

## **KULKI CERAMICZNE JAKO ELEMENTY NAGNIATAJĄCE POWIERZCHNIĘ STALI HARTOWANEJ**

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

Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji  
Produkcji

### **STRESZCZENIE**

*Materiały utwardzane nagniatą się zazwyczaj narzędziami z diamentowymi końcówkami. W tym procesie sfera nagniatająca jest stosunkowo mała ze względu na znaczny koszt narzędzia. Powoduje to, że parametry nagniatania a w szczególności posuw muszą być bardzo małe, co znacznie wydłuża proces. Ponadto podczas nagniatania takim narzędziem na powierzchni powstają dodatkowe struktury nierówności związane z wypływkami materiału. Materiały ceramiczne cechuje znaczna twardość a masowość produkcji obniża ich cenę. Na rynku dostępne są kulki ceramiczne wykonane z dużą dokładnością o małej chropowatości powierzchni. Dokładniejsza analiza ich właściwości umożliwiłaby określenie zakresu ich stosowania. W niniejszym artykule analizuje się stan powierzchni kulek ceramicznych pod względem struktury geometrycznej powierzchni w kontekście stosowania ich w procesie nagniatania ślizgowego.*

**Słowa kluczowe: obróbka nagniataniem, ceramika, stal hartowana, nagniatanie ślizgowe**

### **1. WPROWADZENIE**

Nagniatanie jest obróbką wykończeniową poprzez zgmiot struktury powierzchniowej elementu obrabianego na zimno. W przypadku materiałów twardych jak np. stal hartowana, aby prawidłowo przeprowadzić tego rodzaju zgmiot należy zastosować twardy gładki (bardzo mała chropowatość) element nagniatający, którego powierzchnia robocza ma zazwyczaj kształt kulisty (spotyka się też inne kształty np. paraboliczny, ale wówczas narzędzie pracuje tylko w określonych kierunkach) [7, 18]. Obecnie narzędzia do tego typu obróbki wykonuje się zazwyczaj diamentem syntetycznym, przy czym występują też inne materiały np. szafir, lecz bardzo rzadko stosowane ze względu na cenę. W ostatnich latach nastąpił bardzo szybki rozwój materiałów i metod obróbki ceramiki technicznej [2, 3, 5, 16]. Te materiały obecnie są masowo produkowane i znajdują zastosowanie we wielu dziedzinach techniki [9, 11, 14, 15]. Ze względu na swoje właściwości ceramika (twardość i odporność na wysokie temperatury) może stać się zamiennikiem dla dotychczas stosowanych materiałów na narzędzia nagniatające. Stosowanie tego rodzaju materiałów obniżyłoby znacznie ceny narzędzi nagniatających. Natomiast struktura geometryczna powierzchni elementów nagniatających narzędzi ma istotne znaczenie podczas ich pracy a w szczególności, gdy obrabiane są materiały twarde takie jak stal hartowana [6, 12, 13]. W niniejszym artykule analizowana jest struktura powierzchni kulek wykonanych z wybranych rodzajów ceramiki technicznej.

## 2. CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW NA ELEMENTY NAGNIATAJĄCE W NARZĘDZIACH DO NAGNIATANIA ŚLIZGOWEGO

