

## **PORÓWNANIE POWIERZCHNI PO NAGNIATANIU WYBRANYMI NARZĘDZIAMI Z DOCISKIEM HYDROSTATYCZNYM**

**Piotr WASZCZUR, Michał DOBRZYŃSKI, Bogdan ŚCIBIORSKI, Stefan DZIONK**

**Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Maszyn  
i Automatykacji Produkcji**

### **STRESZCZENIE**

*W artykule przedstawiono wyniki z badań eksperymentalnych dotyczących oceny wpływu czynników wejściowych i stanu powierzchni obrabianej podczas procesu nagniatania narzędziami z dociskiem hydrostatycznym. Badania dotyczyły obróbki materiału w stanie utwardzonym po hartowaniu. Skoncentrowano się na ocenie wpływu posuwu i prędkości nagniatania oraz wstępnych wartości parametrów chropowatości powierzchni (uzyskanych w wyniku toczenia) na stan geometryczny powierzchni opisanej parametrami chropowatości. W badaniach nagniatania wykorzystano dwa narzędzia, w których elementami nagniatającymi były kulki. W dalszej części przeanalizowano i oceniono wpływ opisanych powyżej czynników i ich interakcji oraz przedstawiono uzyskane wyniki dla poszczególnych układów planu zrealizowanego eksperymentu.*

**Słowa kluczowe: nagniatanie, chropowatość powierzchni, parametry nagniatania, narzędzia z dociskiem hydrostatycznym**

### **1. WPROWADZENIE**

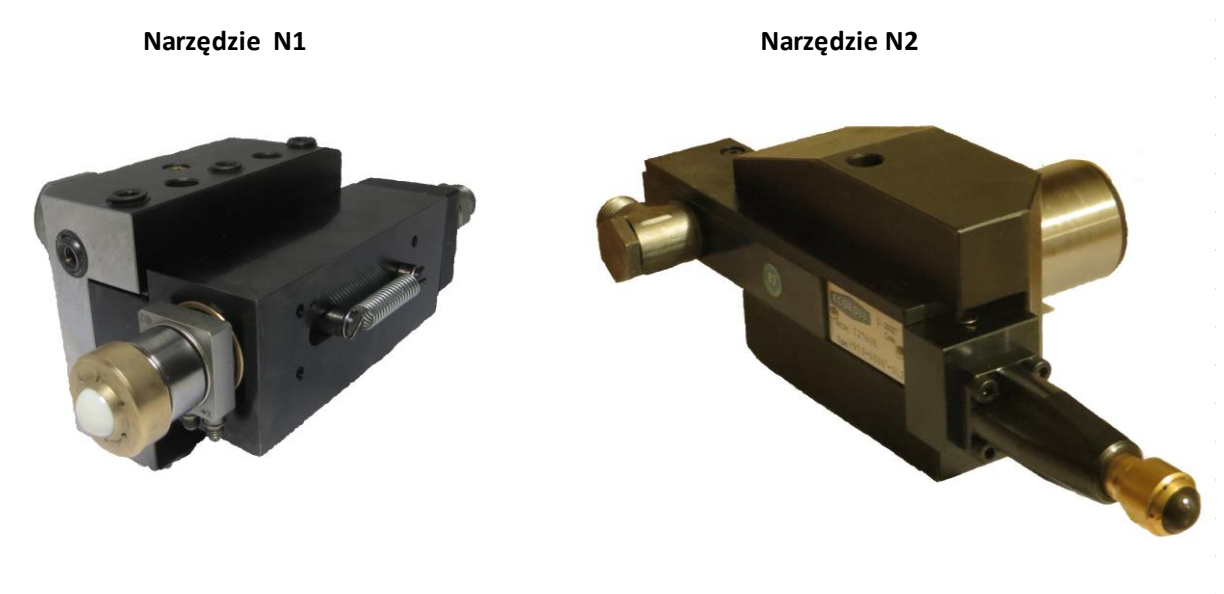
Nagniatanie jest powierzchniową obróbką stosowaną dla uzyskania małych wartości chropowatości powierzchni oraz zwiększenia efektywności realizacji procesu obróbkowego. Zastosowanie nagniatania zwiększa efektywność całego procesu obróbkowego dzięki możliwości koncentracji obróbki na jednym stanowisku poprzez bezpośrednią realizację tego procesu po obróbce toczeniem na jednej maszynie.

