

**Michał DOBRZYŃSKI\***, **Włodzimierz PRZYBYLSKI\***,  
**Piotr WASZCZUR\***

## **OCENA PARAMETRÓW CHROPOWATOŚCI POWIERZCHNI TOCZONYCH OTWORÓW W KOŁACH ZĘBATYCH OBRABIANYCH NAGNIATANIEM**

### **EVALUATION OF SURFACE ROUGHNESS PARAMETERS OF TURNED GEAR WHEELS HOLES MACHINED BY BALL BURNISHING**

#### **Słowa kluczowe:**

toczenie na twardo, nagniatanie, parametry chropowatości powierzchni

#### **Key words:**

hard part turning, burnishing, surface roughness parameters

#### **Streszczenie**

W artykule zaprezentowano wyniki z badań eksperymentalnych dotyczących przygotowania powierzchni do obróbki wykończeniowej nagniataniem. Badania dotyczyły obróbki materiałów w stanie utwardzonym po

---

\* Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk.

hartowaniu. Analizowano wpływ parametrów toczenia na twardość na uzyskiwane wartości parametrów chropowatości powierzchni jako wejściowych przed procesem nagniatania.

## WPROWADZENIE

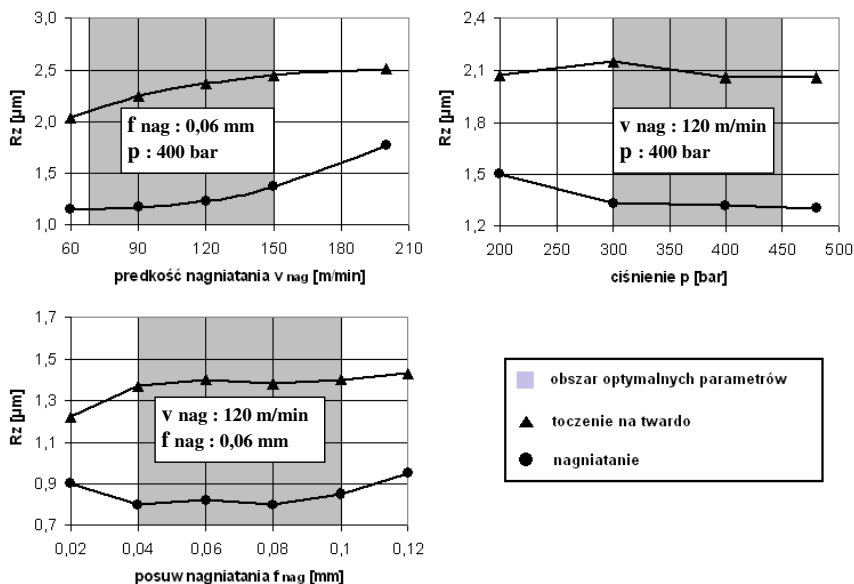
Wymagania dotyczące obróbki materiałów twardych czy też materiałów w stanie utwardzonym spowodowały konieczność poszukiwania nowych lub dostosowywania istniejących technologii. Obróbka wykończeniowa toczeniem materiałów twardych jest obecnie alternatywą dla obróbki ścierniej. Wynika to głównie z rozwoju takich materiałów narzędziowych, jak PcBN oraz zastosowania nowych różnorodnych powłok ochronnych zmniejszających ich zużycie. Geometria ostrzy tych płytek skrawających charakteryzuje się występowaniem ścinu na powierzchni natarcia. Zastosowanie ścinu zmniejsza prawdopodobieństwo wykruszenia krawędzi skrawającej oraz redukuje zużycie na powierzchni przyłożenia [L. 1, 2, 3, 4, 9].

Dotychczasowe badania wykazały, że obróbka wykończeniowa toczeniem ma również pewne ograniczenia odnośnie do uzyskiwania małych wartości parametrów chropowatości powierzchni oraz korzystnego stanu naprężeń w warstwie wierzchniej. Ze względu na mały przekrój warstwy skrawanej przy małym posuwie i głębokości skrawania występują odkształcenia plastyczne wzdłuż promienia naroża, powodując pogorszenie wartości parametrów chropowatości powierzchni obrabianej. Z drugiej strony zwiększające się zużycie na powierzchni przyłożenia powoduje powstawanie w przedmiocie obrabianym tzw. „white layer” [L. 1, 9]. Obróbka wykończeniowa toczeniem ograniczana jest również kosztem nowych narzędzi oraz relatywnie krótkim okresem trwałości ostrza. Wszystkie wymienione czynniki wpływają na konieczność takiego doboru parametrów obróbkowych, aby uczynić tę obróbkę ekonomicznie uzasadnioną. Wówczas można ją zalecać na przykład jako poprzedzającą operację nagniatania.