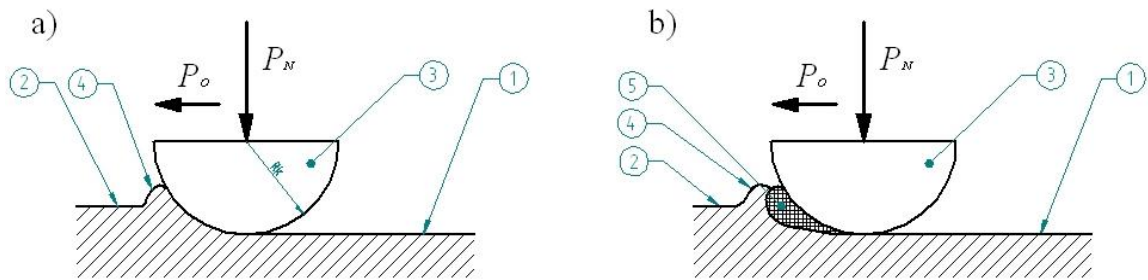
Nagniatanie ślizgowe wykonuje się zazwyczaj diamentem. Przy czym stosuje się najczęściej diamenty techniczne, syntetyczne lub odmianę diamentu czarnego (tzw. carbonado). Nagniatanie stali tym materiałem jest dość proste gdyż na powierzchni stali utlenionej współczynnik tarcia diamentu na stali jest poniżej 0,1. Problemem jest wysoka cena tego materiału, co powoduje minimalizację promienia sfery nagniatającej. Małe promienie zaokrąglenia elementu nagniatającego narzędzia powodują stosowanie małych posuwów narzędzia, co wydłuża czas procesu. Ceramika techniczna ze względu na swoje właściwości może zastępować elementy diamentowe w narzędziach nagniatających. Właściwości ceramiki takie jak duża twardość odporność na wysoką temperaturę, odporność na zużycie oraz duża wytrzymałość na ściskanie są korzystne w tego typu zastosowaniach [8, 10, 17, 19]. Z drugiej strony kruchość, brak odporności na obciążenia udarowe, mała wytrzymałość na rozciąganie oraz porowatość struktury są wadami tego rodzaju materiałów stosowanych jako elementy nagniatające w narzędziach. Ponadto ceramika jest odporna korozyjnie, można, zatem stosować zamiast oleju wodę (lub wodę z niewielką domieszką innych dodatków) jako ciecz chłodząco-smarującą w tym procesie, co jest bardzo proekologicznym rozwiązaniem. Porównanie właściwości wybranych ceramik i diamentu technicznego zaprezentowano w tabeli 1. Jest wielu producentów materiałów ceramicznych. W związku z tym zamieszczone w tabeli wybrane właściwości materiałów ceramicznych zawierają się w określonym przedziale obejmującym zakres wartości prezentowanych przez różnych producentów.

Tabela 1. Właściwości materiałów ceramicznych i diamentu wg [24, 25]

Własności	Jedn.	Diament	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	WC	SiC
Gęstość	g/cm <sup>3</sup>	3,52	2,3÷3,2	5÷6,15	3÷3,98	15,2÷15,8	4,36÷4,84
Twardość	HV	b.d.	1500÷1800	1200	1800	b.d.	b.d.
	GPa	100	8÷30	5,5÷15,7	5,5÷22	17÷36	0,6÷3,8
Moduł Younga	GPa	1220	166÷297	100÷250	215÷413	600÷680	90÷137
Przewodność cieplna	W/mK	20	10÷43	1,7÷2,7	12÷38,5	28÷88	3,8÷20,7
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	10 <sup>-6</sup> /K	1,1	3,7	10,5	4,5÷10,9	4,5÷7,1	7,9÷11
Wsp. Poissona		0,2	0,23÷0,28	0,22÷0,32	0,21÷0,33	0,2÷0,22	0,35÷0,37
Wytrzymałość na ściskanie (800°C)	GPa	110	0,52÷5,5	1,2÷5,2	0,6÷5,5	3,3÷6,8	0,13÷1,3
Wytrzymałość na rozciąganie (800°C)	GPa	1,2	0,06÷0,52	0,1÷0,7	0,06÷0,6	0,3÷0,5	0,24÷1,6
Odporność na pękanie kruche	MPa m <sup>1/2</sup>	2,0	1,8÷6,5	1÷8	3,3÷5	2÷3,8	14÷120

Podczas nagniatania istotnym elementem jest sposób deformacji powierzchni realizowany przez narzędzie robocze. Narzędzie to może odkształcać powierzchnię gdzie materiał [1, 4, 7] nagniatany nie przywiera do narzędzia nagniatającego i następuje poślizg na powierzchni roboczej elementu nagniatającego. Taki rodzaj pracy schematycznie przedstawiono na rys. 1a. W przypadku, gdy materiał przywiera do powierzchni nagniatającej na narzędziu powstaje narost i powierzchnia poślizgu materiału nagniatanego względem powierzchni narzędzia przesuwa się na czoło narostu powodując zakłócenia w procesie

nagniatania, co skutkuje pogorszeniem się jakości powierzchni nagniatanej. Schemat procesu nagniatania, w którym na elemencie nagniatającym powstaje narost przedstawiono na rys. 1b.