Rozwój narzędzi z polikrystalicznego regularnego azotku boru (CBN) umożliwia w coraz większym zakresie zastępowanie obróbek ściernych materiałów w stanie utwardzonym toczeniem na twardo [1, 2, 9]. Pozwala na koncentrację procesu toczenia i nagniatania na jednym stanowisku. Nie mniej, nagniatanie materiałów w stanie utwardzonym o twardościach dochodzących do 64 HRC wymaga doboru odpowiednich parametrów procesu. Najistotniejszymi parametrami, które należy wziąć pod uwagę to siła normalna, posuw nagniatania i chropowatość uzyskana po toczeniu na twardo [3, 5, 6, 7] oraz promień zaokrąglenia końcówki narzędzia [4]. Zaleca się także, aby chropowatość  $R_a$  wynosiła od 0,32-1,25  $\mu\text{m}$  [4]. Należy również zwrócić uwagę, aby przy ustalaniu posuwu toczenia jego wartość była inna niż wartość posuwu ustalonego dla procesu nagniatania, ponieważ nie będzie możliwe spłaszczenie wierzchołków nierówności powierzchni [5]. Jak można zaobserwować na podstawie wartości wskaźnika zmniejszenia chropowatości, maksymalną redukcję parametru chropowatości powierzchni  $R_a$  uzyskuje się przy mniejszej wartości posuwu i prędkości nagniatania [8]. Wartości wskaźnika zmniejszenia chropowatości w przypadku obróbki

materiałów twardych przyjmują wartość maksymalnie 2,5, a zatem konieczne jest uzyskiwanie niskich wartości parametru chropowatości po toczeniu.

## 2. REALIZACJA BADAŃ

Badania zrealizowano na tokarce CNC Razmer 2M-5-21/11. Proces nagniatania wykonywano dwoma narzędziami (rys. 1), w których elementami nagniatającymi były kulki o średnicy  $\frac{1}{2}$ ". W przypadku narzędzia N1 zastosowano kulkę łożyskową z azotku krzemu  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , a narzędzie N2 wyposażone było w kulkę firmy Ecoroll. Docisk kulek łożyskowych hydrostatycznie realizowany był za pośrednictwem poduszki olejowej regulowanej ciśnieniem z pompy hydraulicznej. Jako medium wykorzystywano emulsję wody i oleju Hysol R (o zawartości 8%). Badania realizowano dla ustalonego ciśnienia równego 400 barów.



Rys. 1. Narzędzia zastosowane w badaniach z oprawkami VDI B6 – 40x25x44: N1 - z wymiennymi kulkami i N2 - Ecoroll HG13

Nagniataniu poddano wałki o średnicy 50 mm wykonane ze stali Cf 53, której twardość po zahartowaniu wynosiła  $62 \text{ HRC} \pm 1 \text{ HRC}$ . Obróbką poprzedzającą nagniatanie było toczenie przeprowadzone na wspomnianej powyżej tokarce. Do toczenia wykorzystano płytkę WNGA080408S01030A z ostrzem z CBN (7015 wg Sandvik) i promieniu naroża  $r_c = 0,8 \text{ mm}$ . Obróbkę przeprowadzono dla ustalonej prędkości skrawania  $v_c = 154 \text{ m/min}$ , głębokości skrawania  $a_p = 0,2 \text{ mm}$  oraz posuwach  $f = 0,1 \text{ mm/obr}$  i  $0,18 \text{ mm/obr}$ . Wartości średnie parametrów chropowatości uzyskane w wyniku toczenia zamieszczono w tab. 1. W dalszej części przyjęto oznaczenia stanów powierzchni przed nagniataniem jako: S1 i S2 dla powierzchni wałków, które poddano nagniataniu narzędziem N1 oraz: S3 i S4 dla powierzchni wałków poddanych nagniataniu narzędziem N2. Przykłady profili chropowatości po toczeniu zawiera rys. 2.

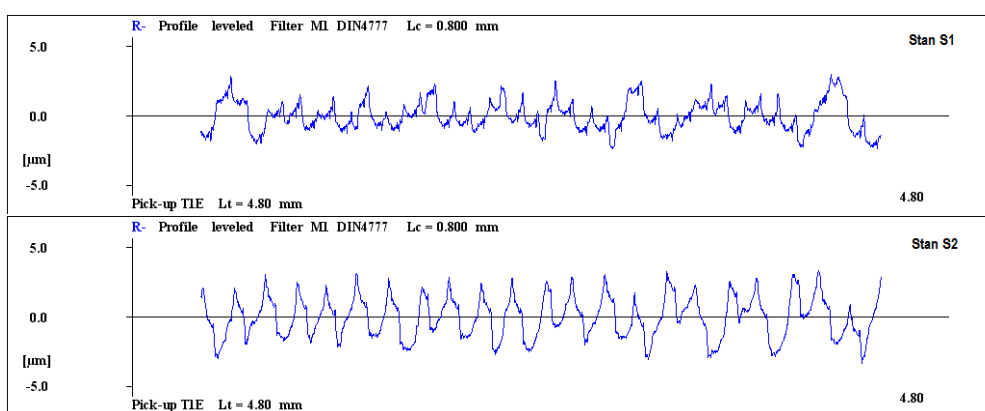
Proces nagniatania realizowano dla dwóch wartości posuwu nagniatania  $f_n$  i dwóch prędkości nagniatania  $v_n$ . Plan eksperymentu, który zrealizowano indywidualnie dla narzędzi N1 i N2 zawiera tab. 2. Przy realizacji planu dla każdego układu przyjęto po pięć powtórzeń. Przy analizie wpływu badanych czynników posłużono się testem  $t$  dla przyjętego poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ .

