

Zmiany powierzchni przedmiotów obrabianych na twardo przez frezowanie i nagniatanie

The changes of the workpiece surfaces by hard machining by milling and burnishing

DANIEL GROCHAŁA
EMILIA BACHTIAK-RADKA
SARA DUDZIŃSKA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.8-9.116>

Współcześnie wytwarzane maszyny muszą się odznaczać coraz lepszymi właściwościami funkcjonalnymi oraz eksploatacyjnymi. Urządzenia powinny pracować szybciej, wydajniej i z większymi przyspieszeniami, a jednocześnie zużywać mniej energii niż było to jeszcze kilka lat temu. Wymagania te dotyczą – bez wyjątków – produktów z branży samochodowej, lotniczej i obrabiarkowej, a także maszyn służących człowiekowi w życiu codziennym do zabawy czy nauki. Jednocześnie wymagana jest gwarancja długiej i bezawaryjnej pracy. W związku z tym coraz trudniejszym zadaniem dla technologa jest przygotowanie części spełniających bardzo restrykcyjne wymagania dokładności wymiarowo-kształtowej oraz stanu struktury geometrycznej powierzchni (SGP). Również coraz większy nacisk kładzie się na spełnienie dodatkowych wymagań funkcjonalnych powierzchni części (dotyczących właściwości hydrofobowych lub hydrofilowych, stopnia izotropowości czy zdolności do utrzymywania powłok i smarów). W artykule przedstawiono wyniki pracy mającej na celu określenie wpływu technologicznych parametrów frezowania i nagniatania przy obróbce powierzchni części w stanie ulepszonym cieplnie do wysokiej twardości. Uwagę skupiono zwłaszcza na określeniu wpływu strategii realizowanej obróbki na zmiany wartości wskaźników SGP opisujących nośność powierzchni. **SŁOWA KLUCZOWE:** hybrydowe technologie, technologiczne parametry obróbki, struktura geometryczna powierzchni, nośności powierzchni

Today's machines have to be characterized by increasingly better functional and operational properties. The devices should work faster, more efficiently with higher accelerations and at the same time use less energy than it was a few years ago. These requirements apply to the products from the automotive industry, aviation machine tools or machines serving people in everyday life to play or learn. At the same time, a guarantee of long and trouble-free operation is required. In connection with the above, it is increasingly difficult for the technologist to prepare parts that meet the very strict requirements of dimensional and shape accuracy and the state of the geometric structure of the surface (SGP). Also, more and more emphasis is placed on meeting the additional functional requirements of the part surface (hydrophobic or hydrophilic properties, the degree of isotropy or the ability to maintain coatings and lubricants). The paper presents the results of the work aimed at determining the effect of technological parameters of milling and burnishing when treating the surface of parts in the state improved by heat to high hardness. The work focused in particular on the determination of the impact

of the strategy of the implemented treatment on changes in the value of SGP indices describing the load-bearing capacity of the surface.

KEYWORDS: hybrid technologies, technological parameters of machining, geometric surface structure, surface bearing capacity

Wymagane właściwości funkcjonalne powierzchni są nadawane przez technologa na drodze coraz bardziej skomplikowanych procesów wytwórczych. Jedną z chętniej stosowanych technologii, która pozwala na redukcję wysokościowych parametrów powierzchni [1–14], jest połączenie objętościowej obróbki skrawaniem z wykończeniową obróbką plastyczną powierzchni przez nagniatanie. Oprócz korzystnego stanu SGP (dzięki znacznej redukcji wysokościowych parametrów chropowatości po frezowaniu [1–9] czy toczeniu [10–13]) oraz poprawy refleksyjności i stopnia izotropowości powierzchni otrzymuje się korzystny z punktu widzenia wytrzymałości zmęczeniowej stan naprężeń w warstwie powierzchniowej części [1, 11–13]. Końcowy stan po operacji obróbkowej integrującej dwa zabiegi (obróbkę ubytkową z obróbką plastyczną) w głównej mierze zależy od stanu SGP uzyskanego w wyniku realizacji pierwszego zabiegu, tj. obróbki wiórowej [14].

