

Wpływ nagniatania ślizgowego kompozytem diamentowym na topografię powierzchni utwardzonych stali narzędziowych do obróbki plastycznej na zimno

Influence of slide burnishing with diamond composite on surface topography of hardened tool steels for cold working

DANIEL TOBOŁA
ANETA ŁĘTOCHA*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.12.197>

Przedstawiono wyniki analizy topografii powierzchni wybranych stali narzędziowych, przeznaczonych do obróbki plastycznej na zimno, po sekwencyjnym procesie toczenia na twardo i nagniatania ślizgowego końcówką z kompozytu diamentowego z 10-proc. dodatkiem TiB_2 . Obróbkę cieplną badanych gatunków stali przeprowadzono w piecu próżniowym. Uzyskano odpowiednio twardość: 55 ± 1 HRC (Sverker 21), 59 ± 1 HRC (Vanadis 6), 64 ± 1 HRC (Vanadis 8), 67 ± 1 HRC (Vanadis 60) oraz 62 ± 1 HRC (Vancron 40). Ukształtowane powierzchnie analizowano pod kątem stereometrycznych cech charakteryzujących warstwę wierzchnią (WW). Wyniki dowodzą, że zastosowanie obróbki sekwencyjnej, łączącej operacje kształtowania ubytkowego i bezubytkowego, pozwala na uzyskanie struktury geometrycznej powierzchni (SGP) charakteryzującej się niskimi wartościami parametru Sa oraz korzystnym kształtem krzywej udziału materiałowego.

SŁOWA KLUCZOWE: toczenie, nagniatanie ślizgowe, topografia powierzchni, udział materiałowy

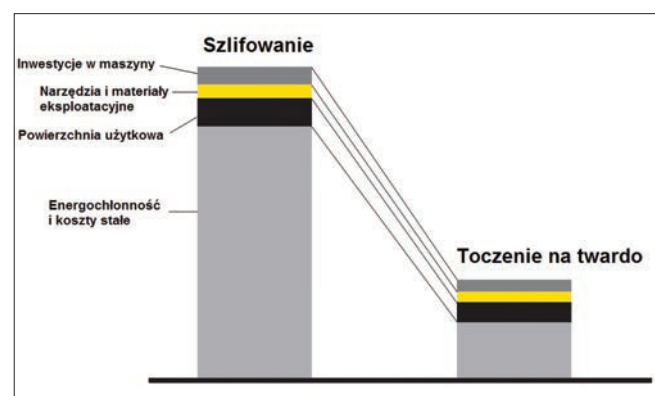
*Results of the topography analysis of selected tool steels for cold working after a sequential process of turning and slide burnishing using a diamond composite end tip with a 10% TiB_2 addition are presented. Heat treatment of investigated steel grades were carried out in a vacuum furnace to achieve following hardness: 55 ± 1 HRC (Sverker 21), 59 ± 1 HRC (Vanadis 6), 64 ± 1 HRC (Vanadis 8), 67 ± 1 HRC (Vanadis 60) and 62 ± 1 HRC (Vancron 40). Formed surfaces were analyzed for stereometric features characterizing the surface layer (SL). The results prove that the use of sequential treatment combining removal and non-removal operations allows to obtain a surface geometrical structure (SGS) characterized by low values of the Sa parameter and a favorable shape of the material ratio curve. **KEYWORDS:** turning, slide burnishing, surface topography, material ratio*

Wysokie wymagania technologiczne dotyczące jakości, funkcjonalności i niezawodności obrabianych części wyraźnie wpłynęły na postęp w dziedzinie metrologii powierzchni. W rezultacie powierzchnie funkcjonalne, kształtowane w różnych procesach produkcyjnych, można scharakteryzować z większą dokładnością [1].

Jedną z głównych cech jakości technologicznej narzędzi do obróbki plastycznej na zimno jest ich odporność na zużycie tribologiczne, determinowana m.in. przez właściwości WW. Te właściwości są kształtowane w procesach obróbki mechanicznej, często poprzedzanych obróbką cieplną. Istotne znaczenie dla odporności na zużycie współpracujących elementów ma chropowatość ich powierzchni. Istnieje wiele rodzajów mechanicznej obróbki wykończeniowej, umożliwiających ukształtowanie dowolnie gładkiej powierzchni.