Tabela 1. Wartości średnie parametrów chropowatości powierzchni przed nagniataniem: a) stan S1 i S2 dla narzędzia N1, b) stan S3 i S4 dla narzędzia N2

a)	<i>Stan</i>	<i>Ra</i>	<i>Rz</i>	<i>Rp</i>	<i>Rv</i>	<i>RSm</i>
	[μm]					
	S1	0.957	4.995	3.163	1.846	106.20
	S2	1.194	5.959	3.456	2.381	174.80

b)	<i>Stan</i>	<i>Ra</i>	<i>Rz</i>	<i>Rp</i>	<i>Rv</i>	<i>RSm</i>
	[μm]					
	S3	1.157	6.050	3.973	1.870	159.17
	S4	1.350	6.688	4.030	2.648	174.55



Rys. 2. Przykładowe profile chropowatości powierzchni po toczeniu do nagniatania narzędziem N1 (S1 -  $Ra = 0,86 \mu\text{m}$ , S2 -  $Ra = 1,20 \mu\text{m}$ )

Tabela 2. Macierz eksperymentu zrealizowanego dla narzędzi N1 i N2

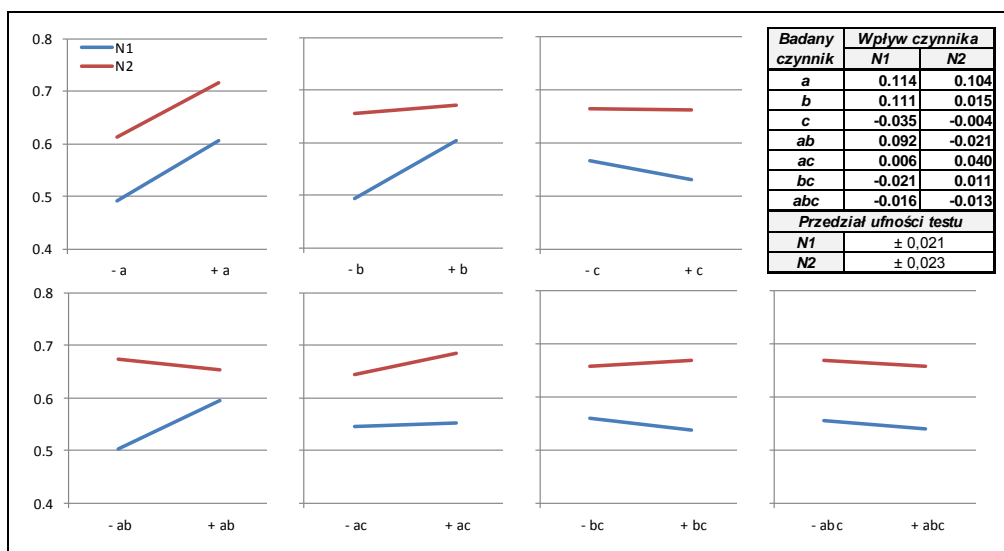
nr	zakodowane czynniki i interakcje							czynniki		
	a	b	c	ab	ac	bc	abc	a	b	c
								<i>Stan</i>	<i>fn</i> [mm/obr]	<i>vn</i> [m/min]
1	-	-	-	+	+	+	-	S1 (S3)	0.06	76
2	+	-	-	-	-	+	+	S2 (S4)	0.06	76
3	-	+	-	-	+	-	+	S1 (S3)	0.20	76
4	+	+	-	+	+	+	+	S2 (S4)	0.20	76
5	-	-	+	+	-	-	+	S1 (S3)	0.06	140
6	+	-	+	-	+	-	-	S2 (S4)	0.06	140
7	-	+	+	-	-	+	-	S1 (S3)	0.20	140
8	+	+	+	+	+	+	+	S2 (S4)	0.20	140