Rys. 1. Schemat odkształcania powierzchni podczas nagniatania; a)- bez narostu; b)- z występującym narostem na powierzchni narzędzia; 1- powierzchnia obrobiona, 2- powierzchnia obrabiana, 3- końcówka narzędzia, 4- spęczenie przed narzędziem, 5- narost na narzędziu,  $R_k$ - promień narzędzia,  $P_N$ - siłą normalna (nagniatająca),  $P_o$ - siła odporowa

Powstawanie narostu może być związane z wieloma czynnikami takimi jak: rodzaj materiału, struktura powierzchni a w szczególności chropowatość i porowatość, naciski występujące podczas obróbki np. podczas nagniatania materiałów miękkich (<40HRC) naciski jednostkowe nie powodują jeszcze przywierania do powierzchni elementu roboczego materiału nagniatanego natomiast nagniatanie tego materiału po zahartowaniu (>50HRC) może wywołać naciski, które spowodują przywieranie materiału do powierzchni roboczej narzędzia.

### 3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

Do badań wybrano kulki łożyskowe produkowane seryjnie wykonane w 5 klasie dokładności. Powierzchnia kulek jest błyszcząca (odbijająca światło) i nieuzbrojonym okiem na powierzchni kulek nie zauważa się śladów obróbki ani innych defektów powierzchni. Fotografię badanych kulek zaprezentowano na rys. 2.



Rys. 2. Kulki ceramiczne: 1- WC, 2-  $Si_3N_4$ , 3-  $ZrO_2$ , 4-  $Al_2O_3$ , 5- SiC

W badaniach eksperymentalnych powierzchnia wybranych kulek ceramicznych została przebadana za pomocą mikroskopu konfokalnego „ $\mu$ surf Explorer” firmy Nanofocus AG. Pomiary chropowatości w układzie profilowym zostały przeprowadzone w oparciu o profil struktury uzyskany metodami optycznymi natomiast parametry struktury geometrycznej

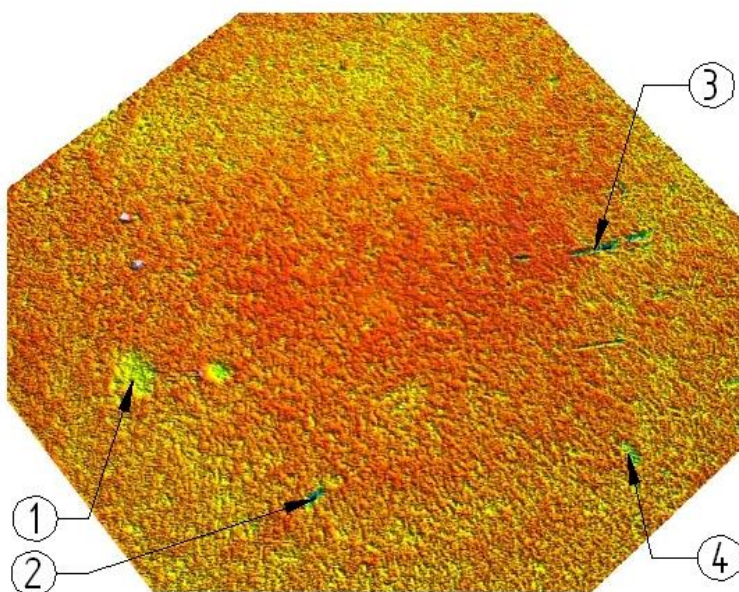


powierzchni obliczono na podstawie normy ISO 4287 stosując filtr Gaussa i odcinek elementarny 0,08mm [20-22]. Wartości podstawowych parametrów chropowatości dla wybranych kulek przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości parametrów powierzchni kulek ceramicznych [20-22]

