

Bogdan ŚCIBIORSKI¹

WYBRANE PROBLEMY NAGNIATANIA TOCZNEGO STALI TWARDYCH CERAMIKĄ NA TOKARCE CNC

Nagiatanie jest obróbką wykończeniową, bezubytkową, polegającą na plastycznym odkształcaniu warstwy wierzchniej przedmiotu. Proces nagiatania jest zazwyczaj stosowany do stali miękkich, aczkolwiek metodę tę wykorzystuje się również do obróbki materiałów twardych, takich jak: hartowana stal, której twardość przewyższa wartość 40 HRC. Do nagiatania tocznego stali twardych stosowane są narzędzia z łożyskowaniem hydrostatycznym i dociskiem hydraulicznym elementu nagiatającego. Jako element nagiatający stosowane są kulki z materiałów twardych, w tym z takich materiałów jak ceramika. Proces nagiatania twardych materiałów nie został dotąd w pełni rozpoznany, a występujące w nim zjawiska fizyczne charakteryzują się wysokim stopniem złożoności. Uwzględniając przy tym zróżnicowanie cech procesów nagiatania dotyczącego takich materiałów, przydatność niektórych materiałów ceramicznych w roli elementów nagiatających w tym procesie może być bardzo ograniczona. W artykule przedstawiono porównanie efektów nagiatania powierzchni stali hartowanej z zastosowaniem kulek wykonanych z różnych rodzajów ceramiki technicznej oraz zmian stanu ich powierzchni wskutek procesu nagiatania.

1. WPROWADZENIE

Rozwój nowych materiałów rozszerzył możliwości stosowania narzędzi w obróbce wykończeniowej twardych powierzchni. Równolegle nastąpił rozwój konstrukcji obrabiarek skrawających, w zakresie wzrostu dokładności wykonania części maszyn, sprzyjający koncentracji operacji kształtujących i wykończeniowych. Jedną z tych obróbek wykończeniowych na obrabiarkach skrawających jest nagiatanie. W szczególnych przypadkach nagiatanie umożliwia zastąpienie innych operacji wykończeniowych m.in. takich jak szlifowanie czy docieranie, co może zwiększyć elastyczność produkcji. Korzyści z zastąpienia innych obróbek mają też aspekt ekologiczny, gdyż nagiatanie jest obróbką bezubytkową.

Nagiatanie jest to powierzchniowa obróbka plastyczna realizowana na obrabiarkach skrawających, jako obróbka wykończeniowa, umacniająca i gładkościowa. Obróbka przez nagiatanie jest najczęściej stosowana w technologii maszyn w celu zwiększenia odporności

¹ Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, Wydział Mechaniczny, Politechnika Gdańska
E-mail: bscibior@pg.gda.pl

na obciążenia zmęczeniowe i zmniejszenie chropowatości powierzchni. Współczesne tokarki CNC pozwalają na osiągnięcie dokładności obróbki w 6 klasie dokładności, a co za tym idzie zwiększony został zakres możliwości zastosowania nagniatania jako obróbki wykończeniowej bezpośrednio po toczeniu. Wprowadzenie nagniatania powierzchni o różnych kształtach na obrabiarkach skrawających CNC wymusiło stosowanie narzędzi o punktowym kontakcie elementu nagniatającego z powierzchnią obrabianą. Dla takich narzędzi przygotowanie programów obróbkowych nagniatających na obrabiarki zasadniczo jest podobne do generowania ścieżki dla narzędzi skrawających.

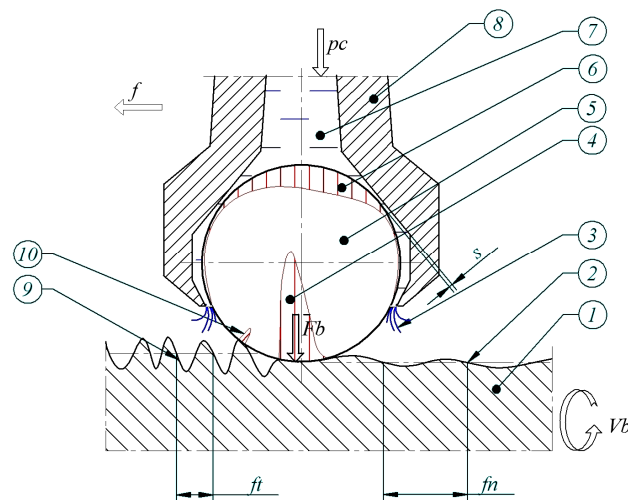
Nieodzownym problemem nagniatania jest dokładność wykonanej obróbki poprzedzającej. Zbyt duże odchyłki powstające w procesie toczenia w powiązaniu ze sztywnością układu OUPN mogą powodować miejscowe łuszczenie się powierzchni z powodu nadmiernego stopnia zgniotu. Zależności pomiędzy parametrami nagniatania a jakością powierzchni można znaleźć w pracy [9]. Aby temu zapobiec stosuje się sprężysty docisk narzędzia do powierzchni przedmiotu obrabianego, zapewniający stały stopień zgniotu niezależnie od niedokładności obróbki poprzedzającej. Generalnie przyjęła się zasada, że nagniatanie z dociskiem sprężystym nie poprawia kształtu oraz falistości a tylko zmniejsza chropowatość powierzchni. Obecnie obróbka toczeniem twardych materiałów na tokarkach CNC [1],[6],[11] umożliwia uzyskanie stosunkowo małych wartości falistości, które nie muszą być dominujące po obróbce nagniataniem [2],[3].

Początkowo obróbkę stali hartowanych realizowano z wykorzystaniem nagniataków diamentowych. Ich zastosowanie jest jednak ograniczone z uwagi na niepowtarzalność kształtu diamentów, możliwość zastosowania tylko w obróbce ślizgowej oraz konieczność stosowania małych posuwów narzędzia (małe promienie elementu nagniatającego), co wydłuża czas obróbki. W procesie nagniatania twardych materiałów istotnym problemem jest duża siła nagniatania i związane z nią tarcie, występujące pomiędzy elementem nagniatającym i materiałem obrabianym. Prace badawcze prowadzone są również nad optymalizacją tych parametrów [14]. W celu wyeliminowania niekorzystnych efektów tarcia na początku lat 90 zastosowano w narzędziach łożyskowanie hydrostatyczne [8]. W rozwiązaniu tym regulując ciśnienie oleju można precyzyjnie określić siłę docisku kulki. Olej pełni również rolę środka smarującego, jakkolwiek w procesie nagniatania stosuje się inne substancje [10]. Dzięki łożyskowaniu hydrostatycznemu oraz zastosowaniu kulek ceramicznych zwiększyły się możliwości obróbki nagniataniem. Najbardziej znanym producentem narzędzi do nagniatania tocznego z łożyskowaniem hydrostatycznym jest firma Ecoroll [4]. Należy również wspomnieć o rozwiązaniach z łożyskowaniem hydrostatycznym takich jak Politechniki Gdańskiej [13] oraz Politechniki Szczecińskiej [5],[12]. Zastosowanie elementów ceramicznych wraz z łożyskowaniem hydrostatycznym umożliwiło zastosowanie nagniatania tocznego. Obecnie narzędzia do nagniatania firmy Ecoroll dedykowane są dla materiałów o twardości do ok. 65HRC [4].