Prace prowadzone dotychczas w ITM ZUT w Szczecinie potwierdziły, że stan SGP po obróbce wiórowej (frezowaniu [1, 2]) można w prosty sposób modyfikować przez nagniatanie dwoma przejściami – pod warunkiem uwzględnienia specjalnej strategii obróbki (odpowiedniej trajektorii narzędzia nagniatającego w stosunku do kierunku śladów pozostawionych przez frez).

Korzystne efekty można również uzyskać w przypadku materiałów ulepszonych cieplnie do znacznych twardości. Wtedy nagniatanie dwoma przejściami daje równie dobre efekty jak użycie siły nagniatania F_b o wysokiej wartości. Takie nagniatanie zapewnia też dłuższą trwałość ceramicznych elementów nagniatających (wykonanych z ZrO_2 czy Al_2O_3) i jest bezpieczniejsze pod względem stanu naprężeń wytworzonego w warstwie wierzchniej części.

W literaturze związanej z tematem pracy często przytaczany jest wniosek o poprawie kształtu krzywej nośności (Abbotta–Firestone'a). Większość prac poświęconych temu zagadnieniu koncentruje się jednak na optymalizacji zestawu technologicznych parametrów obróbki (w tym zwłaszcza siły nagniatania F_b), natomiast brakuje wyników badań dotyczących wpływu strategii nagniatania na wartości parametrów opisujących kształt krzywej nośności.

Wspomniany brak publikacji oraz zainteresowanie szczecińskiego zespołu badaczy tematem poprawy właściwości tribologicznych powierzchni przestrzennych

* Dr inż. Daniel Grochała (daniel.grochala@zut.edu.pl), mgr inż. Emilia Bachtiak-Radka (emilia.bachtiak-radka@zut.edu.pl), mgr inż. Sara Dudzińska (sara.dudzinska@zut.edu.pl) – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

takich wyrobów, jak formy wtryskowe i matryce, skłoniły naukowców do wykonania odpowiednich badań doświadczalnych.

Badania doświadczalne

Do badań dotyczących poprawy właściwości krzywej nośności powierzchni włączono również wybrane wysokościowe parametry SGP. Prace prowadzono na próbkach wykonanych z materiału X160CrMoV121, które następnie ulepszono cieplnie do twardości 52 ± 2 HRC. Frezowanie kształtujące przeprowadzono na centrum frezarskim DMG DMU-60 MONOBLOK. Do obróbki wykorzystano składany frez torusowy z sześcioma węglowymi płytkami (do obróbki materiałów trudnoskrawalnych RD.X1003 MOT – WTN1205) o średnicy $d_p = 10$ mm. Nagniatanie jednokulkowym nagniatkiem hydrostatycznym prowadzono na centrum frezarskim MIKRON VCE 500; w narzędziu zamontowano ceramiczną kulkę nagniatającą wykonaną z materiału ZrO_2 , o średnicy $d_k = 10$ mm. Pozostałe technologiczne parametry obróbki zestawiono w tabelicy.

Do badań wytypowano trzy strategie nagniatania. Pierwszą było nagniatanie w jednym przejściu prostopadłe do śladów pozostawionych przez frez (strategia ortogonalna – PO). Drugą strategią było nagniatanie w dwóch przejściach wzajemnie prostopadłych, gdzie pierwsze było ortogonalne do śladów frezowania (strategia podwójnie prostopadła – PP). Ostatnia z przyjętych strategii uwzględniała dwa wzajemnie prostopadłe przejścia nagniatające, przy czym oba realizowano pod kątem 45° względem śladów po frezowaniu (strategia skośna – SK).

Wpływ strategii sprawdzono dla dwóch przypadków wierśzowania przy nagniataniu: $f_{wf} = 0,3$ oraz $f_{wf} = 0,5$ mm. W trakcie badań przygotowano łącznie 16 próbek, w tym 14 frezowanych i nagniatanych (dwie próbki po frezowaniu pozostawiono jako próbki referencyjne).