Nagniatanie jest jedną z możliwości uzyskania małych wartości chropowatości powierzchni oraz zwiększenie efektywności realizacji procesu obróbkowego. Nagniatanie przeprowadzać można bezpośrednio po obróbce toczeniem na twardo. Najistotniejszymi parametrami, które należy wziąć pod uwagę są siła normalna, posuw nagniatania i chropowatość uzyskana po toczeniu na twardo. Najczęściej przeprowadzane jest nagniatanie toczone, gdzie elementem nagniatającym jest kulka ceramiczna. W swoich ba-



daniach Klocke wykorzystywał kulkę o średnicy 6 mm, a siła nagniatania wytwarzana była przez wysokociśnieniową pompą (maks. 500 bar). Na **Rys. 1** przedstawiono wpływ podstawowych parametrów nagniatania na uzyskiwaną średnią wartość parametru  $R_z$  [L. 5].



**Rys. 1.** Wpływ parametrów nagniatania kulką ceramiczną  $\varnothing 6$  mm na średnią wartość parametru chropowatości  $R_z$  dla powierzchni toczonej przedmiotów ze stali 100Cr6 o twardości 62 HRC

Fig. 1. Influence of burnishing parameters using ceramic ball of  $\varnothing 6$  mm on the average roughness parameter rate  $R_z$  for workpieces turned, made of 100Cr6 steel and the hardness of 62 HRC

Zastosowanie nagniatania zwiększa efektywność całego procesu obróbkowego dzięki koncentracji obróbki na jednym stanowisku oraz możliwości zastosowania większych posuwów przy toczeniu na twardo. Wiąże się to ze zmniejszeniem zużycia narzędzia, co bezpośrednio wpływa z jednej strony na stan warstwy wierzchniej a z drugiej zaś strony wzrasta produktywność. Należy zwrócić uwagę, że po nagniataniu widoczna jest struktura uzyskana po toczeniu (zwłaszcza narzędziami z wyraźnymi oznakami zużycia) oraz „white layer”. Zmieniła się jednak chropowatość powierzchni i korzystnie zmienia się stan naprężeń w warstwie wierzchniej. Na głębokości około 100  $\mu\text{m}$  osiągają swoje maksimum naprężenia ściskające. Po nagniataniu nie obserwuje się również zjawisk łuszczenia i pęknięcia powierzchni [L. 5, 6]. Zasadnicze znaczenie na uzyskiwaną

strukturę geometryczną powierzchni mają zarówno posuw toczenia, jak i nagniatania. Ogólną zasadą zapewniającą maksymalne zmniejszenie nierówności jest stosowanie różnych wartości posuwów toczenia i posuw nagniatania.

## WYNIKI BADAŃ

W literaturze [L. 2] odnaleźć można zależność (1) pozwalającą na obliczenie średniej chropowatości powierzchni, która w największej mierze zależy od wartości posuwu  $f$  i promienia naroża  $r_\epsilon$ .

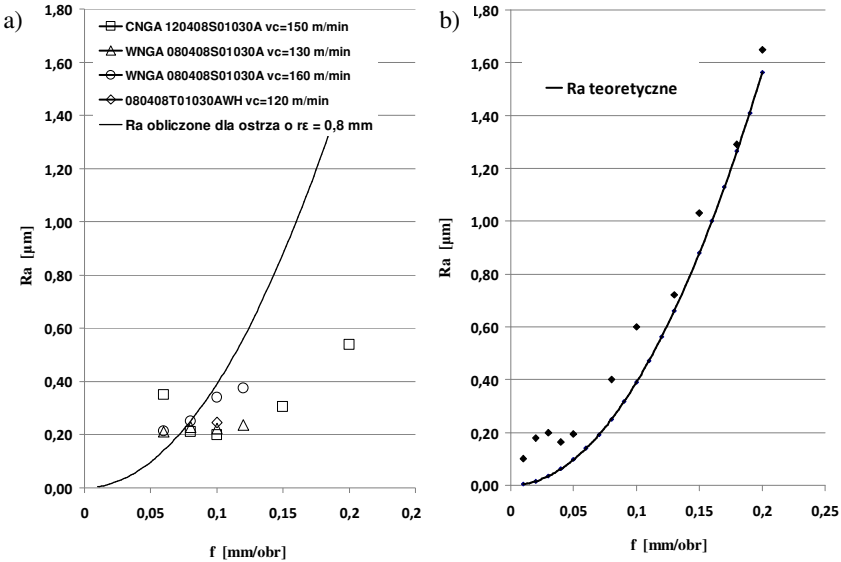
$$Ra = \frac{f^2}{32 \cdot r_\epsilon} \quad (1)$$

