzystaniem profilografometru Taylor Hobson. Dokonano pomiarów przykładowych kół po obróbce szlifowaniem i nagniataniem dynamicznym. Przedstawiono przykładowe możliwości prowadzenia eksperymentu i sposobu jego realizacji oraz określenia parametrów.

EVALUATION OF GEAR TOOTH 3D SURFACE TOPOGRAPHY

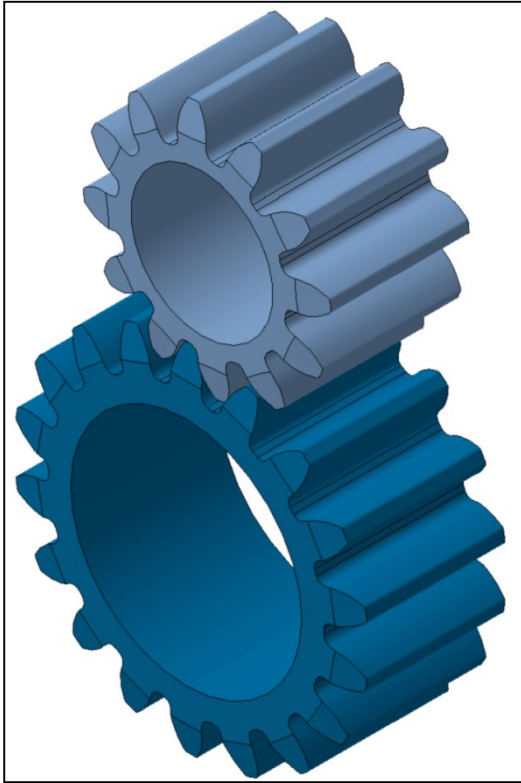
Abstract: This paper presents the possibility of measurements gear wheel surface geometrical structure using profilometer Taylor Hobson. Sample measurements were taken after such kinds of treatment like: grinding and dynamic burnishing. Article provides an examples how to conduct and implement experiment and how to define parameters.

Słowa kluczowe: struktura geometryczna powierzchni zęba
Keywords: gear tooth surface geometrical structure

1. WPROWADZENIE

Koła zębate są to elementy maszyn służące do przenoszenia ruchu obrotowego lub posuwowego bez poślizgu, za pomocą zębów rozmieszczonych na obwodach dwóch współpracujących kół (rys. 1) lub koła i listwy zębatej. Przekładnie zębate znajdują bardzo szerokie zastosowanie praktycznie we wszystkich dziedzinach techniki i stanowią obecnie najliczniejszą i najbardziej rozpowszechnioną grupę przekładni mechanicznych. Główną zaletą tych przekładni jest możliwość ich stosowania zarówno do przenoszenia wielkich mocy, jak i do przekazywania ruchu obrotowego w mechanizmach precyzyjnych, gdzie obciążenia przenoszone przez takie przekładnie mogą być niewielkie [10, 12]. Coraz większe przenoszone moce przy minimalizacji gabarytów stawiają przed konstruktorami i technologami nowe wyzwania kształtowania właściwości warstwy wierzchniej pozwalającej na zwiększone wyciążenie tych elementów maszyn.

Wzajemny ruch kół zębatach, a przez to wzajemny kontakt poszczególnych powierzchni ich zębów, wywołuje zmiany mechaniczne, eksploatacyjne oraz fizykochemiczne warstwy wierzchniej w obrębie mikro- oraz makroobszarów powierzchni styku [5, 10]. Rozpatrując zjawiska podczas współpracy dwóch elementów maszyn, należy zatem zwrócić szczególną uwagę na stan i rodzaj ukonstytuowanej technologicznej warstwy wierzchniej. W przypadku kół zębatach, poprawę zarówno stanu warstwy wierzchniej, jak i jej struktury geometrycznej, uzyskuje się podczas odpowiednio dobranej obróbki wykańczającej [2, 3, 7, 8].



W procesie wytwarzania części powstaje warstwa wierzchnia, której integralną częścią o szczególnym praktycznym znaczeniu jest powierzchnia kształtowana w procesie obróbki. Stanowi ona zbiór rozłożonych na różnych wysokościach mikronierówności, o różnym kształcie geometrycznym i wymiarach tworzących strukturę geometryczną powierzchni rzeczywistej (SGP) różną od powierzchni idealnie gładkiej. W sensie normatywnym jest to przestrzenny układ elementów geometrycznych powierzchni rzeczywistej uwarunkowany kształtem, rozmiarem i rozmieszczeniem nierówności, które zwykle są śladami obróbki (np. odlewania, kucia, walcowania, skrawania, obróbki nagniataniem lub zużycia) [1-4, 6].