### 3. WYNIKI BADAŃ

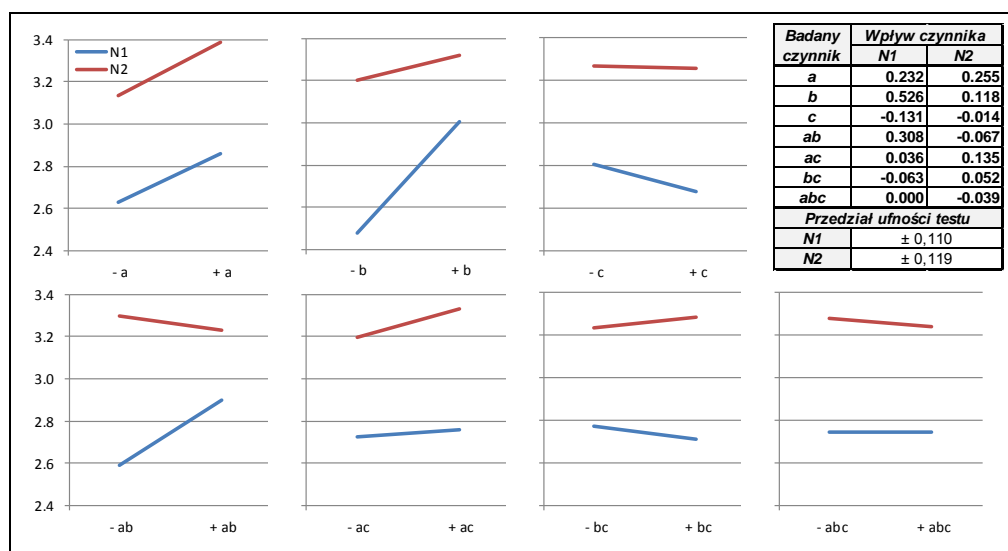
Analizę wpływu rozpatrywanych czynników i interakcje oddziaływań pomiędzy czynnikami przedstawiono na rysunkach 3÷6. Zawierają one graficzną prezentację wpływów

danego czynnika wejściowego na uzyskane efekty oraz wartości liczbowe w odniesieniu do przedziału ufności testu  $t$ .

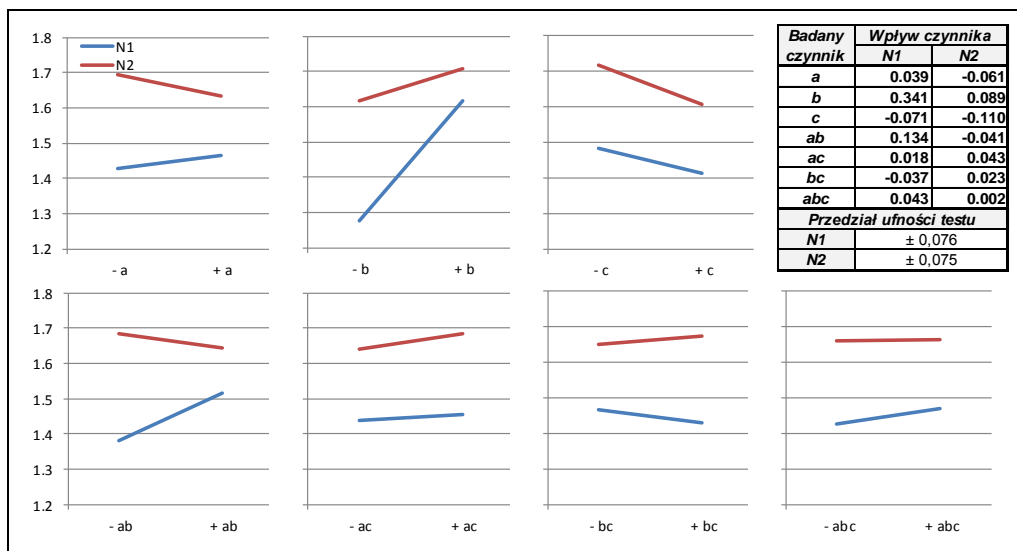
Wyniki potwierdziły, że istotny wpływ na wynik procesu nagniatania ma stan powierzchni po poprzedzającej obróbce. Potwierdziła to analiza istotności wpływu czynnika na parametry chropowatości  $Ra$ ,  $Rz$  i  $Rv$  po nagniataniu narzędziami N1 i N2. Podobny wpływ na uzyskane wartości parametrów chropowatości ma posuw nagniatania, który z użyciem narzędzia N1 istotnie wpłynął na zmianę wartości wszystkich analizowanych parametrów chropowatości. Podobnie istotnie wpływa skojarzenie tych parametrów wejściowych dla uzyskanych wartości parametrów  $Ra$ ,  $Rz$  i  $Rp$ , ale istotne wartości zarejestrowano tylko dla narzędzia N1. Różnice dla obu narzędzi (np. nieistotny wpływ skojarzenia posuwu nagniatania ze stanem powierzchni przed nagniataniem) mogą wynikać z przyjętych warunków początkowych (tab. 1) lub zakłóceń (np. drgań) związanych z przeprowadzeniem nagniatania narzędziem N2.