2. NAGNIATANIE MATERIAŁÓW TWARDYCH

W ostatnich latach w coraz szerszym zakresie stosuje się materiały ceramiczne do obróbki skrawaniem. Do tej grupy zalicza się między innymi tlenek glinu Al_2O_3 , azotek

krzemu Si_3N_4 , tlenek cyrkonu ZrO_2 . Stosowane są one ze względu na wysoką wytrzymałość na ściskanie, wysoki moduł Younga, wysoką twardość i w związku z tym dużą odporność na ścieranie. Na przykład wytrzymałość na ściskanie R_c może wynieść: (w temp. 25°C) 10 GPa dla Al_2O_3 , 3,5 GPa dla Si_3N_4 oraz 1,89 GPa dla ZrO_2 , oraz odpowiednio twardości: 80 HRC, 75-80 HRC, 70 HRC. Właściwości fizyczne tych materiałów ceramicznych umożliwiają ich stosowanie w procesie nagniatania przedmiotów stalowych hartowanych (materiałów twardych > 40 HRC).



Rys. 1. Schemat nagniatania z dociskiem hydrostatycznym (p_c - ciśnienie oleju, f - posuw narzędzia nagniatającego, F_b - siła wypadkowa nagniatania, s - szczelina łożyska hydrostatycznego, v_b - prędkość nagniatania, f_t - odstępy pomiędzy nierównościami po toczeniu, f_n - odstępy pomiędzy nierównościami po nagniataniu): 1 - element nagniatany, 2 - powierzchnia po nagniataniu, 3 - wypływ oleju z łożyska hydrostatycznego, 4 - pole nacisków powstające w wyniku nacisku na przedmiot, 5 - kulka, 6 - naciski na kulkę spowodowane ciśnieniem oleju w łożysku, 7 - olej łożyska hydrostatycznego, 8 - oprawka, 9 - powierzchnia po toczeniu, 10 - naciski początkowe na wierzchołkach nierówności

Fig. 1. Schematic of burnishing with the hydrostatic pressure (p_c - an inlet oil pressure, f - feed of the burnishing tool, F_b - the resultant burnishing force, s - the clearance of hydrostatic bearing, v_b - the burnishing speed, f_t - the spacing of irregularities after turning, f_n - the spacing of irregularities after burnishing): 1 - the work part burnished, 2 - the surface after burnishing, 3 - oil flow out of the hydrostatic bearing, 4 - the pressure field generated as a result of part surface deformation during burnishing, 5 - the burnishing ball, 6 - the pressure area of oil against the ball in the hydrostatic bearing, 7 - an oil in the hydraulic bearing, 8 - a ball holder, 9 - the surface after turning, 10 - the initial thrust on the tips of irregularities

Proces nagniatania materiałów miękkich ($< 40\text{HRC}$) charakteryzuje się tym, że wraz ze zwiększeniem docisku w wyniku posuwu narzędzia oddziaływanie elementu nagniatającego powoduje odkształcenia plastyczne nie tylko wypełniające nierówności, co również przemieszczające nadmiar materiału nagniatanego [16]. W przypadku materiałów twardych (> 40 HRC) przemieszczenie materiału nagniatanego jest ograniczone. W procesie nagniatania materiałów twardych największe obciążenia przenoszone są przez wierzchołki nierówności powierzchni obrabianej. Zatem przebieg procesu nagniatania twardych stali następuje przede wszystkim w wyniku wywierania dużych nacisków powierzchniowych na wierzchołki nierówności. W wyniku przenoszenia największego obciążenia przez wierzchołki następuje poślizg materiału na ich zboczach wypełniając zagłębienia [15].

Zmniejszenie chropowatości jest także skutkiem łamania ostrych wierzchołków mikronierówności po poprzednim toczeniu. W tym miejscu należy nadmienić, że obciążenia przenosi również materiał elementu nagniatającego. Wpływ powstających naprężeń, jak i proces tarcia może mieć odzwierciedlenie na powierzchni kulki nagniatającej. W efekcie ślady zużycia kulki kopiują się na powierzchni nagniatanej.

Wprowadzenie łożyskowania hydrostatycznego podczas nagniatania oraz kulek ceramicznych o promieniach większych niż dotychczas, w stosowanych elementach diamentowych do nagniatania ślizgowego, umożliwiło zwiększenie wydajności procesu nagniatania. W systemach narzędzi z dociskiem hydrostatycznym zmiana siły nagniatania następuje poprzez odpowiednie ustawienie ciśnienia na agregacie hydraulicznym.

W wyniku łożyskowania hydrostatycznego podczas obróbki przedmiotu, pomiędzy kulką a jej oprawką utrzymana jest cienka warstwa filmu olejowego (s), co przedstawiono na uproszczonym schemacie nagniatania z dociskiem hydrostatycznym - rys. 1. W wyniku nagniatania powstają w kulce ceramicznej naprężenia. Przedstawiony rozkład naprężeń (6) na rys. 1 wynika z równoważenia, działającą siłą nacisku, ciśnienia podawanego oleju hydraulicznego. Natomiast naprężenia działające wypadkowo w przeciwnym kierunku, istotne ze względu na zużycie kulki, w powstają w miejscu kontaktu kulki z materiałem obrabianym (4) i (10) rys. 1. W strefie kontaktu wzrost siły wypadkowej na poszczególnych wierzchołkach nierówności może przyczynić się do przekroczenia lokalnych naprężeń krytycznych, uszkadzających powierzchnię kulki ceramicznej. Spodziewanym efektem powinny być przytarcia, wykruszenia oraz spękania powierzchni ceramicznej. Warto również zwrócić uwagę, że warstwa niezbędnego filmu olejowego (s) - rys. 1, związana jest ona z luzem pomiędzy kulką (5) i oprawką (8). Pomimo utrzymywania filmu olejowego można spodziewać się efektów przemieszczania się kulki w zakresie luzu, w wyniku dynamicznego oddziaływania elementu nagniatającego i obrabianego materiału. Szczególnie takie przypadki mogą być związane z dynamicznym wejściem kulki w stal i gwałtownej zmiany twardości warstwy wierzchniej.

