

The cross-correlation function in assessment of surface topography shaping by hybrid milling and burnishing

Wykorzystanie funkcji korelacji wzajemnej w ocenie topografii powierzchni wytworzonej po hybrydowym frezowaniu i nagniataniu

SARA DUDZIŃSKA
DANIEL GROCHAŁA
EMILIA BACHTIAK-RADKA *

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.12.110>

In world literature much attention is devoted not only to the conscious surface shaping, but also to many problems that can be encountered during surface measurement. The development of surface metrology tries to respond to many industrial needs and keep up with sophisticated production techniques. Nevertheless the estimation and comparison of surfaces after several successive treatments is still complicated. For this purpose, the authors proposed the use of a correlation function to evaluate milled and then burnished surfaces, which is an alternative instrument to the parametric evaluation of the surface topography. This method can directly give an answer, whether the technological process has been carried out as expected. The measurements were carried out using a multi-sensor AltiSurf A520 instrument, manufactured by Altimet, according to its own developed methodology.

KEYWORDS: surface metrology, hybrid manufacturing, correlation function

W literaturze światowej wiele uwagi poświęca się nie tylko świadomemu kształtowaniu powierzchni, lecz także licznym problemom, jakie można napotkać przy jej pomiarach. Choć rozwój metrologii powierzchni niezaprzeczalnie stara się odpowiadać na potrzeby środowiska przemysłowego i nadążać za coraz bardziej wyzyskowanymi technikami produkcyjnymi, to oszacowanie i porównanie powierzchni po kilku następujących po sobie zabiegach wciąż wydaje się skomplikowane. Właśnie dlatego autorzy zaproponowali wykorzystanie funkcji korelacji do oceny chropowatości 3D powierzchni frezowanych, a następnie nagniatanych, która może stanowić doskonałe uzupełnienie oceny parametrycznej. Funkcja korelacji wzajemnej może w sposób bezpośredni dać odpowiedź, czy proces technologiczny został przeprowadzony zgodnie z oczekiwaniami i wymaganym stanem chropowatości 3D. Pomiary przeprowadzono za pomocą wieloczułnikowego instrumentu AltiSurf A520, wyprodukowanego przez firmę Altimet, według własnej metodologii.

SŁOWA KLUCZOWE: metrologia powierzchni, wytwarzanie hybrydowe, funkcja korelacji

Każdy wytwarzany produkt musi spełniać określoną specyfikację technologiczną oraz pozwalać na ekonomiczną produkcję. W rzeczywistości przemysłowej to przekłada się na skrócenie czasu produkcji, balansowanie linii produkcyjnych oraz lepsze wykorzystanie zasobów [1, 2].

W przypadku produkcji bardzo wymagających i odpowiedzialnych części (w branży automotive, w przemyśle energetycznym, medycznym itp.) sięga się po specyficzne rozwiązania umożliwiające łączenie różnych technik wytwarzania w obrębie jednego stanowiska (tzw. wytwarzanie hybrydowe) [3, 4]. Wtedy niezwykle ważne jest określenie stanu struktury geometrycznej powierzchni (SGP)[5] oraz ustalenie procedur kontroli jakości krytycznych elementów. Proces kontroli i stworzenie procedur pomiarowych stanowią poważne wyzwanie, gdy produkowana część musi mieć specyficzne właściwości SGP. Należy również pamiętać, że w odniesieniu do obróbki metodami hybrydowymi (będącej wynikiem realizacji wielu zadań) procedury pomiaru powinny być odpowiednio zrozumiane i wyjątkowo starannie przygotowane.

W ostatnich latach wielu autorów zajmowało się problemem stworzenia nowej jakości w procesach związanych z metrologią powierzchni. W literaturze wyraźnie się podkreśla, że ograniczanie się do konwencjonalnych metod analizy chropowatości 2D i oceny parametrycznej chropowatości 3D może prowadzić do błędnych wniosków. Parametry chropowatości powierzchni 2D i 3D mogą nie być wystarczające do scharakteryzowania danej cechy powierzchni [6–7]. Osobnymi kwestiami są także konieczność stworzenia standardów dotyczących pomiarów oraz uproszczenie metod, które mogą być stosowane w przemyśle [8].

Mając na uwadze fakt, że w literaturze światowej wciąż rozszerza się zakres badań nt. nieparametrycznej oceny SGP, autorzy podjęli próbę nieparametrycznej oceny powierzchni frezowanej i nagniatanej, stosując korelację wzajemną, aby odnotować zmiany morfologiczne występujące w próbkach.