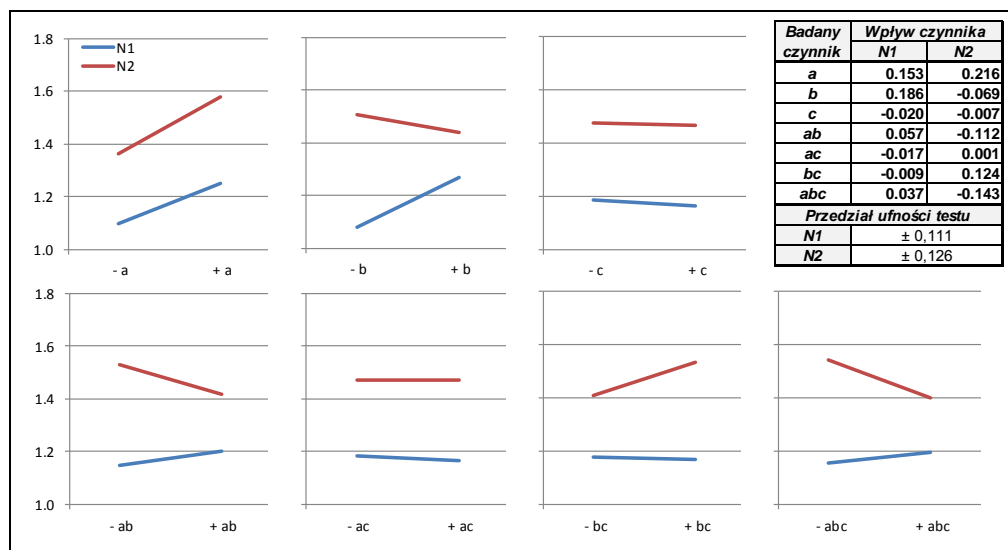
Rys. 3. Oddziaływania badanych czynników i interakcji dla analizowanego parametru chropowatości  $Ra$  po nagniataniu narzędziami N1 i N2



Rys. 4. Oddziaływania badanych czynników i interakcji dla analizowanego parametru chropowatości  $Rz$  po nagniataniu narzędziami N1 i N2

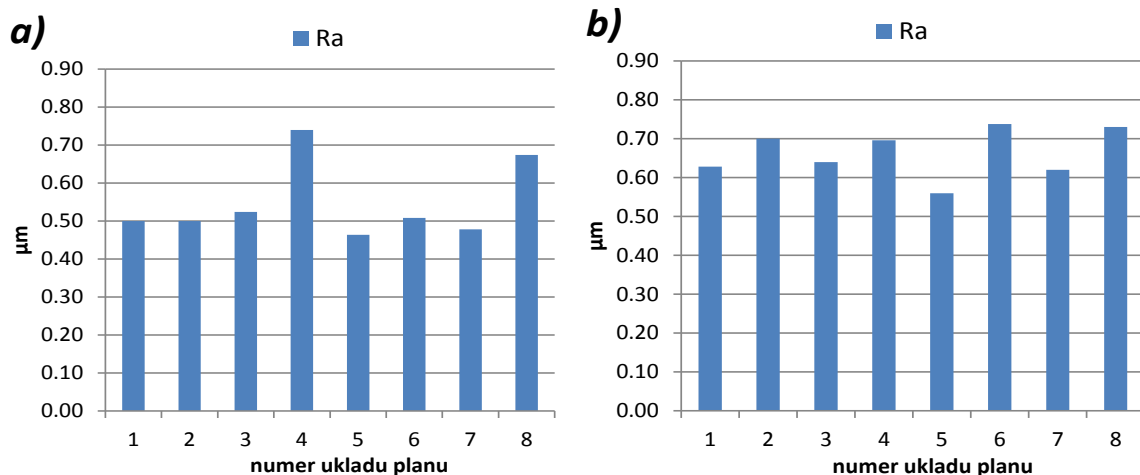


Rys. 5. Oddziaływania badanych czynników i interakcji dla analizowanego parametru chropowatości  $R_p$  po nagniataniu narzędziami N1 i N2