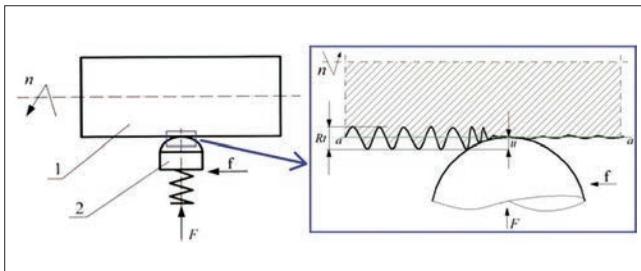
Typową obróbką wykończeniową narzędzi do obróbki plastycznej na zimno jest szlifowanie, które jest procesem pracochłonnym i drogim, np. w porównaniu z toczeniem na twardo, co przedstawiono na rys. 1 (wysokość słupków jest proporcjonalna do ponoszonych kosztów) [2].

Według szacunków różnych autorów [2, 3] koszt szlifowania stanowi przeciętnie 40÷70% całkowitych kosztów wykonania wyrobów precyzyjnych i może wielokrotnie przewyższać koszty obróbki wiórowej (np. toczenia i frezowania). Dzięki osiągnięciom producentów narzędzi w wielu przypadkach można dokonać korzystnej zamiany wstępnego szlifowania na toczenie na twardo, które jest 4÷6 razy tańsze od szlifowania. Kinetyka procesu nagniatania ślizgowego, identyczna z toczeniem, otwiera nowe możliwości opłacalnego zastępowania szlifowania procesem toczenia na twardo z późniejszym nagniataniem.



Rys. 1. Estymacja kosztów szlifowania i toczenia na twardo [2], opracowana na podstawie badań przeprowadzonych przez Fraunhofer-Institut für Produktions-technologie IPT

* Dr inż. Daniel Toboła (daniel.tobola@ios.krakow.pl), mgr inż. Aneta Łętocha (aneta.letocha@ios.krakow.pl) – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania



Rys. 2. Schemat procesu nagniatania ślizgowego narzędziem kulistym: 1 – obrabiany przedmiot, 2 – narzędzie, F – siła nagniatania, f – posuw nagniatania, Rt – całkowita wysokość profilu, u – wgłębienie narzędzia, $a-a$ – linia średnia profilu nierówności obrabianej powierzchni [5]

Stosowanie narzędzi do nagniatania w typowych obrabiarkach skrawających umożliwia wykonanie zabiegów obróbki kształtującej i wykończeniowej na jednym stanowisku roboczym. Często zbędna jest wówczas operacja szlifowania, wykonywana na innym stanowisku, co zmniejsza koszty produkcji. W ramach jednego zamocowania wykonuje się kolejne zabiegi toczenia i nagniatania narzędziami zamocowanymi w głowicy narzędziowej obrabiarki. Taki sposób realizacji zabiegu wykończeniowej obróbki przez nagniatanie jest korzystny również ze względu na dokładność kształtowo-wymiarywą [4].

Ponadto nagniatanie ślizgowe, zwane wygładzaniem ślizgowym, służy głównie do gładkościowej obróbki materiałów twardych i niekiedy powłok ochronnych – zapewnia otrzymanie powierzchni o małej chropowatości ($Ra = 0,1 \mu\text{m}$).

W trakcie tego procesu zaokrąglona końcówka narzędzia jest dociskana i równocześnie ślizga się po obrabianej powierzchni (tarcie ślizgowe), powodując plastyczne odkształcenie wierzchołków nierówności i wygładzenie powierzchni (rys. 2) [5, 6].

Przedmiotem niniejszych badań było określenie wpływu nagniatania ślizgowego wybranych stali narzędziowych o różnej twardości (od 55 ± 1 do 67 ± 1 HRC) na stereo-metryczne cechy charakteryzujące WW.

Metodyka badań

Do badań wybrano pięć gatunków wysokostopowych stali narzędziowych, przeznaczonych do pracy na zimno, wytworzonych dwiema metodami przez szwedzką hutę Bohler Uddeholm. Skład chemiczny tych stali podano w tabl. I. Próbkę o wymiarach $\varnothing 32 \times 25$ mm toczono wstępnie, a potem obrabiano cieplnie (hartowano i odpuszczano zgodnie z zaleceniami producenta) w piecu próżniowym z hartowaniem gazowym, do uzyskania odpowiednio twardości: 55 ± 1 HRC (Sverker 21), 59 ± 1 HRC (Vanadis 6), 64 ± 1 HRC (Vanadis 8), 67 ± 1 HRC (Vanadis 60) oraz 62 ± 1 HRC (Vancron 40). Mikrostruktura stali po obróbce cieplnej składała się głównie z osnowy o strukturze martenzytycznej oraz różnej ilości i rodzaju nierozpuszczonych węglików (np. MC, M_6C , $M_{23}C_6$).