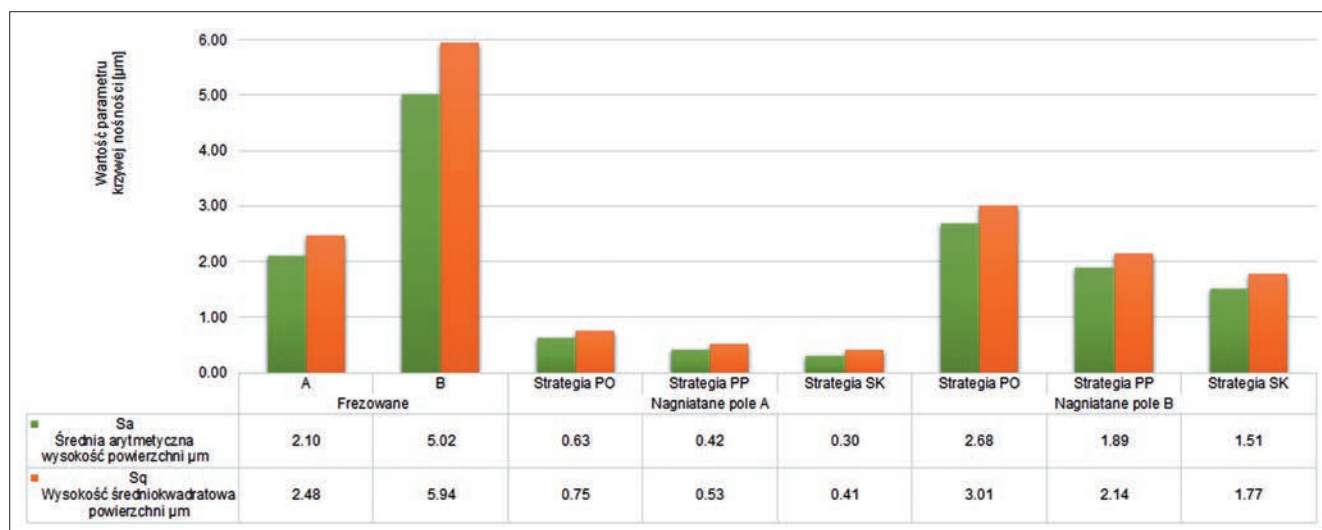
Pomiary powierzchni i opracowanie wyników badań

Pomiary SGP prowadzono w Laboratorium Topografii Powierzchni (LTP) ZUT w Szczecinie. Do tego celu wykorzystano multisensoryczną maszynę AltSurf A520, uzbrojoną w chromatyczny sensor konfokalny CL1 [15] o zakresie pracy do $130 \mu m$ i rozdzielczości w optycznej osi przyrządu 8 nm. Pomiary wykonano na polach o wymiarach $3,0 \times 3,0$ mm. Eksperymentalnie ustalono rozdzielczość skanowania: wzdłuż osi X – $0,47 \mu m$, wzdłuż osi Y – $5 \mu m$; dało to prawie 3,8 mln punktów odwzorowania dla każdej z powierzchni.