3. BADANIA WŁASNE

Eksperyment nagniatania przeprowadzono na wałkach z zahartowanej stali 41Cr4 i 35HGS o twardości ok. 50HRC. Obróbkę toczeniem i nagniatanie przeprowadzono na tokarce CNC Razmer 2M-5-21/11. Do obróbki nagniataniem wykorzystano system narzędziowy firmy Ecoroll HG13. Na system Ecoroll HG13 składa się przede wszystkim hydrauliczny agregat wytwarzający ciśnienie do maks. 400 bar oraz narzędzie z hydraulicznym tłoczkiem i końcówką nagniatającą z kulką łożyskową hydrostatycznie. W badaniach zastosowano kulki o średnicy ½" z następujących ceramik: azotek krzemu Si_3N_4 , węgiel wolframu WC, tlenek cyrkonu ZrO_2 i tlenk glinu Al_2O_3 . Ponadto zastosowano końcówkę HG13 z kulką firmy Ecoroll. Ww. kulki łożyskowe ceramiczne Si_3N_4 , WC, ZrO_2 , Al_2O_3 montowane były w specjalnie zaprojektowanej oprawce przedstawionej na rys. 2. Docisk kulek łożyskowych hydrostatycznie realizowany był za pośrednictwem poduszki olejowej regulowanej ciśnieniem z pompy hydraulicznej. Zakres stosowanych ciśnień był w zakresie od 200÷400 bar, co odpowiada zakresowi siły nagniatania od 2000÷4000N.



Rys. 2. Oprawka kulek ceramicznych ½" z łożyskowaniem hydrostatycznym: 1 - nakrętka, 2 - gniazdo, 3 - oprawka - komplet (nakrętka, gniazdo i kulka), 4 - kulka ZrO₂, 5 - kulka Al₂O₃, 6 - kulka Si₃N₄, 7 - kulka WC
 Fig. 2. The ceramic ball holder of ½ " equipped with the hydrostatic bearing: 1 - a nut, 2 - a seating, 3 - a holder – the set of elements (a nut, a seating and a ball), 4 - a ball made of ZrO₂, 5 - a ball made of Al₂O₃, 6 - a ball made of Si₃N₄, 7 - a WC ball

Tabela 1. Uśrednione wyniki pomiarów parametrów Ra i Rz po obróbce nagniataniem stali 41Cr4
 Table 1. The average measurement results of Ra and Rz parameters after burnishing the steel 41Cr4

Rodzaj materiału kulki	Parametry obróbki p [bar]; v_b [m/min]; f [mm/obr]	Uśrednione wartości zmierzonych i obliczonych parametrów			
		Ra [μm]	σRa śr. odch. stand.	Rz [μm]	σRz śr. odch. stand.
ZrO ₂	200;100;0,1	0,118	0,0084	0,692	0,1032
	300;100;0,1	0,136	0,0054	0,822	0,0130
	400;100;0,1	0,158	0,0294	1,004	0,1890
HG13	200;100;0,1	0,122	0,0164	0,708	0,0968
	300;100;0,1	0,152	0,0178	0,854	0,926
	400;100;0,1	0,146	0,0168	0,876	0,1104
Si ₃ N ₄	400;100;0,1	0,162	0,0084	0,938	0,0646

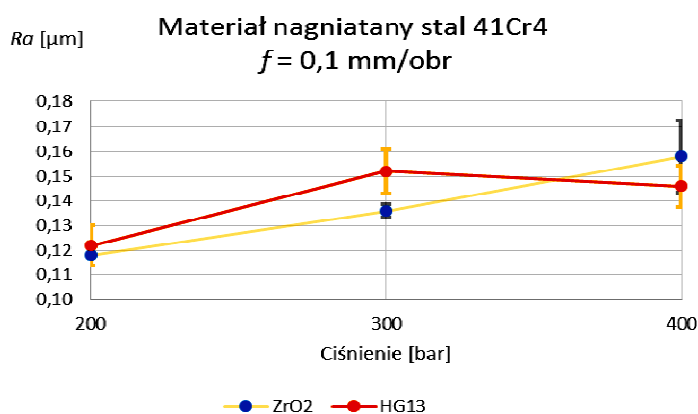
W badaniach zastosowano obróbkę poprzedzającą nagniatanie poprzez toczenie na „sucho” zgrubne oraz wykończeniowe płytką CBN firmy TaeguTec o symbolu WNGA 080408 WZ -LS3 TB650 na głębokość $a_p = 0,1\text{mm}$. Parametry skrawania wykończeniowego $v_c = 150\text{ m/min}$, $f = 0,15\text{ mm/obr}$.

Tabela 2. Uśrednione wyniki pomiarów parametrów Ra i Rz po obróbce nagniataniem stali 35HGS
 Table 2. The average measurement results of Ra and Rz parameters after burnishing the steel 35HGS

Rodzaj materiału kulki	Parametry obróbki p [bar]; v_b [m/min]; f [mm/obr]	Uśrednione wartości pomierzonych i obliczonych parametrów			
		Ra [μm]	σRa śr. odch. stand.	Rz [μm]	σRz śr. odch. stand.
Si ₃ N ₄	300;150;0,1	0,026	0,005	0,164	0,005

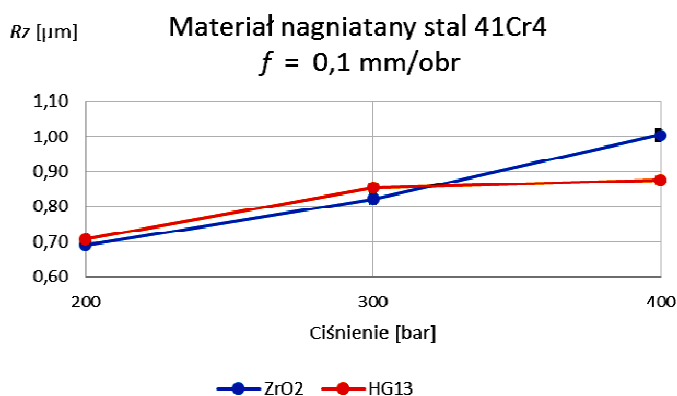
	400;150;0,05	0,020	0,000	0,118	0,004
	400;150;0,1	0,030	0,007	0,186	0,070
	400;150;0,15	0,025	0,005	0,155	0,023
WC	300;150;0,1	0,044	0,005	0,242	0,026
	400;150;0,05	0,048	0,004	0,276	0,036
	400;150;0,1	0,050	0,016	0,263	0,074
	400;150;0,15	0,058	0,004	0,304	0,036
Al ₂ O ₃	400;150;0,1	0,094	0,060	1,764	0,495

Pomiary mikrogeometrii powierzchni dokonano z wykorzystaniem profilografometru Hommel Tester T1000. W tabeli 1 i 2 przedstawiono uśrednione wartości parametrów Ra i Rz po obróbce nagniataniem odpowiednio stali 41Cr4 i 35HGS. Chropowatość Ra po toczeniu stali 41Cr4 wynosiła w granicach $0,8 \div 1,0 \mu\text{m}$.