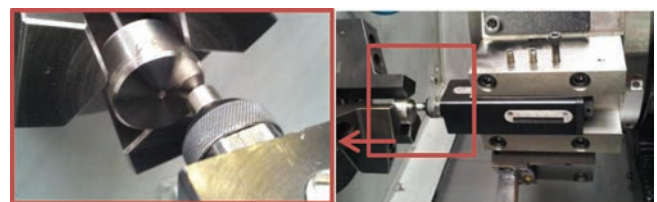
Toczenie wykończeniowe, poprzedzające proces nagniatania ślizgowego, oraz samo nagniatanie prowadzono na sterowanym numerycznie centrum tokarsko-frezarskim NL2000 SY firmy Mori Seiki. Stosowano system mocowania próbki w jednym wrzecionie tokarskim (rys. 3). Toczenie realizowano z użyciem płytek z ostrzami z PCBN firmy Mitsubishi, oznaczonych symbolem NP-DCGW11T302GA2 MBC020. Zastosowane parametry podano w tabl. II.

TABLICA I. Skład chemiczny badanych stali oraz metoda ich otrzymania

Gatunek stali	Skład chemiczny								
	C	N	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Co
Sverker 21* (AISI D2)	1,55	–	0,3	0,4	11,8	0,8	–	0,8	–
Vanadis 6**	2,1	–	1,0	0,4	6,8	1,5	–	5,4	–
Vanadis 8**	2,3	–	0,4	0,4	4,8	3,6	–	8,0	–
Vanadis 60**	2,3	–	0,5	0,3	4,2	7,0	6,5	6,5	10,5
Vancron 40**	1,1	1,8	0,5	0,4	4,5	3,2	3,7	8,5	–

* Konwencjonalna technologia metalurgiczna

** Technologia metalurgii proszków



Rys. 3. Nagniatana powierzchnia czołowa próbki zamocowanej w jednym wrzecionie tokarskim

TABLICA II. Parametry toczenia wykończeniowego płytkami z ostrzami z PCBN

Stal	Prędkość skrawania v_c , m/min	Posuw f , mm/obr	Głębokość skrawania a_p , mm
Sverker 21	150	0,07	0,2
Vanadis 6	100	0,07	0,2
Vanadis 8	100	0,07	0,2
Vanadis 60	100	0,07	0,2
Vancron 40	160	0,07	0,2

Nagniatanie ślizgowe przeprowadzono z dociskiem sprężystym, uzyskanym za pomocą narzędzia zaprojektowanego i wykonanego w Instytucie Zaawansowanych Technologii Wytwarzania (IZTW). Obecnie do nagniatania ślizgowego stosuje się diamenty syntetyczne, tzw. spieki diamentowe (PCD), otrzymywane m.in. metodą spiekania wysokociśnieniowego HP – HT (*high pressure – high temperature*). Kompozyty te składają się z ziaren diamentu i fazy wiążącej. W tym przypadku na końcówki nagniatające zastosowano kompozyt diamentowy (wzmocniony 10-proc. dodatkiem TiB_2) o promieniu $R = 1,5$ mm czaszy kulistej.

W celu zmniejszenia tarcia i wydłużenia trwałości nagniataków w procesie nagniatania stosowano – jako środek smarujący, podawany w postaci mgły olejowej – olej maszynowy Hysol firmy Castrol. Wykonywano jedno przejście nagniatające ($i = 1$). Prędkość nagniatania była stała i wynosiła $v \approx 40$ m/min. Na podstawie wyników wcześniejszych badań i dotychczasowego doświadczenia zdecydowano się przyjąć stałe parametry nagniatania ślizgowego: siłę nagniatania $F = 180$ N, posuw nagniatania $f = 0,02$ mm/obr, dosuw narzędzia do powierzchni nagniatanej (ugięcie sprężyny) $u = 0,2$ mm.