Wyniki z badań (**Rys. 2b**) przeprowadzonych przez Dawson'a wskazują, że wartości parametru chropowatości  $Ra$  otrzymane po obróbce odbiegają od wartości obliczonych wg powyższej zależności, choć zachowują tendencję wzrostową wraz ze wzrostem wartości posuwu. Wyniki wartości tego parametru otrzymane dla posuwów  $f$  poniżej wartości 0,05 mm składają się do wniosku o zasadność stosowania małych wartości posuwów w celu zmniejszenia chropowatości powierzchni. Zbyt mały posuw skutkuje wydłużeniem czasu obróbki, niekoniecznie wpływając na zmniejszenie chropowatości powierzchni. Taki przebieg parametru chropowatości uzyskano przy następującej głębokości skrawania  $ap = 0,203$  mm.

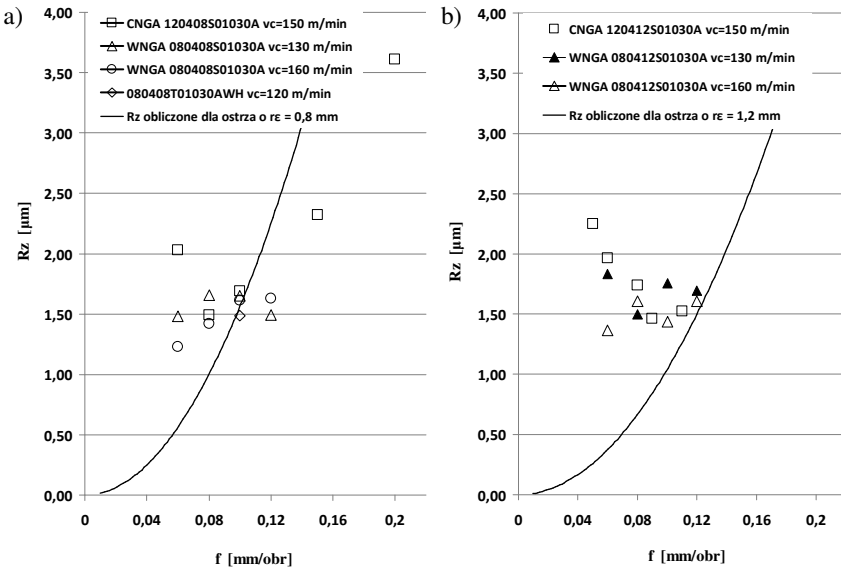
Jak ilustruje **Rys. 2a**, zmniejszenie głębokości skrawania ( $ap = 0,05$  mm) wpływa na kształtowanie parametru chropowatości  $Ra$  w zakresie niższych wartości, odbiegając od wartości obliczeniowych otrzymanych z zależności (1). Ciekawym wydaje się fakt, że w przedziale posuwów  $f = 0,05 - 0,15$  mm, niezależnie od typu zastosowanych płytek i prędkości skrawania, otrzymano wartości parametru  $Ra$  skupione w przedziale 0,2–0,4  $\mu\text{m}$ . Taką samą tendencję wskazywał parametr chropowatości  $Rz$  (**Rys. 3**), którego wartości odbiegały od obliczonych wg zależności (2). Dla użytych w procesie obróbki ostrzy o dwu wartościach promienia  $r_\epsilon$  otrzymano zbliżone wartości maksymalnej chropowatości w przedziale posuwów  $f = 0,06 - 0,12$  mm/obr.