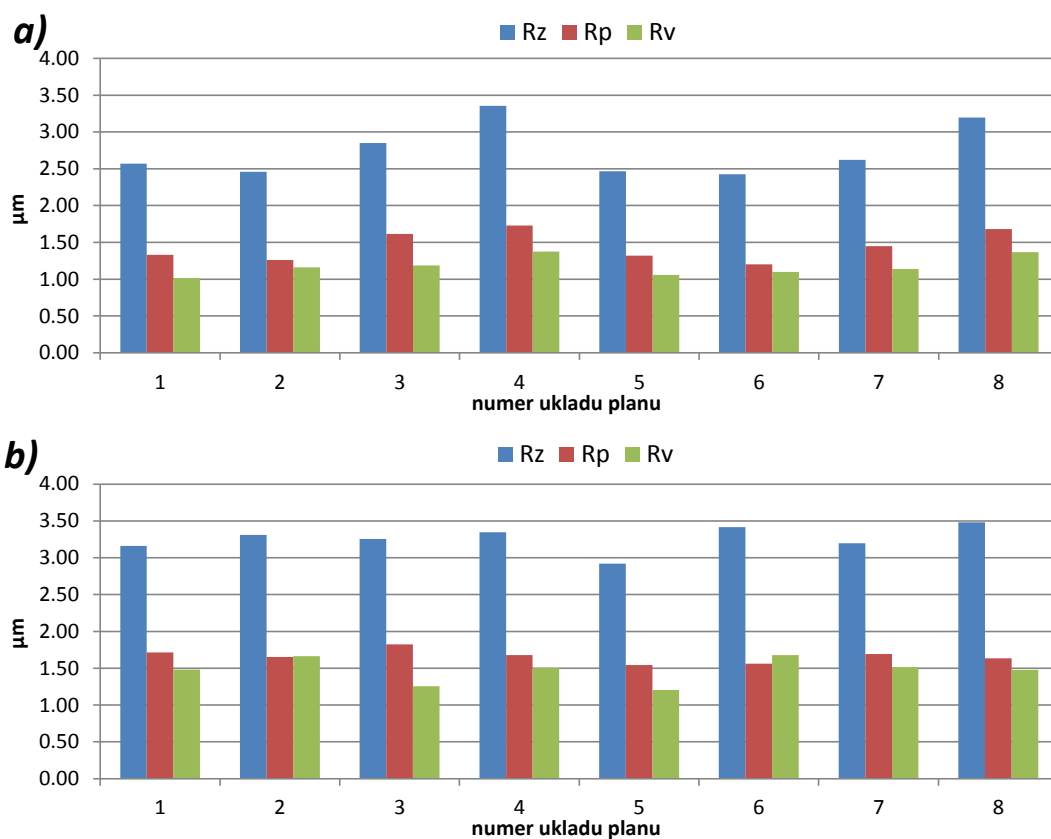


Rys. 6. Oddziaływania badanych czynników i interakcji dla analizowanego parametru chropowatości  $R_v$  po nagniataniu narzędziami N1 i N2

Zestawienie wartości średnich parametrów chropowatości  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_p$  i  $R_v$  uzyskanych dla poszczególnych układów planu badań po nagniataniu narzędziami N1 i N2 przedstawiono na rysunkach 7 i 8. Analizując wartości parametru chropowatości  $R_a$ , można zauważyć, że najmniejsze wartości uzyskano nagniatając narzędziem N1. Związane jest to z przyjętymi warunkami początkowymi (patrz tab. 1), dla których wartości średnie parametrów chropowatości powierzchni po toczeniu przyjęte dla narzędzia N1 były niższe niż przyjęte dla narzędzia N2. Jednocześnie zaobserwowano, że największe wartości tego parametru uzyskano przy nagniataniu z wartością posuwu nagniatania  $f_n = 0,2$  mm/obr dla powierzchni po toczeniu z posuwem  $f = 0,18$  mm/obr (układ 4 i 8 planu badań). Nagniatanie z wartością posuwu nagniatania  $f_n = 0,06$  i  $0,2$  mm/obr powierzchni uzyskanych po toczeniu z posuwem  $f = 0,1$  mm/obr dało podobne rezultaty niezależnie od zastosowanych prędkości nagniatania.



Rys. 7. Uzyskane średnie wartości parametru chropowatości  $Ra$  po nagniataniu narzędziami: a) N1 i b) N2

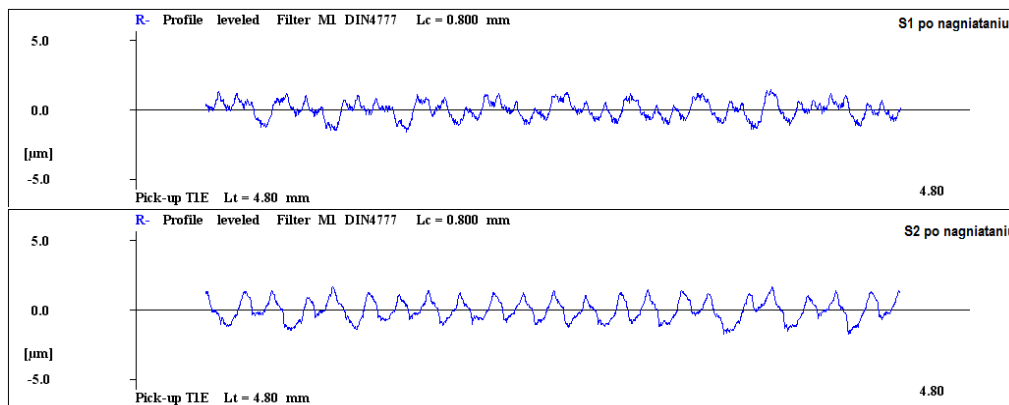


Rys. 8. Uzyskane średnie wartości parametrów chropowatości  $Rz$ ,  $Rp$  i  $Rv$  po nagniataniu narzędziami: a) N1 i b) N2