Korelacja krzyżowa jest miarą podobieństwa dwóch serii danych przemieszczonych w stosunku do siebie. Wyznacza się ją za pomocą wzoru:

$$C(\tau) = \int f^*(t)g(t + \tau)dt$$

gdzie: f^* – sprzężenie zespolone sygnału f , $g(t + \tau)$ – przesunięty sygnał g , t – czas, τ – przesunięcie.

* Mgr inż. Sara Dudzińska, sara.dudzinska@zut.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0002-7577-7899> – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin, Polska
Dr inż. Daniel Grochała, daniel.grochala@zut.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-2553-7739> – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin, Polska
Mgr inż. Emilia Bachtiak-Radka, ebachtiak@zut.edu.pl, <https://orcid.org/0000-0003-3366-0083> – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny, Szczecin, Polska

Biorąc pod uwagę, że pomiary powierzchni są dwuwymiarowe i dyskretne, korelację krzyżową można obliczyć za pomocą następującego równania:

$$C(k, l) = \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=0}^{N-1} S_1(m, n) S_2^*(m-k, n-l) \quad (2)$$

$$\begin{cases} -(W-1) \leq k \leq M-1 \\ -(V-1) \leq l \leq N-1 \end{cases}$$

gdzie: S_1 i S_2 – macierze (odpowiednio o wymiarach $m \times n$ oraz $w \times v$), zawierające pomiary powierzchni; S_2^* – sprzężenie zespolone; k i l – przesunięcia w obu kierunkach.

Materiał badawczy

Prace doświadczalne przeprowadzono na próbkach ze stali 42CrMo4, ulepszonej cieplnie do twardości 35 ± 2 HRC. Próbkę frezowano na centrum obróbkowym DMG DMU 60 monoBLOCK z osią wrzeciona pochyloną o 15° . Frezowanie przeprowadzono z użyciem głowicy torusowej (WNT R1000G.42.6.M16.IK) z sześcioma płytkami skrawającymi o średnicy $d_p = 10$ mm (RD.X1003 MOT – WTN1205). W tabl. I podano parametry obróbki.

Badania przeprowadzono dla czterech przypadków wierszowania podczas frezowania: $f_{wf} = 0,7$ mm, $f_{wf} = 0,5$ mm, $f_{wf} = 0,3$ mm, $f_{wf} = 0,1$ mm. Bezpośrednio po frezowaniu na wybranych próbkach przeprowadzono nagniatanie za pomocą jednokulkowego narzędzia hydrostatycznego z siłownikiem mechanicznym [9], zakończonego kulką z ceramiki ZrO_2 o średnicy $d_k = 10$ mm. Prędkość nagniatania v_n wynosiła 8 m/min, a posuw poprzeczny nagniatania $f_{wn} = 0,12$ mm. Nagniatanie prowadzono z siłą F_n równą 800 N. Każde z nagniatanych pól miało szerokość 11 mm.

TABLE I. List of milling technological parameters adopted in the experimental research plan

TABLICA I. Zestawienie technologicznych parametrów frezowania, przyjętych w planie badań doświadczalnych

Prędkość skrawania v_c [m/min]	Głębokość warstwy skrawanej a_p [mm]	Posuw na ostrze f_z [mm]	Posuw poprzeczny frezowania f_{wf} [mm]
110	0,5	0,1	0,7 0,5 0,3 0,1

Metodyka pomiarów

Pomiary SGP na polach o wymiarach $2 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ przeprowadzono z wykorzystaniem multisensorycznej maszyny do pomiarów topografii powierzchni Altisurf A520 firmy Altimet, z sensorem konfokalnym CL1 o zakresie pracy do $130 \mu\text{m}$ i rozdzielczości pionowej 8 nm . Przyjęta rozdzielczość skanowania wzdłuż osi X wynosiła $0,47 \mu\text{m}$, a wzdłuż osi Y – $5 \mu\text{m}$. Zebrane chmury punktów opracowano w oprogramowaniu AltiMap PREMIUM 6.2. W przypadku analizy każdej powierzchni stosowano następującą metodykę:

- wyznaczenie wartości progowej w celu usunięcia błędnie zebranych punktów powierzchni,
- poziomowanie powierzchni (płaszczyznę średnią, aproksymowaną metodą najmniejszych kwadratów),
- poziomowanie powierzchni (płaszczyznę średnią),
- wyznaczenie wybranych wartości parametrów topograficznych według ISO 25178 i funkcji korelacji wzajemnej.