Rys. 1. Widok modeli 3D kół zębatych o module $m = 6$ i liczbie zębów $Z_1 = 18$, $Z_2 = 12$

W przypadku kół zębatych kształt powierzchni zęba będący najczęściej zarysem ewolwentowym

powstaje jako obwiednia kolejnych położenia narzędzia. To metoda wytwarzania koła zębatego i jej kinematyka oraz odpowiedni rodzaj użytego narzędzia kształtują strukturę geometryczną powierzchni zęba. Okazuje się, że struktura geometryczna powierzchni odgrywa istotną rolę w podwyższeniu żywotności i niezawodności skojarzeń tribologicznych. Szczególnie przy złożonym procesie współpracy powierzchni kół zębatych, gdzie mamy do czynienia ze zjawiskami obciążenia kontaktowego oraz poślizgu (ruchu tarcowego) przy zmieniającym się miejscu styku

Stąd coraz większą wagę przykładają się do stanu warstwy wierzchniej, w tym topografii powierzchni. Zużycie tribologiczne w bezpośredni sposób prowadzi do zmian w warstwie wierzchniej, zarówno pod względem ilościowym, jak i jakościowym. Części maszyn, takie jak koła zębate, są szczególnie narażone na niekorzystne zjawiska wywołujące ich zużycie.

Pełna charakterystyka stereometryczna powierzchni okazała się możliwa dzięki rozwojowi wizualno-komputerowych technik przestrzennych (3D), ale nastąpiło to dopiero na początku lat 90. ubiegłego stulecia i w pierwszej fazie stanowiło zagadnienie czysto badawcze, nie stosowane w warunkach przemysłowych. W przemyśle pierwsze systemy pomiarowe topografii powierzchni pojawiły się w okresie ostatnich kilku lat. Dotychczas powierzchnia charakteryzowana była w układzie 2D, a uzupełniana co najwyżej jedynie o dodanie drugiego kierunku pomiaru, tj. równoległego do śladów obróbki. W przypadku pomiaru chropowatości kół zębatych pomiar 2D jest nie zawsze adekwatny do rzeczywistego, bo przy niektórych metodach obróbki kierunek pomiaru może być zgodny z kierunkiem śladów obróbkowych, a nie prostopadły, jak zaleca norma. Następnym problemem jest ograniczony dostęp do powierzchni mierzonej zęba, szczególnie dla kół o małych modułach. Dopiero możliwości nowoczesnego skomputeryzowanego sprzętu pozwalają na dokonanie pełnego odwzorowania struktury powierzchni.

2. ANALIZA STRUKTURY GEOMETRYCZNEJ POWIERZCHNI ZĘBA

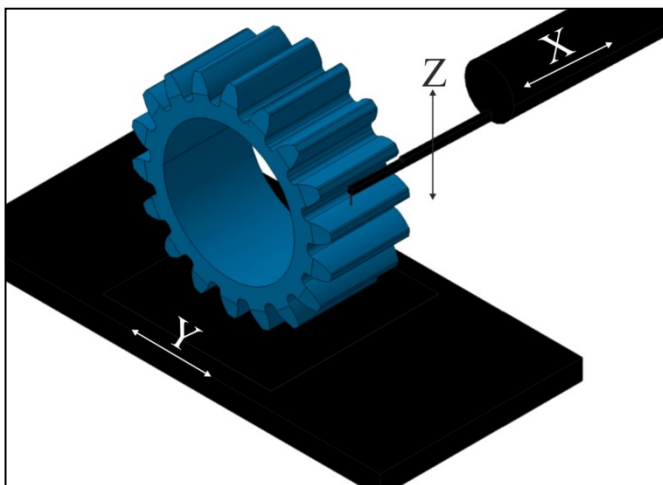
Do analizy topografii powierzchni zęba koła zębatego wybrano koła wykonane w zakładzie przemysłowym. Pomiaru struktury geometrycznej powierzchni dokonano na profilometrze TalySurf-120 firmy Taylor Hobson (rys. 2). Uzyskane dane posłużyły do określenia parametrów chropowatości i ich graficznego przedstawienia z wykorzystaniem oprogramowania TalyMap Platinum 5.1.



Rys. 2. Stanowisko do pomiaru SGP – Taylor Hobson TalySurf – laboratorium referencyjne firmy Taylor Hobson w ITM ZAPiT Politechniki Częstochowskiej

Do analizy koła po uprzednich oględzinach powierzchni za pomocą soczewek powiększających, wybrano próbki pozbawione widocznych wad powierzchniowych, mogących powstać podczas transportu, składowania lub pod wpływem działania warunków środowiskowych. Po dokonaniu wyboru powierzchnie oczyszczono z powłok olejowych alkoholem etylowym, przeprowadzono powtórne oględziny i ustawiono na stoliku profilografometru.