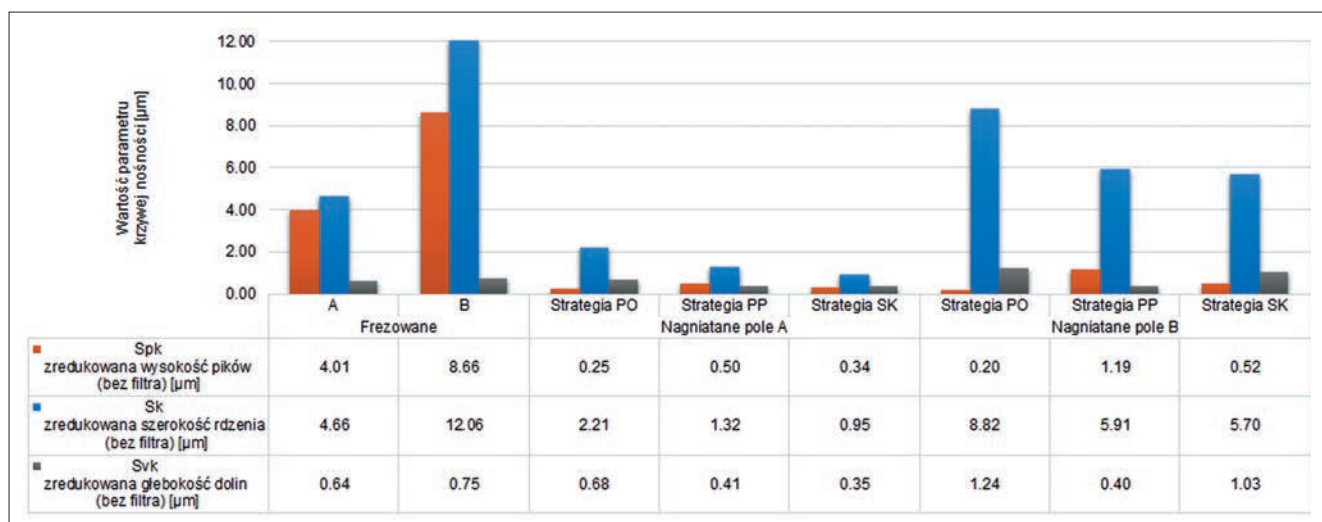
Cyfrową obróbkę zebranej chmury punktów oraz wyznaczenie wartości stereometrycznych parametrów SGP (zgodnie z [16, 17]) wykonano w oprogramowaniu AltMap PREMIUM 6.2. Dla każdego skanu powierzchni zebraną chmurę punktów poziomowano (płaszczyznę średnią, aproksymowaną metodą najmniejszych kwadratów), a następnie usuwano błędnie zebrane punkty powierzchni (wartości progowe przyjęto z przedziału $0,05 \div 99,95\%$, natomiast punkty usuwane ustawiono jako wartości niemierzone). Na koniec wyznaczono wartości najpopularniejszych wśród konstruktorów i technologów parametrów opisujących wysokość powierzchni – Sa i Sq (rys. 1) – oraz wartości parametrów wykorzystywanych w opisie nośności powierzchni [16, 17] (rys. 2).

TABLICA. Zestaw technologicznych parametrów obróbki przyjętych w planie badań doświadczalnych

Strategia	Prędkość skrawania v_c , m/min	Głębokość warstwy skrawanej a_p , mm	Posuw na obrót f_r , mm/obr	Posuw poprzeczny frezowania (wierśzowanie) f_{wf} , mm		Posuw poprzeczny przy nagniataniu f_{wn} , mm	Prędkość nagniatania v_b , mm/min	Siła nagniatania F_b , N	Średnica kulki nagniatającej d_k , mm
PO	110	0,5	0,6	A = 0,3	B = 0,5	0,02	8000	800	10
PP	110	0,5	0,6	A = 0,3	B = 0,5	0,02	8000	800	10
SK	110	0,5	0,6	A = 0,3	B = 0,5	0,02	8000	800	10



Rys. 1. Wartości wysokościowych parametrów powierzchni, zarejestrowane w trakcie badań zgodnie z ISO 25178



Rys. 2. Wartości funkcjonalnych parametrów powierzchni, zarejestrowane w trakcie badań zgodnie z ISO 25178

Podsumowanie i wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych można stwierdzić, że zastosowanie już niewielkiej siły nagniatania pozwala znacząco zmniejszyć wartości wysokościowych parametrów SGP. Efektywność niwelowania nierówności powierzchni jest tym większa, im mniejsze nierówności pozostawił frez. Widoczny jest również istotny wpływ zastosowanej strategii nagniatania. We wszystkich przypadkach strategię z dwoma przejściami nagniatającymi okazały się o ok. 40÷100% lepsze od nagniatania w jednym, ortogonalnym przejściu. Najlepszą strategią spośród wytypowanych do badań była strategia skośna SK – w szczególnych przypadkach pozwala ona zmniejszyć wysokościowe parametry nierówności powierzchni nawet o ponad 70%. Jest to bardzo korzystne, biorąc pod uwagę zalety płynące z integracji technologii frezowania i nagniatania na centrach obróbkowych CNC.