Rys. 3. Wpływ zmian ciśnienia na chropowatość powierzchni (parametr Ra) dla stali 41Cr4 po nagniataniu kulkami z: ZrO₂ i HG13 firmy Ecoroll

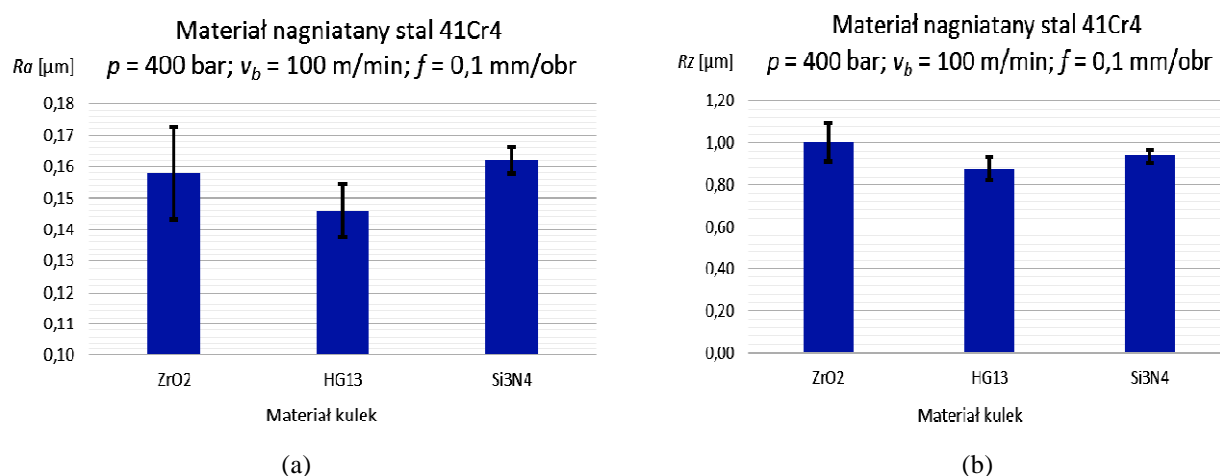
Fig. 3. The influence of the pressure changes on the surface roughness (Ra parameter) for the steel 41Cr4 after burnishing using the balls made of: ZrO₂ and the HG13 of Ecoroll



Rys. 4. Wpływ zmian ciśnienia na chropowatość powierzchni (parametr Rz) dla stali 41Cr4 po nagniataniu kulkami wykonanymi z: ZrO₂ i HG13 firmy Ecoroll

Fig. 4. The influence of the pressure changes on the surface roughness (Rz parameter) for the steel 41Cr4 after burnishing, using the balls made of: ZrO₂ and the HG13 of Ecoroll

Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono, dla porównania, wyniki pomiarów parametrów Ra i Rz dla obrobionych powierzchni stali 41Cr4 końcówką HG13 i ceramiką ZrO_2 , z uwzględnieniem obliczonego odchylenia standardowego. Z wykresów wynika, że dla analizowanych ciśnień od 200 do 400 bar wyniki pomiarów nagniatania kulką HG13 (wchodzącą w skład systemu narzędziowego HG13 firmy Ecoroll [4]) są zbliżone do wartości parametrów nagniatania ceramiką ZrO_2 . Niewielkie różnice są również w wynikach pomiarów Ra i odpowiednio Rz dla maksymalnego ciśnienia dostępnego w eksperymencie 400 bar przy posuwie $f = 0,1$ mm/obr i prędkości $v_b = 100$ m/min dla kulek HG13 i Si_3N_4 oraz ZrO_2 (rys. 5).

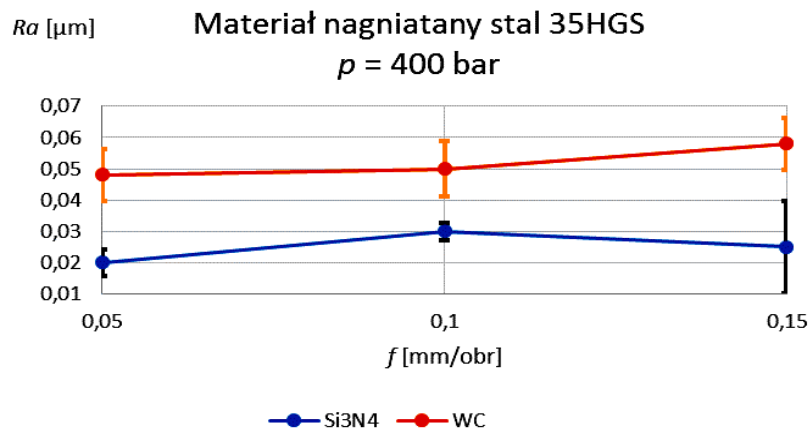


Rys. 5. Chropowatość powierzchni dla stali 41Cr4 po nagniataniu kulkami wykonanymi z: ZrO_2 , Si_3N_4 oraz HG13 firmy Ecoroll ($p = 400$ bar; $v_b = 100$ m/min; $f = 0,1$ mm/obr): a) Ra , b) Rz

Fig. 5. The surface roughness for the steel 41Cr4 after burnishing using the balls made of: ZrO_2 , Si_3N_4 and HG13 of Ecoroll ($p = 400$ bar; $v_b = 100$ m/min; $f = 0,1$ mm/rev): a) Ra , b) Rz