Kierunek ruchu końcówki pomiarowej został ustalony jako równoległy do osi obrotu koła/krawędzi głowy zęba. Ruch stolika (oś Y) prostopadły do kierunku ruchu głównego końcówki pomiarowej (oś X) (rys. 3).



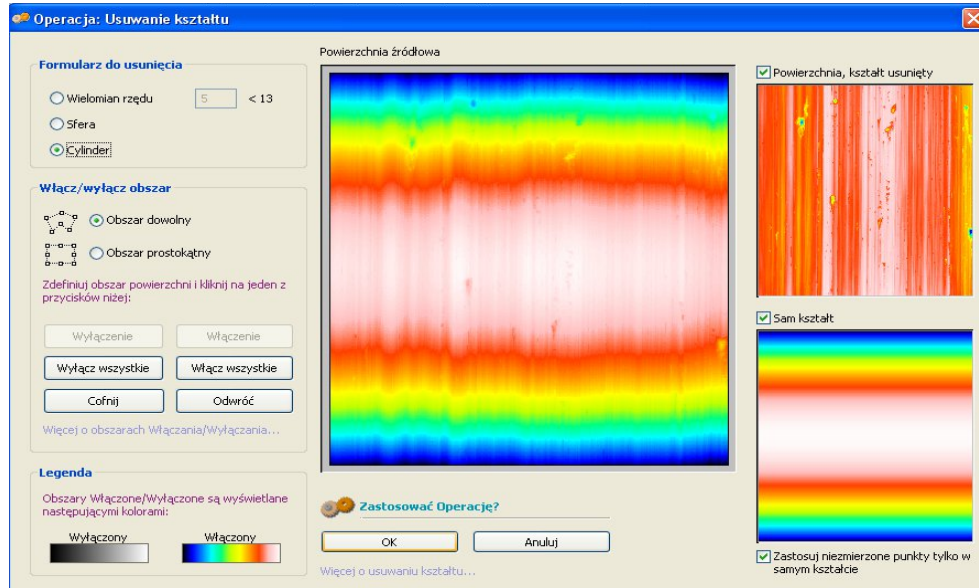
Rys. 3. Schemat pomiaru SGP zęba wraz z zaznaczonymi poszczególnymi osiami ruchu [12]

Określono wielkość pola pomiarowego na: 6×3 mm, czas pomiaru wynosił około 40 h przy prędkości pomiarowej 0,5 mm/s

Dokonując pomiaru topografii, powinniśmy sobie zdawać sprawę, że każda mierzona powierzchnia składa się

z 3 składowych – kształtu, falistości i chropowatości [1, 5, 6, 9]. Efektywne ich rozdzielenie i analiza są podstawą dla w pełni reprezentatywnej oceny jakości powierzchni [1, 3, 5, 6].

W przypadku powierzchni walcowych czy też innych krzywoliniowych, tak jak ewolwenta, pierwszym etapem analizy jest odfiltrowanie składowej kształtu, którą wykonuje się poprzez rozwinięcie zmierzonej powierzchni z wykorzystaniem równań matematycznych n -tego rzędu, sfery lub cylindra. Umożliwia to opcja programu *Usuwanie kształtu* pozwalająca doprowadzić pomierzony kształt do powierzchni płaskiej na założonym pomierzonym obszarze wraz z podglądem jej widoku, co obrazuje rys. 4.