Bardzo interesujące wnioski płyną z analizy wartości parametrów SGP, opisujących kształt krzywej nośności powierzchni. Okazuje się, że nagniatanie w pierwszej kolejności niweluje wysokie piki powierzchni, czyniąc ją bardziej odporną na zużycie ścierne. Jest to wyraźnie widoczne zwłaszcza w przypadku nagniatania „wysokich” nierówności powierzchni – powstałe płaskowyzę plateau dają duże pole kontaktu powierzchni, a jednocześnie nie zmieniają objętości rdzenia i dolin, przez co pozostawiają miejsca, w których mogą się utrzymywać środki smarne.

W przyszłości opracowany materiał badawczy zostanie poddany próbom tribologicznym, mającym na celu praktyczne zweryfikowanie własności tribologicznych opisanych krzywą nośności powierzchni.

LITERATURA

- Grochała D., Berczyński S., Grządziel Z. "Stress in the surface layer of objects burnished after milling". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 71, 9–12 (2014).
- Grochała D., Sosnowski M. "Problemy technologii nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych na centrach obróbkowych". *Mechanik*. 1 (2011): s. 14–18.
- Lopez de Lacalle L.N., Lamikiz A., Munoa J., Sanchez J.A. "Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing". *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 45 (2005): s. 1659–1668.
- Lopez de Lacalle L.N., Lamikiz A., Sanchez J.A., Arana J.L. "The effect of ball burnishing on heat-treated steel and Inconel 718 milled surfaces". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 32 (2007): s. 958–968.
- Rodríguez A., López de Lacalle L.N., Celaya A., Lamikiz A., Albizuri J. "Surface improvement of shafts by the deep ball burnishing technique". *Surface & Coatings Technology*. 206 (2012): s. 2817–2824.
- Shiou F.J., Chen C.H. "Determination of optimal ball burnishing parameters for plastic injection moulding steel". *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 3 (2003): s. 177–185.
- Shiou F.J., Chen C.H. "Ultra-precision surface finish of NAK80 mould tool steel using sequential ball burnishing and ball polishing processes". *Journal of Materials Processing Technology*. 201 (2008): s. 554–559.
- Shiou F.J., Chuang C.H. "Precision surface finish of the mold steel PDS5 using an innovative ball burnishing tool embedded with a load cell". *Precision Engineering*. 34 (2010): s. 76–84.
- Kalisz J., Żak K., Grzesik W., Czechowski K. "Characteristics of surface topography after rolling burnishing of EM AW-AlCu4MgSi(A) Aluminum alloy". *Journal of Machine Engineering*. 15, 1 (2015): s. 71–80.
- Grzesik W., Żak K. "Investigation of technological effects of ball burnishing after cryogenic turning of hard steel". *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 38, 1 (2014): s. 37–52.
- Kukielka L., Kułakowska A., Patyk R. "Numerical Analysis and Experimental Researches of Burnishing Rolling Process of Workpieces with Real Surface". *The 13th World Multi-Conference on Systemics, Cybernetics and Informatics*, Orlando, Floryda, 2009, s. 63–68.
- Kułakowska A., Kukielka L. "Numerical analysis of influence of surface geometrical structure prepared under burnishing rolling onto the state of strains and stress in product surface layer". *Computer Methods in Materials Science*. Kraków 2009, s. 66–71.
- Patyk R., Kukielka L. "Optimization of geometrical parameters of regular triangular asperities of surface put to smooth burnishing". *The 12th International Conference Metalforming 2008*, AGH Kraków, 21–24 September 2008. *Steel Research International Special Edition*. Vol. 2, 2008. Publishing Company VerlagStahleisen GmbH, ISBN 978-3-514-00745-3, s. 642–647.
- Polowski W., Czechowski K., Toboła D., Rusek P., Kalisz J., Janczewski Ł. „Wybrane aspekty obróbki wiórowej jako obróbki poprzedzającej nagniatanie”. Monografia VI Szkoły Obróbki Skrawaniem – Obróbka Skrawaniem Efektywne Wytwarzanie. Wrocław 2012, ISBN 978-83-91-917677-7-1, s. 503–512.
- Mathia T., Pawlus P., Wiczorowski M. "Recent trends in surface metrology". *Wear*. 271 (2011): s. 494–508.
- ISO 25178-1:2016(en) Geometrical product specifications (GPS). Surface texture: Areal – Part 1. Indication of surface texture.
- ISO 25178-2 Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2. Terms, definitions and surface texture parameters.