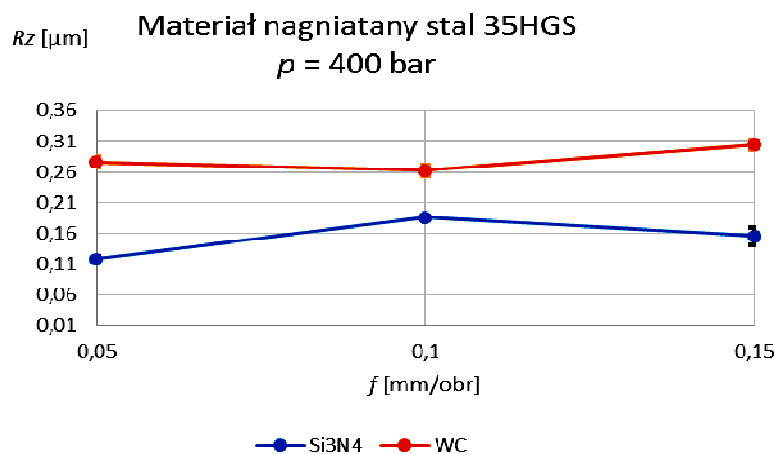
W przypadku obróbki stali hartowanej 35HGS zauważono znaczne wygładzenie powierzchni. Chropowatość przed nagniataniem po toczeniu Ra wynosiła w granicach ok. $0,7 \div 0,8 \mu m$ dla próbek ze stali 35HGS. Natomiast najmniejsza osiągnięta średnia chropowatość Ra po nagniataniu wyniosła $0,02 \mu m$, którą uzyskano kulką z ceramiki Si_3N_4 .

Na rysunku 6 i 7 przedstawiono uśrednione wyniki pomiarów profilów nierówności odpowiednio dla parametrów Ra i Rz nagniatanych powierzchni na próbce ze stali hartowanej 35HGS przy parametrach nagniatania $p = 400$ bar, $v_b = 150$ m/min, $f = 0,5 \div 1,5$ mm/obr. Powierzchnie były nagniatane ceramiką Si_3N_4 i WC. Na wykresie zaznaczono za pomocą słupków błędów odchylenie standardowe dla pomierzonych uśrednionych wartości parametrów. Z wykresów (rys. 6 i 7) wynika, że osiągnięte wartości parametrów powierzchni dla hartowanej stali 35HGS istotnie nie różnią się po nagniataniu ceramiką Si_3N_4 i WC. Podobnie, nie zauważono istotnych różnic dotyczących wyników pomiarów powierzchni opisanej odpowiednio parametrami Ra i Rz (rys. 8), nagniatanej kulkami Si_3N_4 , WC oraz Al_2O_3 , przy zastosowaniu maksymalnego ciśnienia 400 bar. W tym przypadku największą wartość parametrów chropowatości uzyskano dla powierzchni nagniatanej ceramiką Al_2O_3 .



Rys. 6. Wpływ zmian posuwu na chropowatość powierzchni (parameter R_a) dla stali 35HGS po nagniataniu kulkami: Si_3N_4 oraz WC

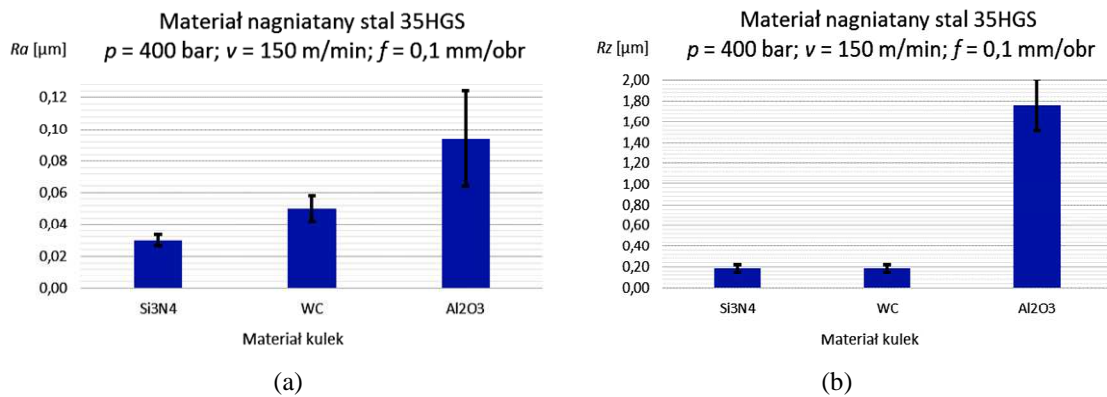
Fig. 6. The influence of feed changes on the surface roughness (R_a parameter) for the steel 35HGS after burnishing with the balls made of Si_3N_4 and WC



Rys. 7. Wpływ zmian posuwu na chropowatość powierzchni (parametr R_z) dla stali 35HGS po nagniataniu kulkami: Si_3N_4 oraz WC

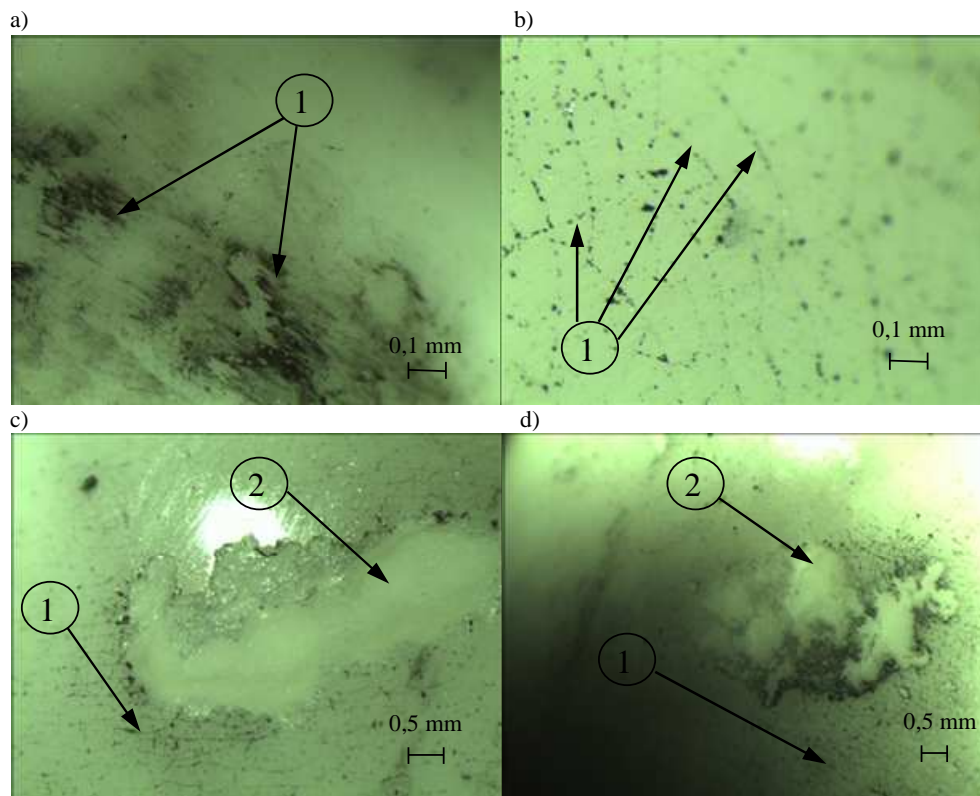
Fig. 7. The influence of feed changes on the surface roughness (R_z parameter) for the steel 35HGS after burnishing with the balls made of Si_3N_4 and WC,