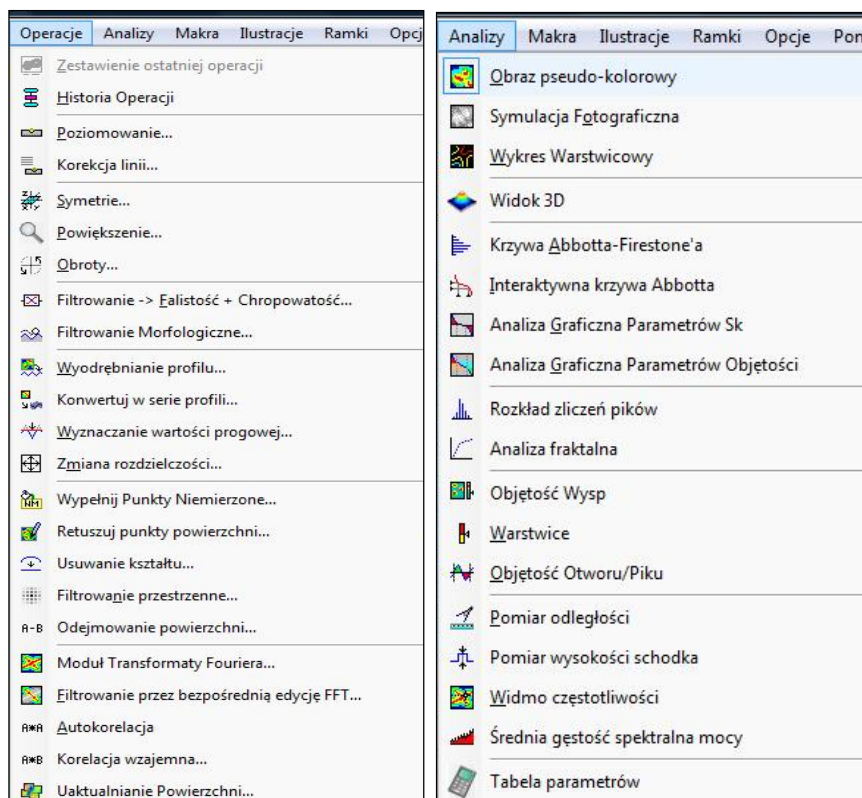


Rys. 4. Widok zakładki do usuwania kształtu analizowanego pomiaru

Efektem tej operacji jest powierzchnia płaska. Następnie wykonywane jest poziomowanie chmury punktów względem powierzchni średnio kwadratowej. To zadanie realizowane jest poprzez funkcję *Poziomowanie*, pozwalającą na dokonanie tej operacji wg różnych założonych kryteriów i dla określonego zakresu. Ułatwia to prowadzenie samego pomiaru bez konieczności dokładnego ustawienia przedmiotu mierzonego na stole pomiarowym.

W obu przypadkach działania na chmurze punktów nie stanowią problemu, bo są oparte na operacjach matematycznych [11, 12]. Możliwości analizy są szerokie i pozwalają prowadzić obserwacje wielopoziomowe wyników uzyskanych w trakcie prowadzenia pomiarów.

Możliwości obliczeniowe programu TalyMap Platinum przedstawiono na rysunku 5, ukazującym rozwinięcie zakładki *Operacje* i *Analizy*. Można zaobserwować, że dysponujemy wieloma różnymi możliwościami obróbki cyfrowej chmury punktów pomiarowych oraz możliwościami identyfikacji struktury geometrycznej powierzchni w układzie 3D



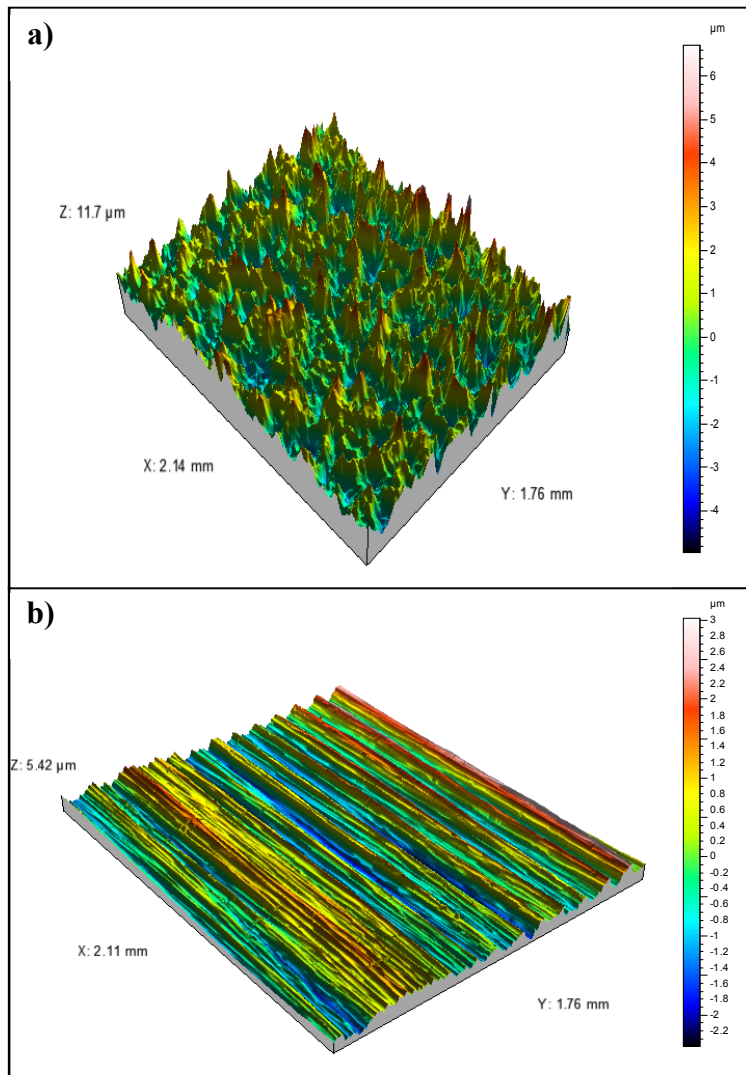
Rys. 5. Widok rozwiniętych zakładek *Operacje* i *Analizy* ukazujące funkcje zadaniowe dla określenia charakterystyk topografii powierzchni