Opracowanie wyników

W tabl. II i III przedstawiono wyznaczone parametry SGP – średnie wartości parametrów amplitudowych oraz parametrów przestrzennych referencyjnych próbek frezowanych (tabl. II) oraz próbek frezowanych, a następnie nagniatanych z siłą $F_n = 800 \text{ N}$ (tabl. III).

TABLE II. The values of 3D surface roughness parameters of samples after milling

TABLICA II. Wartości parametrów SGP 3D próbek po frezowaniu

	Posuw poprzeczny podczas frezowania f_{wf}			
	0,7 mm	0,5 mm	0,3 mm	0,1 mm
Sq [μm]	4,880	3,337	1,823	0,626
Sz [μm]	24,500	21,100	16,900	9,920
Sa [μm]	4,115	2,857	1,623	0,474
Sal [mm]	0,197	0,165	0,110	0,042
Str	0,195	0,163	0,110	0,044

TABLE III. The values of 3D surface roughness parameters of samples after burnishing with the force $F_n = 800 \text{ N}$

TABLICA III. Wartości parametrów SGP 3D próbek po nagniataniu z siłą $F_n = 800 \text{ N}$

	Posuw poprzeczny podczas frezowania f_{wf}			
	0,7 mm	0,5 mm	0,3 mm	0,1 mm
Sq [μm]	0,628	0,342	0,304	0,283
Sz [μm]	9,757	7,570	7,543	6,663
Sa [μm]	0,537	0,273	0,234	0,226
Sal [mm]	0,282	0,206	0,159	0,304
Str	0,291	0,341	0,237	0,336

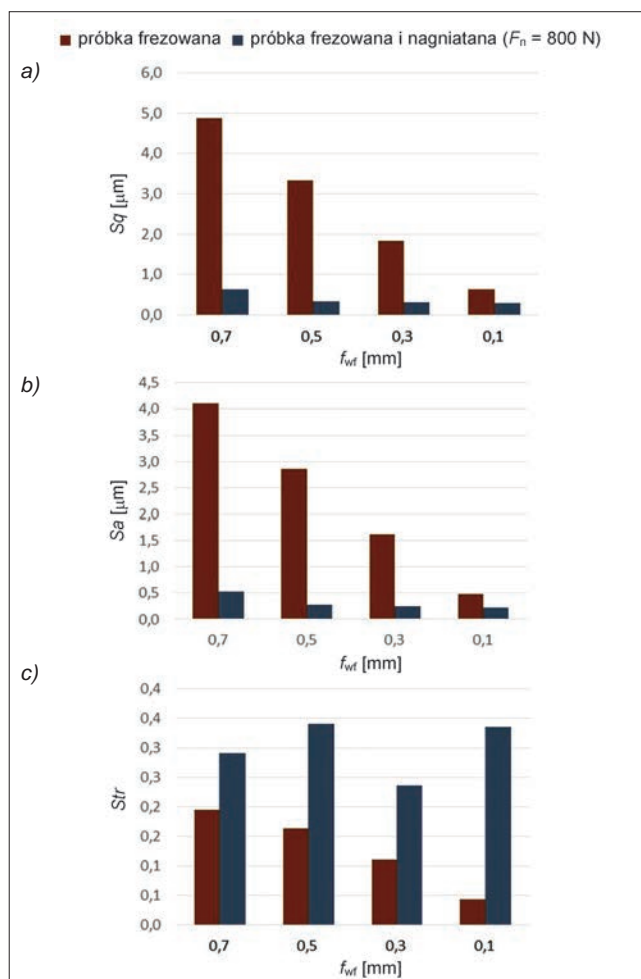


Fig. 1. Sq (a), Sa (b) and Str (c) parameter values for milled and milled and burnished samples with the force $F_n = 800 \text{ N}$

Rys. 1. Zestawienie wartości parametru Sq (a), Sa (b) i Str (c) dla próbek frezowanych oraz frezowanych i nagniatanych z siłą $F_n = 800 \text{ N}$