Rysunki 9-12 przedstawiają powiększenia powierzchni badanych kulek ceramicznych uzyskane pod mikroskopem optycznym. Analizując fotografie ceramiki Al_2O_3 można zauważyć znaczne zużycia kulek po procesie nagniatania. Na rys. 9a możemy zaobserwować nagromadzony materiał na powierzchni kulki. Ceramika jest porowata. Duże naciski powodują, że ceramika wypełnia się materiałem nagniatanym. Materiał również zgromadził się na siatce spękań (rys. 9b) powstałych prawdopodobnie po przekroczeniu nacisków krytycznych na wzniesieniach nierówności po toczeniu. Nagromadzony materiał oraz siatka spękań były prawdopodobnie przyczyną wykruszeń (rys. 9c, d). Podobne wyniki badań przedstawiono w pracy [5].



Rys. 8. Chropowość powierzchni dla stali 35HGS po nagniataniu kulkami z materiału: Si_3N_4 , WC oraz Al_2O_3 ,
a) R_a , b) R_z

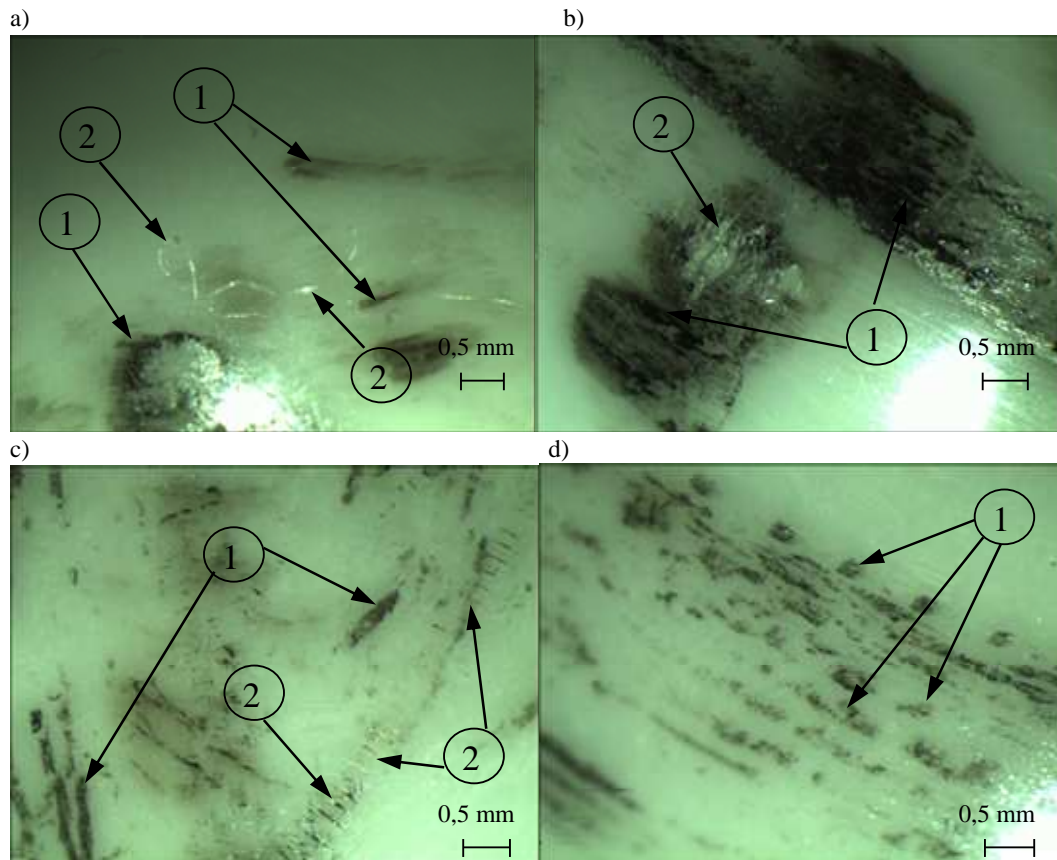
Fig. 8. The surface roughness for the steel 35HGS after burnishing with the use of balls made of: Si_3N_4 , WC and Al_2O_3 :
a) R_a , b) R_z



Rys. 9. Fotografie powierzchni kulek ceramicznych Al_2O_3 po nagniataniu: a) nagromadzenie materiału - 1,
b)-d) siatka spękań - 1, wykruszenia - 2

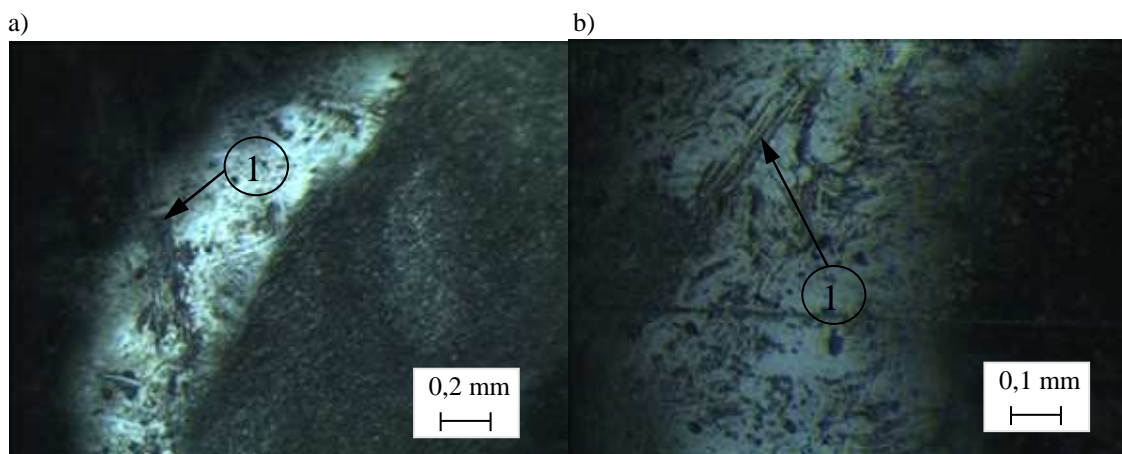
Fig. 9. Photographs of the ceramic ball surfaces made of Al_2O_3 after burnishing: a) the accumulation of material - 1,
b)-d) the grid of cracks - 1, the spallings - 2

Natomiast na rysunkach 10a i 10b można zauważyć oprócz nagromadzenia materiału obrabianego nieregularne pęknięcia powierzchni kulek. Ponadto na rysunku 10c i 10d pęknięcia na powierzchni oraz regularne ślady na kulce mogą być skutkiem drgań wynikających z gwałtownego wejścia w materiał obrabiany.