$$R = \frac{f^2}{8 \cdot r_\epsilon} \quad (2)$$





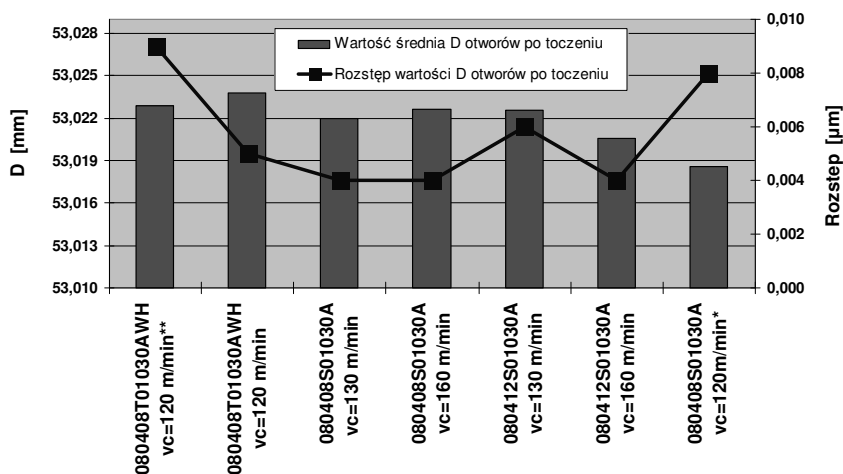
**Rys. 2. Porównanie wartości obliczeniowych parametru  $Ra$  z wynikami uzyskanymi po toczeniu płytką o promieniu naroża  $r\epsilon = 0,8$  mm, a) opracowanie własne b) wg [L. 2]**  
 Fig. 2. Comparison of the calculated  $Ra$  parameter with results obtained after turning with inserts of  $r\epsilon = 0.8$  mm nose radius, a) author's tests, b) by Dawson [L. 2]



**Rys. 3. Porównanie wartości obliczeniowych parametru  $Rz$  z wynikami uzyskanymi po toczeniu płytką o promieniu naroża  $r\epsilon = 0,8$  mm (a),  $r\epsilon = 1,2$  mm (b)**  
 Fig. 3. Comparison of the calculated  $Rz$  parameter with results obtained after turning with inserts of  $r\epsilon = 0.8$  mm nose radius (a),  $r\epsilon = 1.2$  mm nose radius (b)



Na podstawie tych wyników można przypuszczać, że w przypadku obróbki materiałów twardych z głębokością skrawania  $ap = 0,05$  mm proces skrawania ma inny przebieg niż dla większych głębokości skrawania. W analizowanym przypadku ostrze skrawało w ramach ścinu, którego długość wynosiła 0,1 mm i, jak można przypuszczać, miało to duży wpływ na kształtowanie chropowatości powierzchni. Ze względu na grubość warstwy uzyskanej w wyniku obróbki cieplno-chemicznej ważnym jest dobór małych naddatków obróbkowych. Przyjęcie takiej małej wartości  $ap$  ma znaczenie w przypadku, gdy kolejną obróbką ma być nagniatanie wygładzające. Ze względu na specyfikę tej obróbki, która w głównej mierze skutkuje redukcją nierówności powierzchni, dokładność kształtowo-wymiarową powinna zapewniać obróbka poprzedzająca, a wymiary i struktura powierzchni powinny być powtarzalne dla całej partii przedmiotów. Jak wskazują wyniki, zwiększenie głębokości skrawania skutkuje zwiększeniem rozrzutu parametrów chropowatości i falistości powierzchni oraz wymiaru średnicowego (**Rys. 4**) [L. 8].