W celu zobrazowania możliwości oceny struktury geometrycznej powierzchni zęba koła zębatego przedstawiono wyniki pomiarów i analiz dla kół po obróbce wykańczającej szlifowaniem oraz dla porównania obróbkę nagniataniem dynamicznym. W tabeli 1 ujęto wszystkie zmierzone parametry w układzie 3D, a na rysunkach przedstawiono graficzną interpretację wybranych wskaźników mających decydujące znaczenie dla interpretacji zmian SGP [13-15].

Tabela 1. Porównanie parametrów struktury geometrycznej powierzchni po obróbce wykańczającej określonych zgodnie z normą ISO 25178

Rodzaj obróbki	Kulkowanie	Szlifowanie	miano
<i>Parametry wysokości</i>			
Sq	1.35	0.903	μm
Ssk	0.234	0.485	
Sku	3.07	2.58	
Sp	6.71	3.02	μm
Sv	4.95	2.4	μm
Sz	11.7	5.42	μm
Sa	1.08	0.752	μm
<i>Parametry funkcyjne (ogólne)</i>			
Smr	0.00447	2.03	%
Smc	4.92	1.8	μm
Sxp	2.45	1.44	μm
<i>Parametry przestrzenne</i>			
Sal	0.0326	0.0207	mm
Str	0.731	0.0506	
Std	22.2	0.144	°
<i>Parametry hybrydowe</i>			
Sdq	0.0723	0.0604	
Sdr	0.261	0.182	%
<i>Parametry funkcyjne (Sk)</i>			
Vm	7e-005	4.64e-005	mm ³ /mm ²
Vv	0.00184	0.00121	mm ³ /mm ²
Vmp	7e-005	4.64e-005	mm ³ /mm ²
Vmc	0.00121	0.000864	mm ³ /mm ²
Vvc	0.00171	0.00115	mm ³ /mm ²
Vvv	0.000137	6.86e-005	mm ³ /mm ²
<i>Parametry cech</i>			
Spd	62.9	28.8	1/mm ²
Spc	0.0188	0.0199	1/mm
S10z	39.4	67.6	μm
S5p	31.8	24.6	μm
S5v	7.6	43	μm
Sda	0.364	0.96	mm ²
Sha	0.315	1.18	mm ²
Sdv	2.39e-006	6.69e-006	mm ³
Shv	2.14e-006	1.74e-006	mm ³

W praktyce oczywiście nie wszystkie te parametry są stosowane, ale przy ocenie wyboru technologii obróbki wykańczającej mogą być pomocne. Chociaż obserwuje się, że niektóre zakłady wymagają od producentów niektórych części stosowania jeszcze innych nieokreślonych przez normę wskaźników oceny struktury geometrycznej powierzchni.

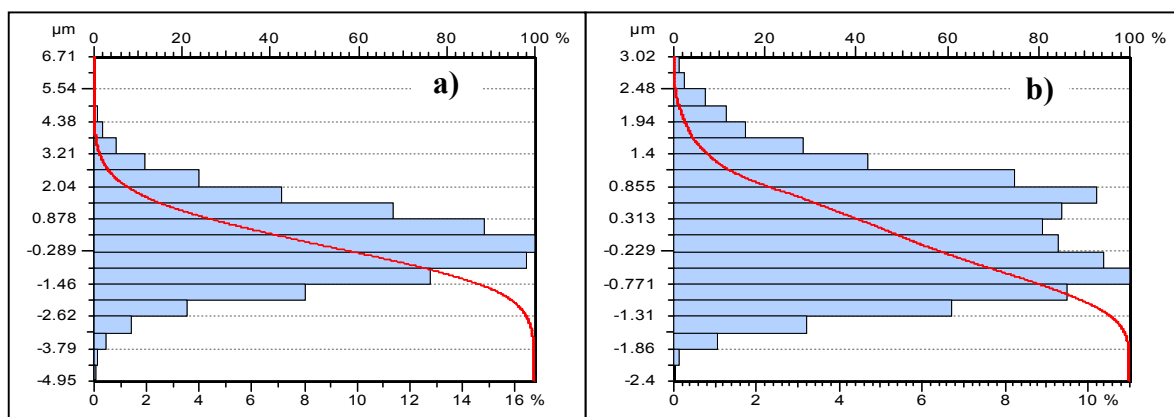


Oprogramowanie TalyMap umożliwia szeroką graficzną interpretację wyników, co ułatwia ich interpretację. Na rysunku 6 przedstawiono widok przestrzenny powierzchni.