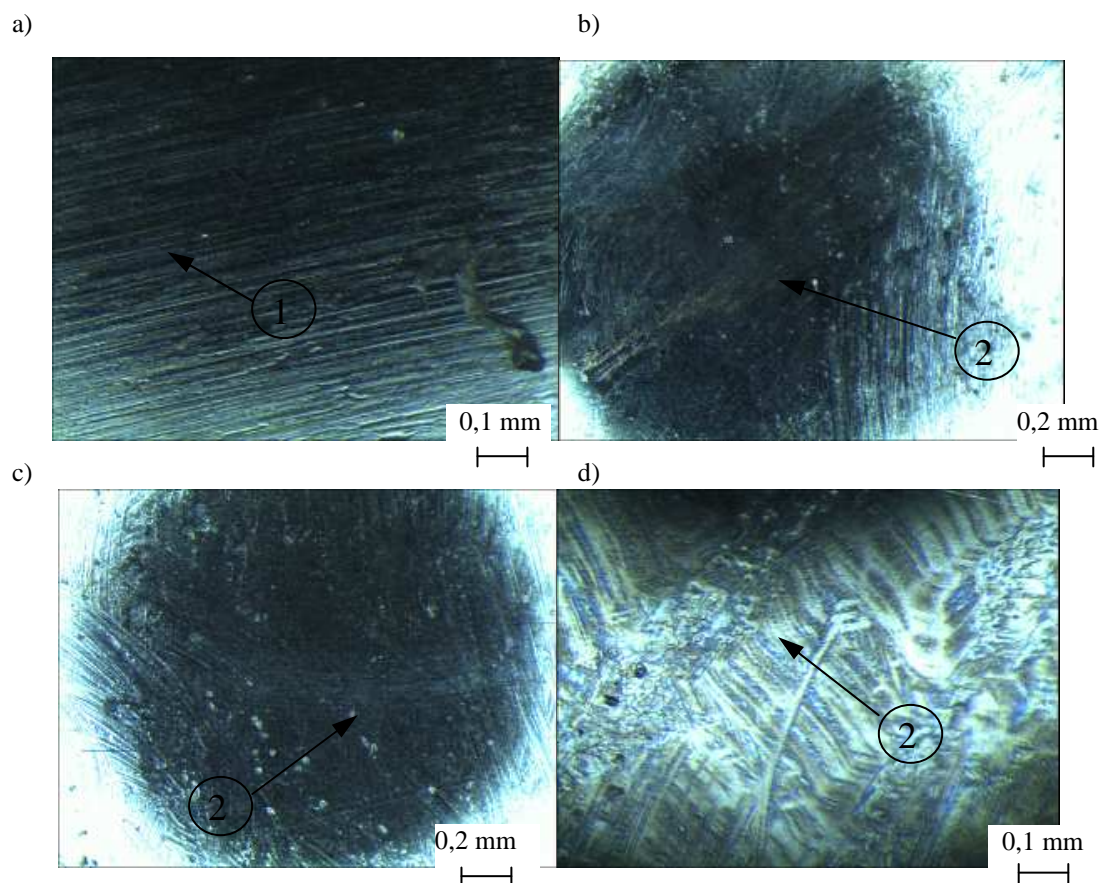


Rys. 10. Fotografie powierzchni kulek ceramicznych ZrO_2 po nagniataniu: a) nagromadzenie się materiału - 1, pęknięcia - 2, b) nagromadzenie się materiału - 1, pęknięcia 2, c) nagromadzenie się materiału - 1, ślady uszkodzeń powstałych w wyniku drgań - 2, d) ślady nagromadzenia materiału jako efekt drgań - 2

Fig. 10. Photographs of the ceramic ball surfaces made of ZrO_2 after burnishing: a) the accumulation of material - 1, cracks - 2, b) the accumulation of material - 1, the breaks - 2, c) the accumulation of material - 1, the traces of damages caused by vibration - 2, d) the traces of the accumulation of the material machined as the vibration effect - 2



Rys. 11. Powierzchnia kulek ceramicznych Si_3N_4 po nagniataniu: a), b) przytarcia po nagniataniu - 1
Fig. 11. The surface of the ceramic balls made of Si_3N_4 after burnishing: a), b) the abrasions after burnishing - 1



Rys. 12. Powierzchnia kulek ceramicznych WC po nagniataniu: a) ślad po wytwarzaniu kulki ceramicznej - 1, b), c), d) przytarcia po nagniataniu - 2

Fig. 12. The surface of the WC ceramic balls after burnishing: a) the trace after manufacture of the ceramic ball - 1, b), c), d) the abrasions after burnishing - 2

W przypadku nagniatania kulką z ceramiki Si_3N_4 i WC zauważono ślady starcia powierzchni (rys. 11 i rys. 12). Prawdopodobnie ze względu na podobny kolor powierzchni kulek i materiału nagniatanego nie zaobserwowano siatki spękań. Wstępnie można stwierdzić, że kulki ceramiczne Si_3N_4 i WC uległy mniejszemu zużyciu. Wynikać to może z faktu, że kulki ceramiczne ZrO_2 , Al_2O_3 są odpowiednio prawie dwukrotnie i czterokrotnie mniej odporne na pękanie kruche niż ceramika Si_3N_4 . Zatem wpływ nagniatania twardych materiałów ($> 40\text{HRC}$) na ceramikę może być odmienny niż dla nagniatania materiałów miękkich. Ponadto należy nadmienić, że poważnym problemem w badaniach był statystyczny dobór próbek po hartowaniu, ze względu na powtarzalność chropowatości powierzchni R_a uzyskanej po toczeniu, co również mogło mieć wpływ na wyniki badań.

4. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych analiz i badań można sformułować szereg wniosków dotyczących zarówno używania się kulek ceramicznych w procesie obróbki nagniataniem,

jak również doboru parametrów procesu i uzyskiwanych efektów technologicznych. Można je ująć następująco:

- zużycie ceramiki w wyniku nagniatania stali twardych może być odmienne niż podczas nagniatania stali miękkich. Widoczne na powierzchni pęknięcia sugerują, że w miejscach kontaktu kulki z nierównościami przedmiotu obrabianego mogą występować naprężenia przekraczające dopuszczalny poziom dla tego typu ceramiki. Odmienność zużycia może wynikać nie tylko z odporności na ścieranie, ale i z odporności na pękanie kruche,
- różnice uzyskiwanych wyników chropowatości po nagniataniu dla nieznacznych wartości chropowatości R_a i R_z mogą być zakłócone przez zakres niepewności pomiaru przyrządu Hommel Tester T1000, jak i zmieniającego się profilu chropowatości po toczeniu,
- wzrost siły nagniatania nieznacznie zwiększa wartości R_a , natomiast znacznie zwiększa wartości R_z obrabianych elementów. Posuw nagniatania zmieniający się w zakresie $0,05 \div 0,15$ nie zmienia istotnie parametrów R_a i R_z ,
- powierzchnia nagniatana kulką z ceramiki ZrO_2 wykazuje znaczny rozstęp wyników pomiarów parametrów chropowatości materiału obrabianego, co wynikać może ze zbyt szybko pojawiających się na tej kulce wykruszeń i pęknięć. Kulka o tej jakości nie spełnia wymagań stawianym narzędziom do nagniatania materiałów twardych.

W ramach dalszych prac planuje się przeprowadzenie szczegółowych badań efektów zastosowania kulek ceramicznych w procesach nagniatania hartowanych stali według określonego planu wraz z opracowaniem statystycznym wyników. Ponadto obiektem zainteresowań będzie analiza stereometrii obrabianej powierzchni oraz trwałości kulek nagniatających.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki na lata 2011-2014



LITERATURA

- [1] DOBRZYŃSKI M., PRZYBYLSKI W., WASZCZUR P., 2011, *Ocena parametrów chropowatości powierzchni toczonych otworów w kołach zębatych obrabianych nagniataniem*, Tribologia: tarcie, zużycie, smarowanie, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich, 61-68.
- [2] DZIONK S., ŚCIBIORSKI B., 2013, *Hardened steel surface waviness created by rolling burnishing process*, The 9th International Conference Mechatronic Systems and Materials MSM-2013, Vilnius, Lithuania, 57-58.
- [3] DZIONK S., 2012, *Surface waviness of components machined by burnishing method*. Archives of Mechanical Technology and Automation, 32/3, 25-33.
- [4] Ecoroll: *Rozwiązania technologiczne prowadzące do poprawy własności warstwy wierzchniej metali, Dogniatanie gładkościowe, Dogniatanie umacniające, Łuszczenie z dogniataniem ... żeby wszystko szło gładko*. opracowanie firmy Ecoroll.
- [5] GROCHAŁA D., 2011, *Nagniatanie narzędziami hydrostatycznymi złożonych powierzchni przestrzennych na frezarkach CNC*, Rozprawa doktorska, www.zbc.ksiaznica.szczecin.pl, Szczecin.
- [6] GRZESIK W., ZAK K., 2013, *Comparison of surface textures produced by finish cutting, abrasive and burnishing operations in terms of their functional properties*, Journal of Machine Engineering, 13/2, 46-58.
- [7] GRZESIK W., ZAK K., PRAZMOWSKI M., 2012, *Surface integrity of hard turned parts modified by ball burnishing*, Journal of Machine Engineering, 12/1, 18-27.

- [8] KLOCKE F., LIBERMANN J., 1988, *Roller burnishing of hard turned surfaces*, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 38/5-6, 419-423.
- [9] LIN Y. C., WANG S. W., LAI H.-Y., 2004, *The relationships between surface roughness and burnishing factor in the burnishing process*, Int J Adv Manuf Technol, 23, 666-671.
- [10] MOSHKOVICH V., PERFILYEV K., YUTUJYAN L., 2007, *Friction and wear of solid lubricant films by different types of burnishing*, Wear, 263, 1324-1327.
- [11] NESLUSAN M., GRZESIK W., 2012, *Analysis of surface roughness on bearing steel parts after cutting, superfinishing and burnishing operations*, Journal of Machine Engineering, 12/1, 111-118.
- [12] OLSZAK W., CHMIELEWSKI K., KWACZYŃSKI W., GROCHALA D., 2011, *Stabilizacja siły nagniatania powierzchni 3D narzędziem hydrostatycznym ze sprężystym miechem*, Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie, 3, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 9-17.
- [13] PRZYBYLSKI W., ZIELIŃSKI J., 1996, *Nagniatak kulkowy wzór użytkowy*, nr PL546445Y1, Urząd patentowy RP, Warszawa.
- [14] STALIN J M.R., VINAYAGAM B.K., 2011, *Optimization of ball burnishing process on tool steel (T215Cr12) in CNC machining centre using response surface methodology*. Arab J Sci Eng., 36, 1407-1422.
- [15] ŚCIBIORSKI B., DZIONK S., 2013, *Hardened steel surface roughness created by rolling burnishing process*, The 9th International Conference Mechatronic Systems and Materials MSM-2013, Vilnius, Lithuania, 211-2012.
- [16] ZABORSKI A., 2011, *Strefy kontaktu w procesie nagniatania*, Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie, 3, Politechnika Gdańska, Gdańsk, 76-90.

SELECTED ISSUES OF ROLLING BURNISHING HARD STEEL PARTS WITH CERAMIC MATERIALS ON THE CNC LATHE

Burnishing is finishing and non-material removal machining process that consists in plastic strain of the part surface layer. The burnishing process is basically used for machining part components made of soft steels. However, it can be successfully applied to machining hard materials, such as: hardened steels with the hardness exceeding 40HRC. In hard steel rolling burnishing, balls made of hard materials, and among others of ceramics, are widely utilised in related tooling as the direct burnishing elements. These balls are seated in hydrostatic bearings and the pressure of hydraulic oil creates the burnishing force, which presses the ball against the surface burnished. The burnishing process of hard materials is reported to be not fully recognised and the physical phenomena occurring in it seem to be comparatively complex. Moreover, considering the diversity of this process, the usability of some of ceramics for burnishing elements may be very limited. The paper presents the comparison of standard technological effects of burnishing hardened steel surfaces with balls made of different kind of technical ceramics. Changes regarding the state of the surface worked as a result of burnishing process are also discussed.