Pomiary topografii powierzchni przeprowadzono za pomocą stykowego profilometru TOPO 01P, produkcji IZTW, zgodnie z parametrami podanymi w tabl. III.

TABLICA III. Dane i wybrane parametry stykowego profilometru – TOPO 01P

Promień końcówki diamentowej	2 μm
Kąt stożka	60°
Gęstość skanowania	0,5 μm (oś pomiaru) 10 μm (kierunek prostopadły do osi pomiaru)
Analizowany obszar	4 × 4 mm

Do obróbki danych zastosowano filtrację Gaussa zgodną z ISO 16610-21. Analizowano zmiany jakościowe badanych powierzchni, związane z wykresami stereometrycznymi, izotropią powierzchni, mapami warstwicowymi oraz wykresami udziału materiałowego z oznaczonym rdzeniem chropowatości. Wykonano analizę statystyczną wybranych wysokościowych parametrów chropowatości oraz parametrów rdzenia chropowatości.

Wyniki

W celach porównawczych na rys. 4 zamieszczono wykres topografii powierzchni wraz z mapą warstwicową oraz krzywą udziału materiałowego dla wybranej stali po toczeniu na twardo. Wyniki pomiarów SGP w układzie 3D po nagniataniu ślizgowym utwardzonych stali narzędziowych do obróbki plastycznej na zimno pokazano na rys. 5.

Zmiany krzywych udziału materiałowego w zależności od rodzaju stali narzędziowych o różnej twardości po toczeniu i nagniataniu zaprezentowano na rys. 6. Dla porównania zamieszczono również krzywą udziału materiałowego dla stali narzędziowej Vanadis 8 po procesie toczenia.

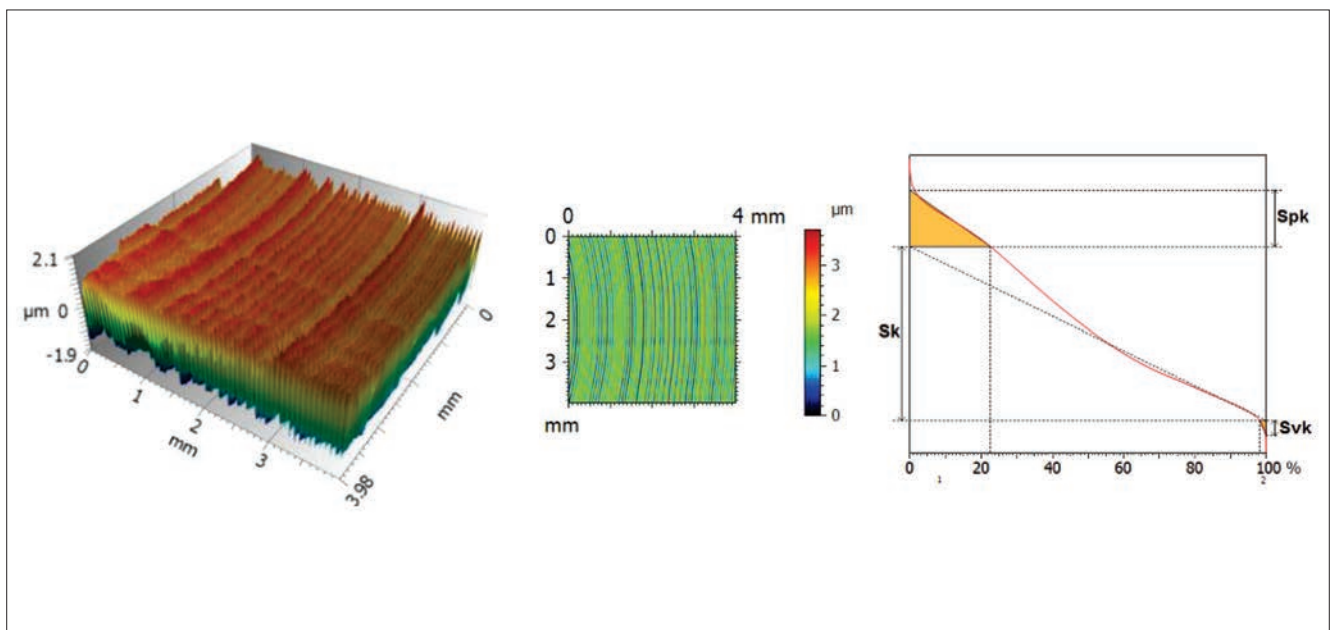
Wybrane parametry chropowatości powierzchni badanych stali narzędziowych po toczeniu oraz po toczeniu i nagniataniu ślizgowym ($F = 180 \text{ N}$, $f = 0,02 \text{ mm/obr}$) zamieszczono w tabl. IV, natomiast na rys. 7 przedstawiono graficzne porównanie wartości parametrów chropowatości S_a i S_z .