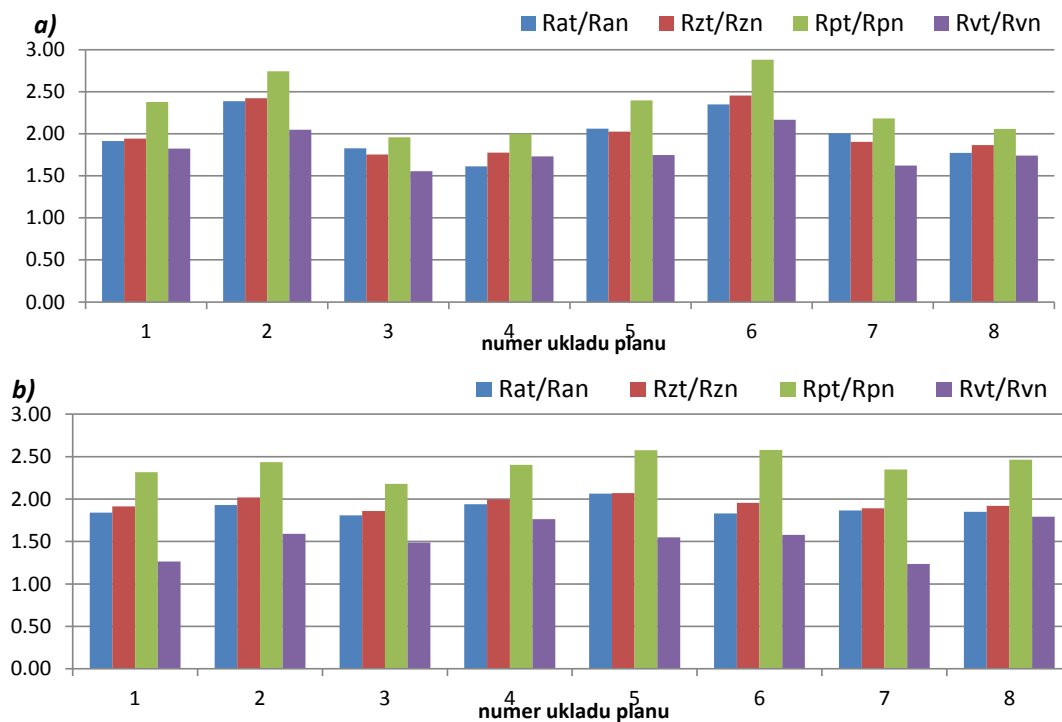
Inaczej przebiegał proces nagniatania narzędziem N2. Dla narzędzia N2 najkorzystniejsze wartości zaobserwowano dla powierzchni, które uzyskano po toczeniu z posuwem  $f = 0,1$  mm/obr (układ 1, 3, 5 i 7 planu badań). Wartości pozostałych parametrów chropowatości miały taki sam przebieg jak w przypadku analizowanej średniej wartości chropowatości powierzchni  $Ra$  (rysunek 8). Przykładowe profile chropowatości powierzchni



uzyskane po nagniataniu powierzchni określonych stanami S1 i S2 przed nagniataniem zamieszczono na rysunku 9.



Rys. 9. Przykładowe profile chropowatości powierzchni po nagniataniu narzędziem N1 (S1 po nagniataniu -  $R_a = 0,50 \mu\text{m}$ , S2 po nagniataniu -  $R_a = 0,65 \mu\text{m}$ )



Rys. 10. Stosunek wartości parametrów chropowatości  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_p$  i  $R_v$  przed ( $R$  z indeksem  $t$ ) do wartości po nagniataniu narzędziami ( $R$  z indeksem  $n$ ): a) N1 i b) N2

Stosunek wartości parametrów chropowatości powierzchni przed do wartości po nagniataniu zawiera rysunek 10. Dla analizowanych parametrów, największe zmiany zaobserwowano dla parametru  $R_p$  (wysokości najwyższych wzniesień), natomiast najmniejszą wartością redukcji zaobserwowano dla parametru  $R_v$  (głębokości najniższych wgłębień). Wartości redukcji zawierały się w przedziale od  $1,9 \div 2,88$  dla parametru  $R_p$  i  $1,55 \div 2,17$  dla parametru  $R_v$  po nagniataniu narzędziem N1. Zastosowanie niższej wartości posuwu nagniatania (1,2,5 i 6 układ planu badań) wpłynęło na większą redukcję wartości chropowatości, co potwierdzają dane przytaczane przez autora publikacji [8]. Największe