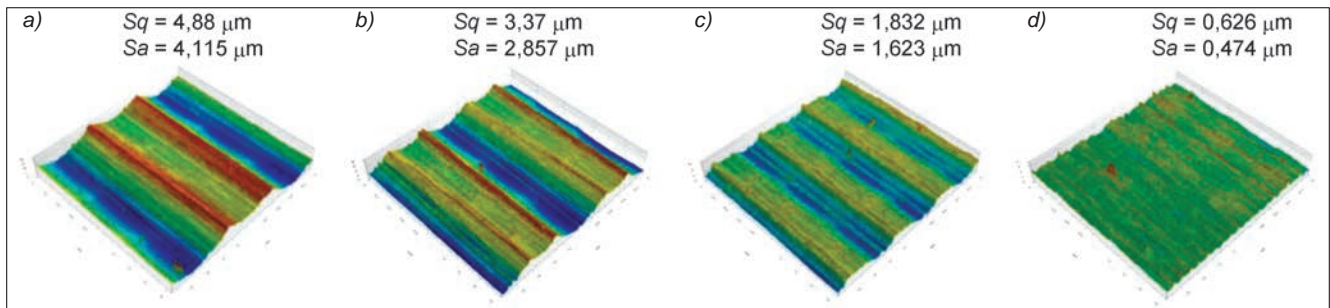


Fig. 2. Isometric images of reference milled samples with transverse feed f_{wf} equal to: a) 0.7 mm, b) 0.5 mm, c) 0.3 mm, d) 0.1 mm
Rys. 2. Obrazy izometryczne referencyjnych próbek frezowanych z posuwem poprzecznym f_{wf} równym: a) 0,7 mm, b) 0,5 mm, c) 0,3 mm, d) 0,1 mm

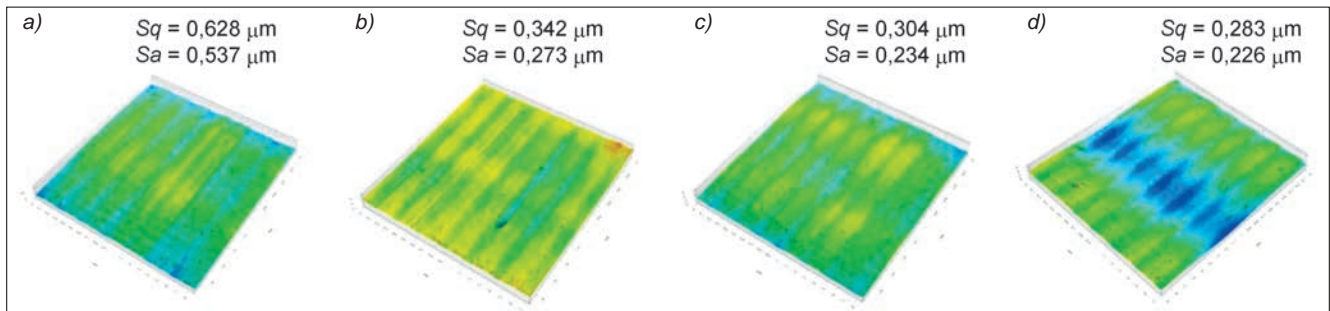


Fig. 3. Isometric images of burnished samples with a force $F_n = 800$ N after milling with a transverse feed f_{wf} equal to: a) 0.7 mm, b) 0.5 mm, c) 0.3 mm, d) 0.1 mm

Rys. 3. Obrazy izometryczne próbek nagniatanych z siłą $F_n = 800$ N po uprzednim frezowaniu z posuwem poprzecznym f_{wf} równym: a) 0,7 mm, b) 0,5 mm, c) 0,3 mm, d) 0,1 mm