Wśród wielkości opisujących SGP w odniesieniu do charakterystyk tribologicznych największe znaczenie mają parametry określające chropowatość samej powierzchni oraz kierunkowość struktury, a więc parametry wpływające na stopień izotropowości struktury [7]. Diagramy kierunkowości powierzchni po toczeniu oraz po toczeniu i nagniataniu ślizgowym, zarejestrowane dla powierzchni badanych stali narzędziowych, zamieszczono na rys. 8.

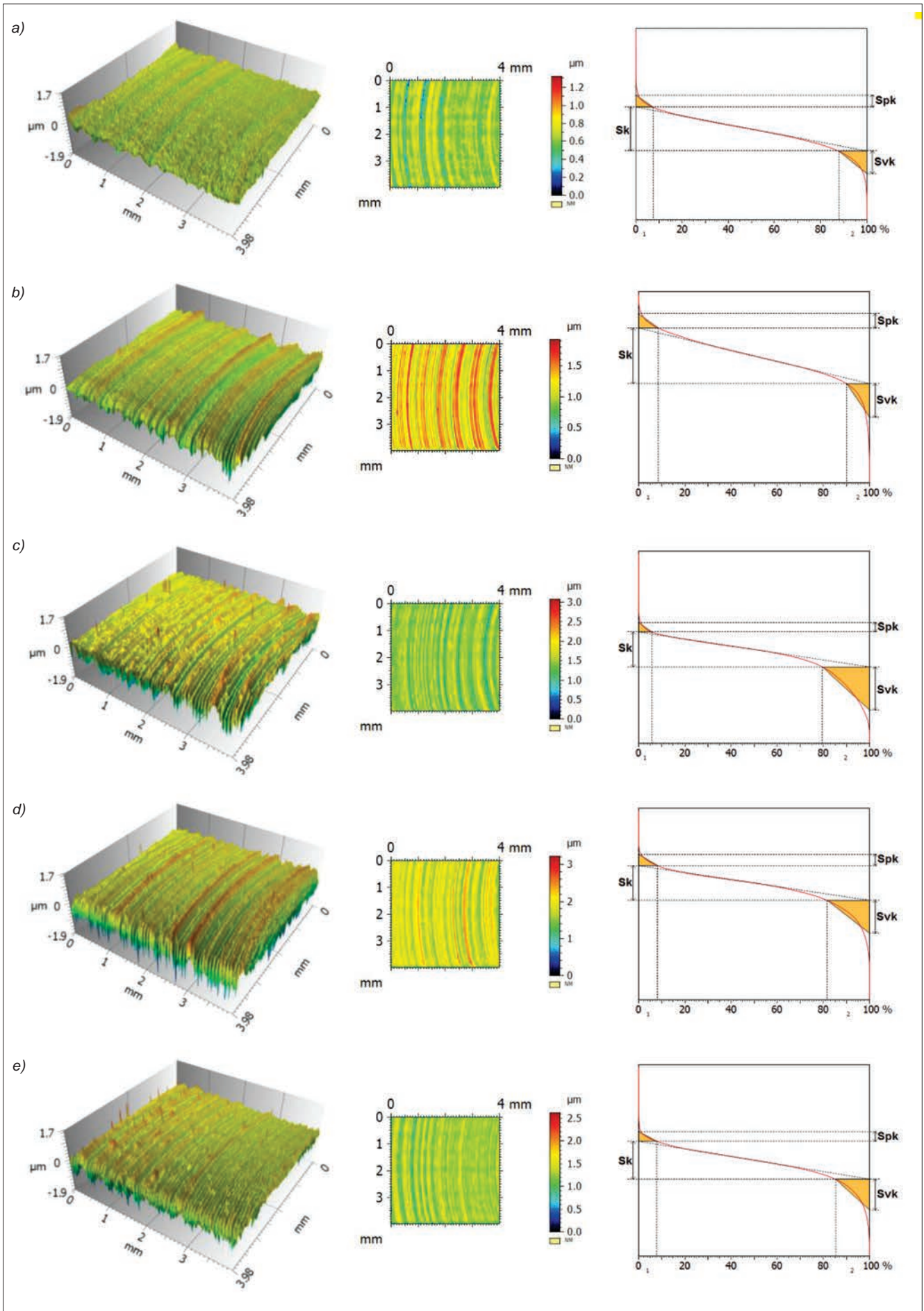
TABLICA IV. Parametry chropowatości powierzchni badanych stali narzędziowych po toczeniu i nagniataniu ślizgowym ($F = 180 \text{ N}$, $f = 0,02 \text{ mm/obr}$)