Rys. 6. Widoki 3D powierzchni: a) kulkowanej, b) szlifowanej

Z porównania widoków 3D poszczególnych powierzchni dostrzegamy różnice w ukształtowaniu SGP poszczególnych powierzchni – widać, że powierzchnia szlifowana jest powierzchnią okresową jednokierunkową, natomiast powierzchnia kulkowana jest powierzchnią losową w dwóch kierunkach.

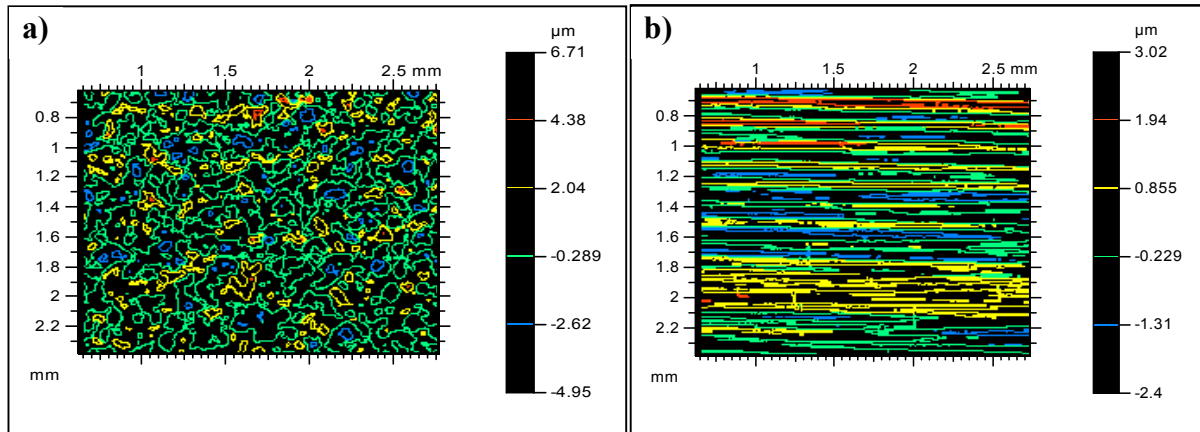
Na rysunku 7 zobrazowano krzywe udziału nośnego materiału, tzw. krzywe Abbotta – Firestone’a z naniesionymi rzędnymi profilu.



Rys. 7. Krzywe Abbotta–Firestone’a powierzchni z rzędnymi profilu: a) kulkowanej, b) szlifowanej

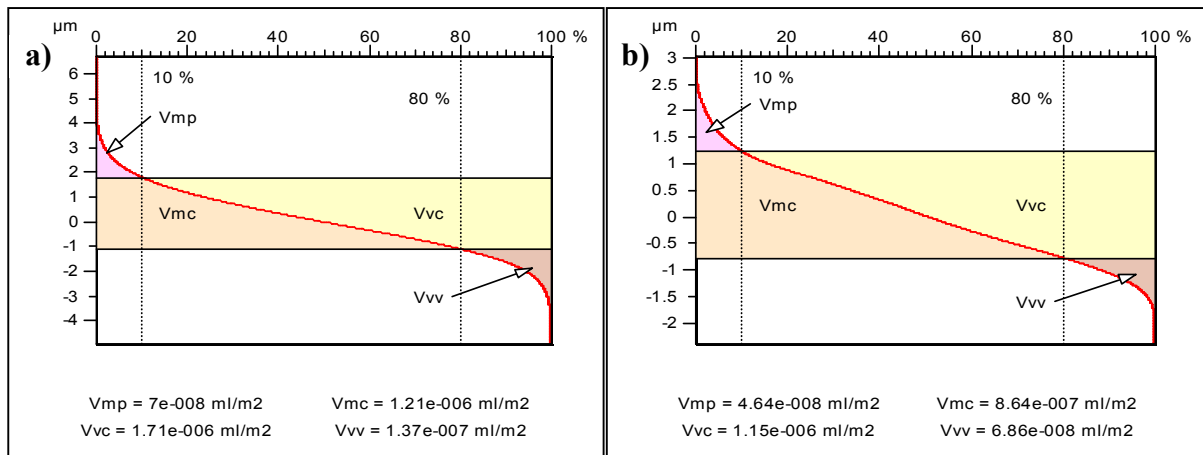
Z analizy krzywych Abbotta–Firestone’a widzimy, że powierzchnia kulkowana jest powierzchnią izotropową losową, natomiast powierzchnia szlifowana jest powierzchnią

anizotropową losową, możemy również dostrzec, że na powierzchni kulkowanej największa nośność występuje płycej niż na powierzchni szlifowanej.