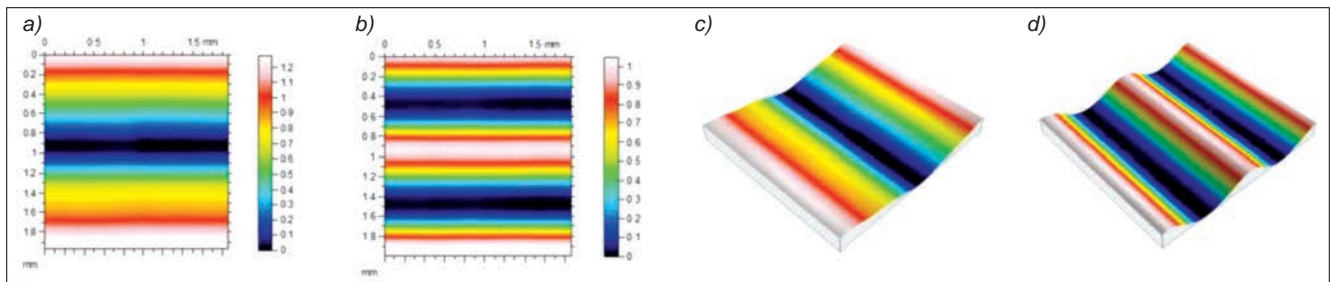


Fig. 4. Correlation results of milled surfaces as well as milled and burnished: a) and c) mutual correlation of a milled sample with feed $f_{wf} = 0.7$ mm and milled with a feed $f_{wf} = 0.7$ mm and burnished with a force $F_n = 800$ N; b) and d) mutual correlation of the milled sample with feed $f_{wf} = 0.5$ mm and the milled sample with feed $f_{wf} = 0.5$ mm and burnished with the force $F_n = 800$ N

Rys. 4. Wyniki korelacji powierzchni frezowanych oraz frezowanych i nagniatanych: a) i c) korelacja wzajemna próbki frezowanej z posuwem $f_{wf} = 0,7$ mm oraz frezowanej z posuwem $f_{wf} = 0,7$ mm i nagniatanej z siłą $F_n = 800$ N; b) i d) korelacja wzajemna próbki frezowanej z posuwem $f_{wf} = 0,5$ mm oraz frezowanej z posuwem $f_{wf} = 0,5$ mm i nagniatanej z siłą $F_n = 800$ N

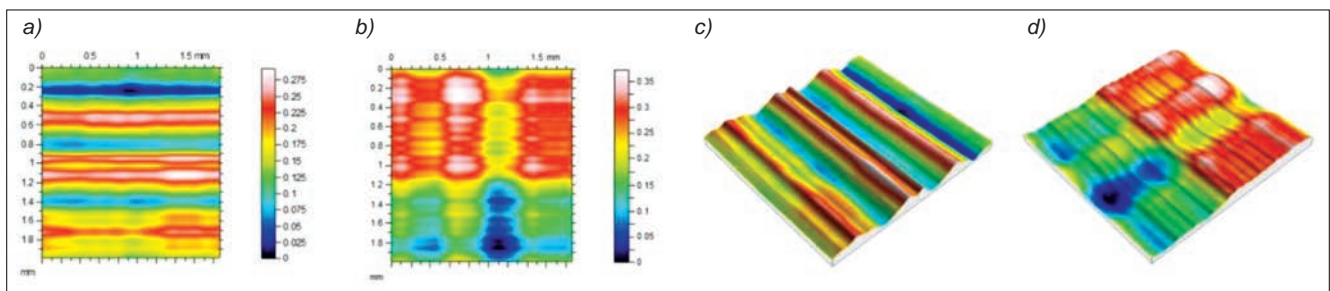


Fig. 5. Correlation results of milled surfaces as well as milled and burnished: a) and c) mutual correlation of a milled sample with feed $f_{wf} = 0.3$ mm and milled with a feed $f_{wf} = 0.3$ mm and burnished with a force $F_n = 800$ N; b) and d) mutual correlation of the milled sample with feed $f_{wf} = 0.1$ mm and the milled sample with feed $f_{wf} = 0.1$ mm and burnished with the force $F_n = 800$ N

Rys. 5. Wyniki korelacji powierzchni frezowanych oraz frezowanych i nagniatanych: a) i c) korelacja wzajemna próbki frezowanej z posuwem $f_{wf} = 0,3$ mm oraz frezowanej z posuwem $f_{wf} = 0,3$ mm i nagniatanej z siłą $F_n = 800$ N; b) i d) korelacja wzajemna próbki frezowanej z posuwem $f_{wf} = 0,1$ mm oraz frezowanej z posuwem $f_{wf} = 0,1$ mm i nagniatanej z siłą $F_n = 800$ N

Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że przy nagniataniu z siłą 800 N dochodzi do znacznej redukcji wartości amplitudowych parametrów chropowatości S_q , S_a oraz S_z . Końcowy efekt tak przeprowadzonego procesu zależy m.in. od tekstury wytworzonej na etapie frezowania. Na rys. 1 porównano średnie wartości parametrów S_q , S_a i S_z próbek frezowanych oraz frezowanych i nagniatanych z siłą 800 N.