Stal	Proces	Twardość HRC	S_p , μm	S_v , μm	S_z , μm	S_a , μm	S_k , μm	S_{pk} , μm	S_{vk} , μm
Sverker 21	T+N	55 ± 1	0,69	0,64	1,32	0,10	0,31	0,09	0,16
Vanadis 6	T+N	59 ± 1	0,66	1,27	1,93	0,17	0,55	0,14	0,34
Vancron 40	T+N	62 ± 1	1,34	1,29	2,62	0,18	0,52	0,13	0,42
Vanadis 8	T	64 ± 1	2,03	1,69	3,72	0,79	2,18	0,71	0,19
Vanadis 8	T+N	64 ± 1	1,66	1,46	3,07	0,25	0,57	0,16	0,70
Vanadis 60	T+N	67 ± 1	1,35	1,87	3,23	0,24	0,61	0,20	0,57

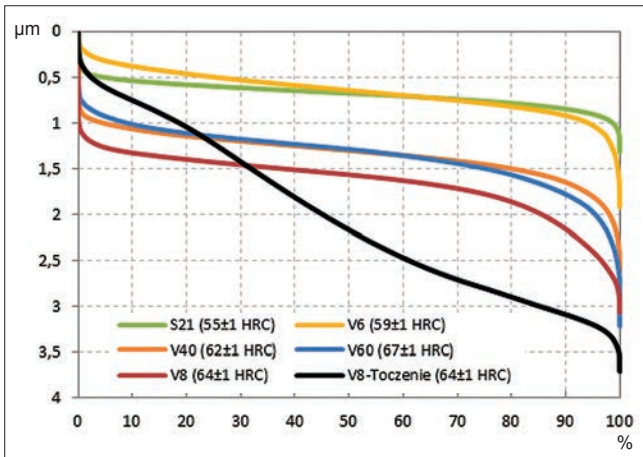
T – toczenie, T+N – toczenie + nagniatanie



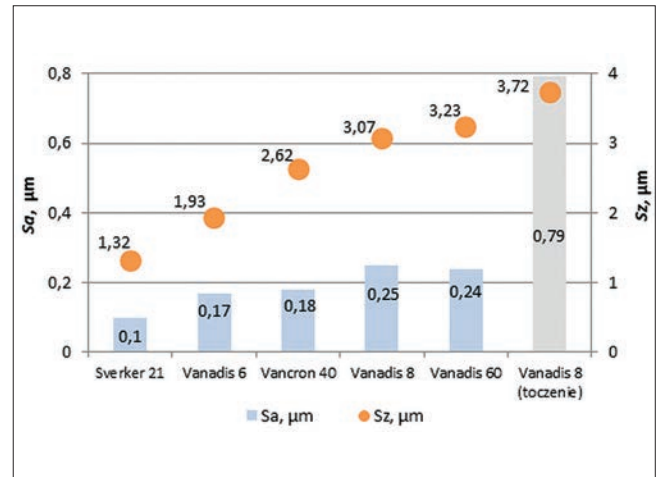
Rys. 4. Wykres topografii powierzchni wraz z mapą warstwicową oraz krzywą udziału materiałowego dla próbki ze stali narzędziowej Vanadis 8 po toczeniu ($v_c = 100 \text{ m/min}$, $f = 0,07 \text{ mm/obr}$, $a_p = 0,2 \text{ mm}$)