Rys. 8. Wykresy warstwowe powierzchni: a) kulkowanej, b) szlifowanej

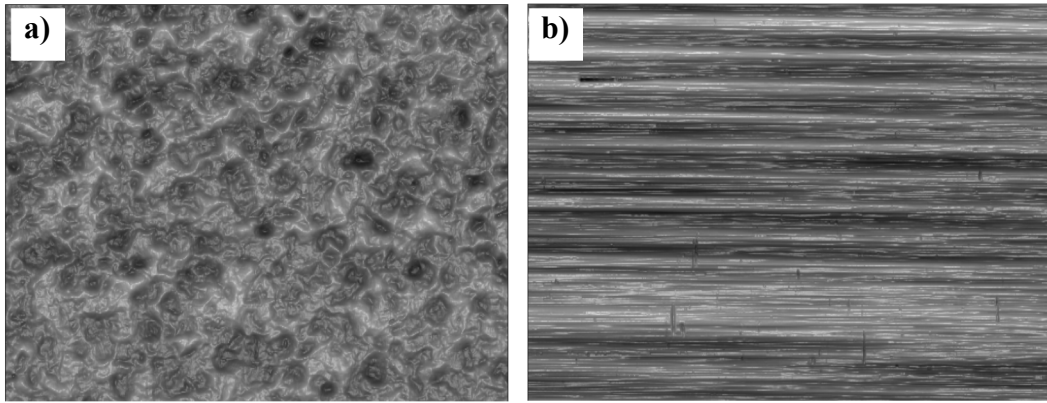
Porównując wykresy warstwowe badanych powierzchni, dostrzegamy, że powierzchnia kulkowana posiada większe wzniesienia i wgłębienia względem powierzchni średniej niż powierzchnia szlifowana. Widać również, że na powierzchni kulkowanej różnica między największymi a najmniejszymi punktami wzniesień i wgłębień jest znacznie większa niż na powierzchni szlifowanej.



Rys. 9. Wykresy objętościowe powierzchni: a) kulkowanej, b) szlifowanej

Z powyższych wykresów możemy porównać udziały objętościowe, jakie występują w badanych powierzchniach.

Porównując symulacje fotograficzne obu badanych powierzchni, dostrzegamy odwzorowanie śladów narzędzia, które wykonywało daną obróbkę powierzchni.



Rys. 10. Symulacje fotograficzne powierzchni: a) kulkowanej, b) szlifowanej

Analizując SGP dla koła kulkowanego dynamicznie, możemy stwierdzić, że jest to powierzchnia losowa w dwóch kierunkach, co widać na widoku 3D powierzchni. Na podstawie krzywej Abbotta–Firestone’a dodatkowo możemy stwierdzić, że jest to także powierzchnia izotropowa losowa. Największy udział nośny powierzchni występuje na głębokości ok. $-0,289 \mu\text{m}$ poniżej powierzchni średniej. Na wykresie warstwicowym dostrzegamy dużą liczbę wzniesień i wgłębień, które wahają się od: $-0,289 \mu\text{m}$ poniżej powierzchni średniej do $2,04 \mu\text{m}$ powyżej powierzchni średniej. Jednakże występują w mniejszej liczbie wzniesienia rzędu $4,38 \mu\text{m}$ powyżej powierzchni średniej oraz wgłębienia rzędu $-2,62 \mu\text{m}$ poniżej powierzchni średniej. Na podstawie tabeli końcowej możemy stwierdzić, że powierzchnia charakteryzuje się dodatnią skośnością $S_{sk} = 0,234$ oraz skupieniem rzędu $S_{ku} = 3,07$, udział faliści w SGP wynosi $S_{al} = 0,0326 \text{ mm}$, a chropowatość wynosi $S_a = 1,08 \mu\text{m}$. Powierzchnię uzyskaną na drodze szlifowania możemy scharakteryzować, że jest to powierzchnia okresowa jednokierunkowa. Na podstawie krzywej Abbotta–Firestone’a dodatkowo możemy stwierdzić, że jest to także powierzchnia anizotropowa losowa. Największy udział nośny powierzchni występuje na głębokości ok. $-0,45 \mu\text{m}$ poniżej powierzchni średniej. Na wykresie warstwicowym dostrzegamy dużą liczbę wzniesień i wgłębień, które wahają się od: $-0,229 \mu\text{m}$ poniżej powierzchni średniej do $0,855 \mu\text{m}$ powyżej powierzchni średniej. Jednakże występują w mniejszej liczbie wzniesienia rzędu $1,94 \mu\text{m}$ powyżej powierzchni średniej oraz wgłębienia rzędu $-1,31 \mu\text{m}$ poniżej powierzchni średniej. Na podstawie tabeli końcowej możemy stwierdzić, że powierzchnia charakteryzuje się dodatnią skośnością $S_{sk} = 0,485$ oraz skupieniem rzędu $S_{ku} = 2,58$, udział faliści w SGP wynosi $S_{al} = 0,0207 \text{ mm}$, a chropowatość wynosi $S_a = 0,752 \mu\text{m}$.