**Rys. 4.** Średnice otworów  $D$  po toczeniu na twardo (\* $ap = 0,13$  mm, gatunek PcBN 7025, \*\* $ap = 0,07$  mm)

Fig. 4. Diameter values of holes after hard turning (\* $ap = 0.13$  mm for 7025 PcBN, \*\* $ap = 0.07$  mm)

W **Tabeli 1** zaprezentowano przykładowe wyniki uzyskane z obróbki nagniataniem wałków ze stali 45 o twardości 56 HRC po obróbce cieplej. W badaniach wykorzystywane było narzędzie nagniatające skonstruowa-



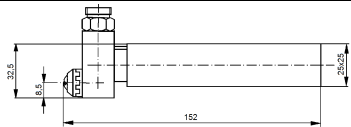
ne na Politechnice Gdańskiej (nagniatok hydrauliczny Nklh 2525 z kulką ceramiczną  $\varnothing 6$  mm). Jak można zaobserwować na podstawie wartości wskaźnika zmniejszenia chropowatości  $K_{Ra}$ , maksymalne zmniejszenie parametru chropowatości powierzchni  $Ra$  uzyskano przy mniejszej wartości posuwu i prędkości nagniatania [L. 7]. Wartości wskaźnika  $K_{Ra}$  w przypadku obróbki materiałów twardych przyjmują wartość maksymalnie 2,5, a zatem konieczne jest uzyskiwanie niskich wartości parametru chropowatości po toczeniu. Na uzyskiwane wartości parametrów chropowatości oprócz posuwu toczenia i nagniatania ma również wpływ założona prędkość nagniatania.

**Tabela 1. Wyniki z prób**

Table 1. Experimental results

Prędkość nagn. [m/min]	Posuw nagn. [mm/obr.]	$Ra$ przed nagn. [ $\mu\text{m}$ ]	$Ra$ po nagn. [ $\mu\text{m}$ ]	Wskaźnik $K_{Ra}$
60	0,04	0,33	0,18	1,83
120	0,04	0,33	0,32	1,03
60	0,2	0,33	0,36	0,91
120	0,2	0,33	0,3	1,10

Nagniatok Nklh 2525



## PODSUMOWANIE

Nagniatanie materiałów twardych zapewnia wysoką gładkość powierzchni. Stosowanie tej obróbki jako końcowego etapu wytwarzania nie umożliwia jednak uzyskania wymaganej dokładności wymiarowo-kształtowej wyrobów. Wymagania te spełnione muszą zostać przez toczenie na twardo jako obróbkę poprzedzającą nagniatanie. Również ze względu na małe wartości wskaźnika zmniejszenia chropowatości (maksymalnie około 2,5) konieczne jest uzyskiwanie niskich wartości parametrów chropowatości powierzchni już po toczeniu. Dlatego też konieczne jest stosowanie w toczeniu na twardo specjalnych materiałów narzędziowych oraz małych głębokości skrawania i małych posuwów. Stanowi to jednak znaczące utrudnienie ze względu na wysoki koszt narzędzi, relatywnie krótkie okresy trwałości oraz zmiany w strukturze warstwy wierzchniej po obróbce.

## LITERATURA

1. Chou Y.K., Evans C.J., White layers and thermal modeling of hard turned surfaces, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 39, 1999, 1863–1881.
2. Dawson G., Kurfess T.R., Tool life, wear rates, and surface quality in hard turning, *Trans. NAMRI/SME* 29 (2001), pp. 175–182.
3. Grzesik W., Influence of tool wear on surface roughness in hard turning using differently shaped ceramic tools. *Wear*, Vol. 265, 2008, 327–335.
4. Kawalec M., Skrawanie ostrzami zdefiniowanymi geometrycznie zahartowanych stali. *Rozwój, efekty i tendencje, Obróbka skrawaniem. Zaawansowana technika*. Wyd. Uczelniane UT-P, Bydgoszcz, 2009, 9–30.
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. 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.
7. Przybylski W., Nagniatanie stali o różnej twardości narzędziami ceramicznymi, *Zeszyty Naukowe Pol. Koszalińskiej*, nr 34, 2004, 251–258.
8. Przybylski W., Waszczur P., Dobrzyński M., Analiza doboru parametrów obróbkowych w toczeniu na twardo w kontekście nagniatania gładkościowego. *Obróbka skrawaniem. Nauka a Przemysł*. Opole, 2011 (w druku).
9. Tonshoff H.K., Arendt C., Ben Amor R., Cutting of Hardened Steel. *Annals of the CIRP*, Vol. 49/2, 2000, 547–566.

**Recenzent:**  
**Krzysztof MARCHELEK**

## Summary

**The paper presents the results of experimental studies of surface preparation for burnishing process. The study is concerned with machining of hard parts. The influence of hard turning parameters on obtained surface roughness rates is analysed as the input factor of burnishing process.**