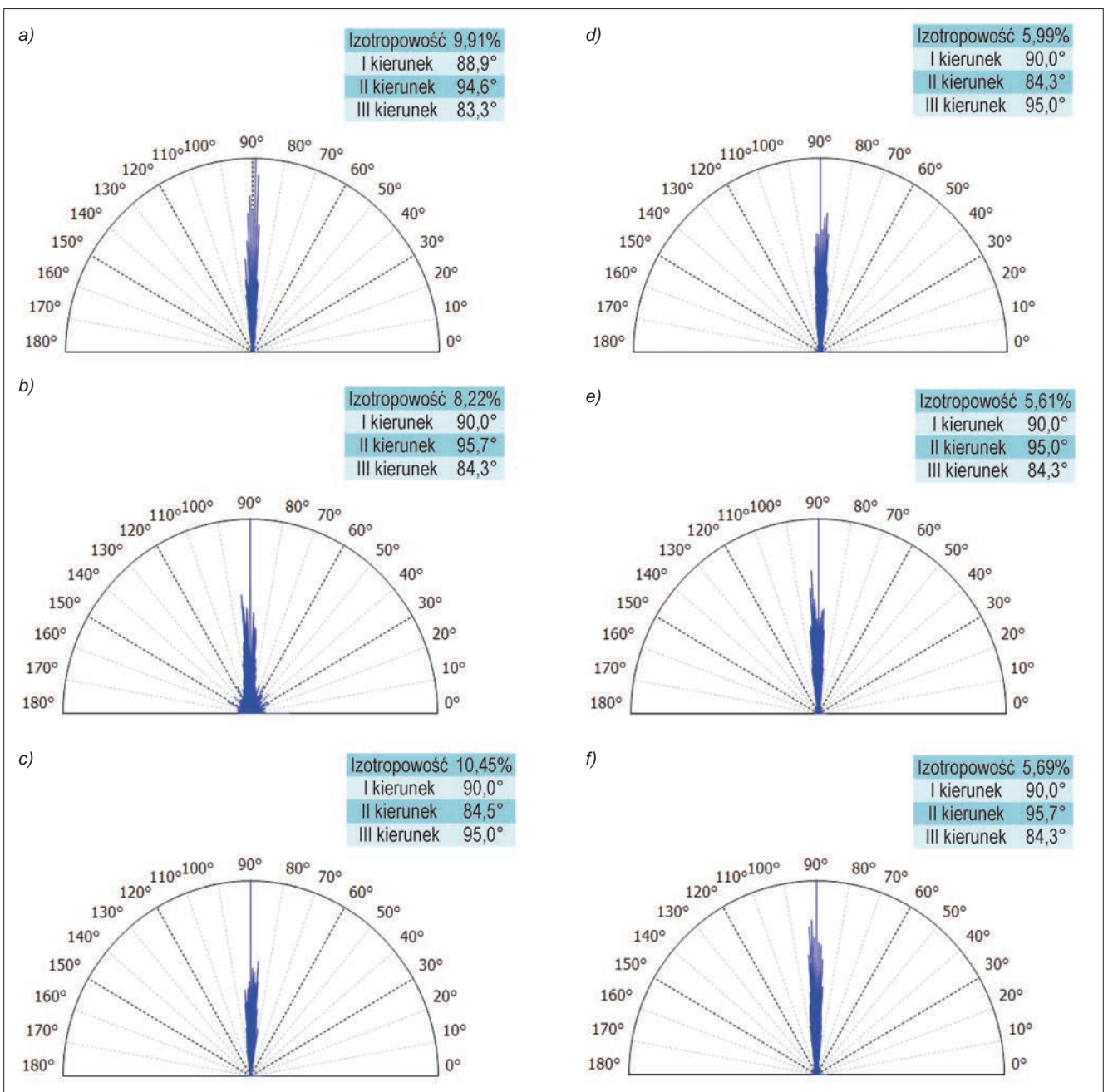
Rys. 5. Wykresy topografii powierzchni wraz z mapami warstwicowymi oraz krzywymi udziału materiałowego dla próbek ze stali narzędziowych po toczeniu i nagniataniu ślizgowym ($F = 180 \text{ N}$, $f = 0,02 \text{ mm/obr}$): a) Sverker 21, b) Vanadis 6, c) Vanadis 8, d) Vanadis 60, e) Vancron 40



Rys. 6. Porównanie krzywych udziału materiałowego dla powierzchni po toczeniu (Vanadis 8) oraz po toczeniu i nagniataniu ślizgowym w odniesieniu do badanych stali narzędziowych o różnej twardości po obróbce cieplnej