Najmniejsze wartości S_q i S_a po procesie nagniatania zarejestrowano w przypadku próbki, która wcześniej była frezowana z najmniejszym posuwem $f_{wf} = 0,1$ mm. Porównując wartości S_q i S_a próbek referencyjnych, można zauważyć, że najefektywniejsza była obróbka polegająca na nagniataniu próbek, które we wcześniejszym zabiegu były frezowane z posuwem poprzecznym $f_{wf} = 0,5$ mm. W tym przypadku wartość S_q spadła o 89,8%, a S_a – o 90,4%.

Wartości parametrów Sa oraz Str znacząco wzrosły po zabiegu nagniatania. Wzrost wartości parametru Str po drugim zabiegu wskazuje na ujednoczenie struktury powierzchni.

Na rys. 2 i 3 przedstawiono obrazy izometryczne zarejestrowanych powierzchni.

W celu oceny stopnia usunięcia śladów pozostawionych przez frez wykonano korelację wzajemną odpowiadających sobie powierzchni po frezowaniu i nagniataniu (rys. 4 i 5). Analizując otrzymane wyniki, można stwierdzić, że ślady pozostawione przez frez są najmniej widoczne w przypadku próbki, która w zabiegu poprzedzającym nagniatanie była poddana frezowaniu z posuwem poprzecznym $f_{wf} = 0,3$ mm.

Podsumowanie

Bardzo istotne w optymalizacji procesów technologicznych, zmierzającej do otrzymania powierzchni, spełniającej restrykcyjne wymagania, jest połączenie oceny parametrycznej struktury geometrycznej powierzchni i oceny nieparametrycznej. Korelacja wzajemna w analizie SGP zdecydowanie może stanowić dobre narzędzie pomocnicze, służące do optymalizacji hybrydowych operacji technologicznych. Przede wszystkim jednak umożliwia zaobserwowanie zmian w teksturze powierzchni, będących skutkiem kolejnych operacji technologicznych. Jednocześnie należy mieć na uwadze fakt, że w praktyce przemysłowej wykonanie takich badań (mimo że są bardzo potrzebne) bywa uciążliwe. Dlatego też warto pracować nad doskonaleniem narzędzi, które umożliwiłyby stworzenie wirtualnego modelu i tym samym pozwoliłyby na otrzymanie modelu obrobionej powierzchni. W tym celu autorzy podejmują dalsze prace badawcze nie tylko nad stworzeniem modeli matematycznych do optymalizacji obróbki, lecz także modeli wirtualnych przeznaczonych do wykonywania symulacji, które ułatwiają zrozumienie zmian zachodzących w materiale podczas obróbki łączącej frezowanie i nagniatanie.

LITERATURA

- [1] Neugebauer R., Drossel W., Wertheim R., Hochmuth C., Dix M. "Resource and Energy Efficiency in Machining Using High-Performance and Hybrid Processes". *Fifth CIRP Conference on High Performance Cutting*. 1 (2012): 3–16.
- [2] Treppe F., Hochmuth C., Junker T., Schneider R., Stoll A. "Steigerung der Ressourceneffizienz durch hybride Prozesse". *Kongress Nachhaltige Produktion*, Hannover 2011: 127–150.
- [3] Araghi B.T., Manco G.L., Bambach M., Hirt G. "Investigation into a new hybrid forming process: Incremental sheet forming combined with stretch forming". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 58, 1 (2009): 225–228.
- [4] Zhu Z., Dhokia V.G., Nassehi A., Newman S.T. "A review of hybrid manufacturing processes – state of the art and future perspectives". *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*. 26, 7 (2013): 596–615.
- [5] Adamczak S. „Pomiary geometryczne powierzchni: zarysy kształtu, falistość i chropowatość”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2008.
- [6] MacAulay G.D., Senin N., Giusca C.L., Leach R.K. "Study of manufacturing and measurement reproducibility on a laser textured structured surface". *Measurement*. 94 (2016): 942–948.
- [7] Krolczyk G.M., Maruda R.W., Krolczyk J.B., Nieslony P., Wojciechowski S., Legutko S. "Parametric and nonparametric description of the surface topography in the dry and MQCL cutting conditions". *Measurement*. 121 (2018): 225–239.
- [8] Tosello G., Haitjema H., Leach R.K., Quagliotti D., Gasparin S., Hansen H.N. "An international comparison of surface texture parameters quantification on polymer artefacts using optical instruments". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. 65, 1 (2016): 529–532.
- [9] Grochała D., Sosnowski M. „Problemy technologii nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych na centrach obróbkowych”. *Mechanik*. 1 (2011): 14–18. ■