zmiany wartości tych parametrów chropowatości zaobserwowano po nagniataniu z posuwem  $f_n = 0,06$  mm/obr powierzchni uzyskanych po toczeniu z posuwem  $f = 0,18$  mm/obr, które to powierzchnie miały wstępnie większą chropowatość. Mniejsze wartości redukcji uzyskano po nagniataniu narzędziem N2 (odpowiednio:  $2,18 \div 2,58$  dla parametru chropowatości  $R_p$  i  $1,26 \div 1,79$  dla parametru chropowatości  $R_v$ ). Wartości zmiany parametru chropowatości  $R_a$  zawierały się w przedziałach  $1,6 \div 2,39$  po nagniataniu narzędziem N1 oraz  $1,8 \div 2,07$  po nagniataniu narzędziem N2 i nie przekroczyły wartości 2,5 podawanej w literaturze jako wartość graniczna wskaźnika zmniejszenia chropowatości.

#### 4. WNIOSKI

Analiza wyników badań potwierdziła istotny wpływ stanu warstwy wierzchniej (przed obróbką) i posuwu nagniatania na efekty końcowe procesu nagniatania. Najmniejsze wartości parametrów chropowatości dla obu narzędzi uzyskano w 5 układzie planu badań, gdzie wartości parametrów chropowatości powierzchni przed nagniataniem i wartości posuwu nagniatania były najmniejsze. Uzyskano odpowiednio w przypadku narzędzia N1 wartość parametru chropowatości  $R_a = 0,46$   $\mu\text{m}$  i narzędzia N2 –  $R_a = 0,56$   $\mu\text{m}$ . Analizując układ 7 planu badań, można zauważyć, że trzykrotne zwiększenie posuwu nagniatania dla obu narzędzi miało mniejszy wpływ na efekt nagniatania aniżeli stan warstwy wierzchniej przed nagniataniem. Może to stanowić wskazówkę w przypadku doboru parametrów wejściowych w celu skrócenia czasów obróbkowych. Ważnym aspektem do oceny tej sytuacji może być szczegółowa analiza struktury powierzchni po procesie poprzedzającym nagniatanie tj. po procesie toczenia. Ocena stosunku wartości parametrów chropowatości przed do wartości po nagniataniu wskazuje, że w przypadku narzędzia N1 najkorzystniejsze wartości uzyskano dla 2 i 6 układu planu (nagniatanie z mniejszą wartością posuwu i wstępnie większą chropowatością), a dla narzędzia N2 najkorzystniejsze wartości uzyskano dla 5 układu planu (również przy mniejszej wartości posuwu nagniatania).

#### LITERATURA

- [1] Dobrzyński M., Przybylski W., Waszczur P.: Ocena parametrów chropowatości powierzchni toczonych otworów w kołach zębatych obrabianych nagniataniem, *Tribologia* 6/2011.
- [2] Grzesik W., Żak K.: Modification of surface finish produced by hard turning using superfinishing and burnishing operations, *Journal of Materials Processing Technology*, 212, 2012, 315-322.
- [3] Grzesik W., Żak K.: Producing high quality hardened parts using sequential hard turning and ball burnishing operations, *Precision Engineering*, 37, 2013, 849-855.
- [4] Korzyński M., Nagniatanie ślizgowe, Warszawa, WNT, 2007.
- [5] Klocke F., Liermann J., Roller Burnishing of Hard Turned Surfaces. *Int. J. Machining Tools Manufacturing*, Vol. 38, No 5-6, 1998, 419-423.
- [6] Lin Y.C., Wang S. W., Lai H. Y.: The relationships between surface and burnishing factor in the burnishing process, *Int J Adv Manuf. Technology*, 23, 2004, 666-671.
- [7] Luca L., Neagu-Venzel S., Marinescu I., Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels. *Precision Engineering*, 29, 2005, 253-256.
- [8] Przybylski W., Nagniatanie stali o różnej twardości narzędziami ceramicznymi, *Zeszyty Naukowe Pol. Koszalińskiej*, Nr 34, 2004, 251-258.
- [9] Przybylski W., Waszczur P., Dobrzyński M.: Analiza doboru parametrów obróbkowych w toczeniu na twardo w kontekście nagniatania gładkościowego. *Materiały V Szkoły Obróbki Skrawaniem*. Opole, 2011, 327-334.



## **COMPARISON OF SURFACE CHARACTERISTICS AFTER BURNISHING WITH THE USE OF SELECTED HYDROSTATIC PRESSURE TOOLS**

### **SUMMARY**

*The paper presents the results of experimental research on the assessment of the influence of burnishing process input parameters and surface structure on surface characteristic after burnishing with hydrostatic pressure tool. The study is focused on machining of hardened steel. The influence of feed rate and burnishing speed and initial values of surface roughness have been analyzed. During studies two ball-burnishing tools have been utilized. The impact of the above factors and their interaction are evaluated. Furthermore results obtained for the respective experimental plan of executed test are included.*

**Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki.**