Rys. 7. Porównanie wartości parametrów Sa i Sz powierzchni badanych stali narzędziowych po toczeniu oraz po toczeniu i nagniataniu ($F = 180 \text{ N}$, $f = 0,02 \text{ mm/obr}$)



Rys. 8. Porównanie kierunkowości struktury powierzchni po toczeniu stali Vanadis 8 (a) oraz po toczeniu i nagniataniu ślizgowym ($F = 180 \text{ N}$, $f = 0,02 \text{ mm/obr}$) badanych stali narzędziowych: b) Sverker 21, c) Vanadis 6, d) Vanadis 8, e) Vanadis 60, f) Vancron 40

Podsumowanie

Na podstawie badań i analiz, wykonanych pod kątem stereometrycznych cech charakteryzujących WW utwardzonych stali narzędziowych, przeznaczonych do obróbki plastycznej na zimno, poddanych sekwencyjnemu procesowi toczenia i nagniatania, można sformułować następujące wnioski:

- Nagniatanie ślizgowe kompozytem diamentowym (z 10-proc. dodatkiem TiB_2) utwardzonych stali narzędziowych do obróbki plastycznej na zimno prowadzi do zmniejszenia amplitudowych parametrów chropowatości powierzchni.

- Najniższe wartości parametrów chropowatości, m.in. parametru S_a , zarejestrowano w przypadku stali Sverker 21 ($S_a = 0,10 \mu m$), której twardość wynosiła 55 ± 1 HRC. Wraz ze wzrostem twardości badanych stali narzędziowych proporcjonalnie rosła wartość poszczególnych parametrów chropowatości.

- Najwyższe wartości parametrów chropowatości, m.in. parametru S_a , zarejestrowano dla stali Vanadis 8 i Vanadis 60, których twardość wynosiła odpowiednio 64 ± 1 HRC ($S_a = 0,24 \mu m$) i 67 ± 1 HRC ($S_a = 0,24 \mu m$). Niemniej jednak w porównaniu z powierzchnią toczonej wartość parametru S_a zmniejszyła się ponad trzykrotnie.

- Przebiegi krzywych udziału materiałowego (tzw. krzywych nośności) po nagniataniu ślizgowym przyjmują symetryczny charakter, zdecydowanie korzystniejszy w kontekście cech tribologicznych powierzchni. Po toczeniu na twardo (stal Vanadis 8) rejestrowano liniowy kształt krzywej udziału materiałowego.

- Po toczeniu i nagniataniu widoczny jest podział na dwie grupy powierzchni. Dla stali, których twardość była mniejsza od 60 HRC, stwierdzono największą amplitudę (lub wysokość) powierzchni S_z , co można również zauważyć na wykresach udziału materiałowego. Z kolei dla stali o twardości powyżej 60 HRC amplituda (wysokość) była mniejsza.

- Powierzchnie badanych stali narzędziowych po toczeniu i nagniataniu ślizgowym charakteryzują się zbliżoną kierunkowością SGP.

Badania zrealizowano w ramach projektu nr LIDER/ /13/0075/L-7/15/NCBR/2016 „Opracowanie innowacyjnej technologii kształtowania właściwości użytkowych narzędzi do obróbki plastycznej na zimno”, finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

LITERATURA

1. Grzesik W., Rech J., Żak K. "High-precision finishing hard steel surfaces using cutting, abrasive and burnishing operations". *Procedia Manufacturing*. 1 (2015): s. 619–627.
2. "Switch to hard part turning. High-productivity, high-quality finish turning of case-hardened steel surface". AB Sandvik Coromant, 2005.
3. Zębala W., Siwiec J. "Hard turning of cold work tool steel with CBN tools". *Advance in Manufacturing Science and Technology*. 36, 4 (2012): s. 19–32.
4. Przybylski W. "Zintegrowana obróbka toczeniem i nagniataniem". *Mechanik*. 12 (2011): s. 34–35.
5. Korzyński M. „Nagniatanie ślizgowe”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 2007.
6. Przybylski W. „Technologia obróbki nagniataniem”. Warszawa: Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, 1987.
7. Matuszewski M., Musiał J., Styp-Rekowski M. „Stopień izotropowości struktury powierzchni elementów maszyn a proces zużywania”. *Tribologia*. 6 (2012): s. 121–128. ■