3. PODSUMOWANIE

Zastosowanie systemów komputerowych w budowie profilografometrów i ich sterowania w procesie zbierania danych umożliwiło pomiary powierzchni ewolwentowej w układzie 3D. Oprogramowanie użytkowe Ultra zapewnia całkowite planowanie przebiegu pomiaru i zapisu danych do opracowania ich w programie Talymap Platinum. Program ten oprócz obliczeń podstawowych parametrów chropowatości i faliści pozwala na wykonanie wielu matematycznych operacji, między innymi takich jak usunięcie krzywizny czy też wypoziomowanie powierzchni zmierzonej. Funkcje te ułatwiają zarówno realizację pomiarów, jak i interpretację wyników. Uzyskanie pełnej charakterystyki struktury geometrycznej powierzchni daje możliwość oceny przydatności takiej powierzchni do pracy w określonych warunkach eksploatacyjnych.

LITERATURA

- [1] Adamczak S.: *Pomiary geometryczne powierzchni. Zarys kształtu falistość i chropowatość*, WNT, Warszawa 2008.
- [2] Chmielik I., Tubielewicz K.: *Pomiary parametrów struktury powierzchni po nagniataniu w ujęciu 2D i 3D. Postęp w metrologii współrzędnościowej*, Wyd. ATH w Bielsku-Białej, S. Monografie, Bielsko – Ustroń 2010.
- [3] Czarnecki H., Chmielik I.P.: *Mikrogeometria powierzchni po wybranych metodach nagniatania w układzie 3D*. XIV Krajowa i V Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Metrologia w Technikach Wytwarzania”, 12-14.09.2011, Warszawa – Pułtusk, Materiały konferencyjne, s. 040-045.
- [4] Kaczmarek J., Klimczok T.: *Dwu- i trójwymiarowa charakterystyka mikronierówności powierzchni. Zagadnienia Eksploatacji Maszyn*, 1, 1986, s. 39-46.
- [5] Pawlus P.: *Topografia powierzchni pomiar, analiza, oddziaływanie*, Politechnika Rzeszowska, 2005.
- [6] Oczos K.E., Liubimov V.: *Analiza układu 3D struktury geometrycznej powierzchni szlifowanych*, Mat. XXI Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej, Warszawa 1998.
- [7] Aggarwal M.L., Agrawal V.P., Khan R.A.: *A Stress Approach Model for Predictions of Fatigue Life by Shot Peening of EN45A Spring Steel*, International Journal of Fatigue, 28, 2006.
- [8] Champaigne J.: *Shot Peening Overview*, Electronics Inc 1428 W, 6TH Street Mishawaka, In 46544, www.shotpeener.com, 2001.
- [9] Czarnecki H., Chmielik I.P., Tomasiak J.: *Mikrogeometria powierzchni po wybranych metodach nagniatania w układzie 3D*, Mechanik R.85, nr 7/2012.
- [10] Lawrowski Z.: *Tribologia: Tarcie, Zużywanie i Smarowanie*, PWN, Warszawa 1993.
- [11] Chmielik I.P.: *Parametryczna ocena struktury geometrycznej powierzchni po nagniataniu*, praca doktorska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2012.
- [12] Tagowski M.: *Właściwości warstwy wierzchniej zęba koła zębatego po nagniataniu dynamicznym*, praca doktorska, Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2013.
- [13] ISO/TC 213 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 3: Specification operators.
- [14] ISO/TC 213 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters.
- [15] PN-EN-ISO 13565-2 Specyfikacja geometrii wyrobów – Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa; powierzchnie o warstwowym właściwościach funkcjonalnych – Opis wysokości za pomocą linearyzacji krzywej udziału materiałowego.