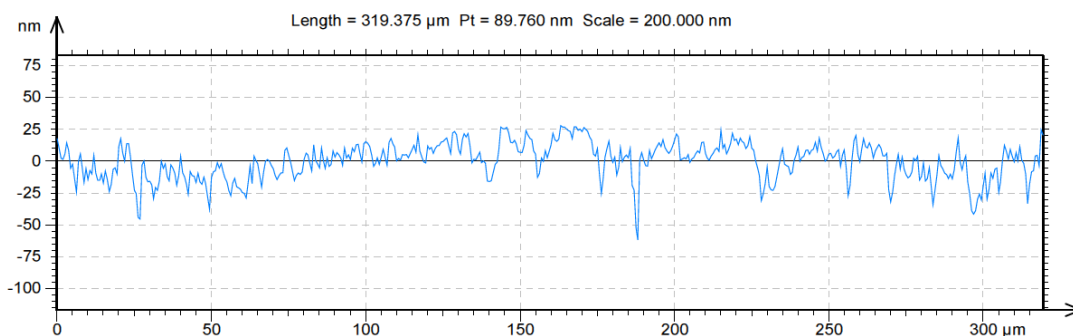
Nazwa parametru		Wartości parametrów dla kulki wykonanej z				
		Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	ZrO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	WC	SiC
<b>Ra</b>	nm	8.041	10.379	6.200	8.862	26.758
<b>Rz</b>	nm	70.647	69.455	67.418	64.041	224.449
<b>Rt</b>	nm	130.254	86.356	114.340	98.621	355.888
<b>Rp</b>	nm	39.240	31.861	31.426	23.339	39.099
<b>Rv</b>	nm	31.407	37.594	35.992	40.701	185.350
<b>Rc</b>	nm	25.076	29.690	18.986	25.765	111.374
<b>Rq</b>	nm	10.871	13.280	9.338	11.748	40.392
<b>Rsk</b>		0.344	-0.263	-0.218	-0.734	-2.069
<b>Rku</b>		6.958	3.378	11.416	b.d.	8.483

Na rysunku 3 przedstawiono strukturę powierzchni kulki ceramicznej wykonanej z WC. Struktura ta ma regularne pory o niewielkich wymiarach. Można też zauważyć struktury o większych wymiarach (1-4). Te struktury mają charakter przypadkowy.

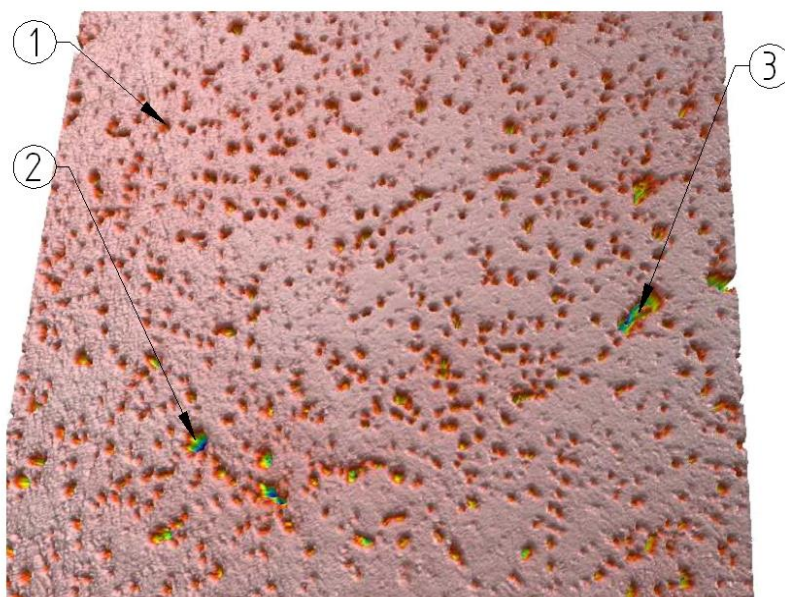


Rys. 3. Struktura powierzchni kulki wykonanej z WC oraz parametry pomiaru chropowatości powierzchni: 1, 2- pory występujące na powierzchni, 3, 4- pory o wydłużonym kształcie i znacznej głębokości

Na profilogramie zamieszczonym na rys. 4 przedstawiono strukturę nierówności kulki wykonanej z WC. Można na nim zauważyć pojedyncze wgłębienia o znacznej głębokości. Grubość struktury geometrycznej w tym przypadku wynosi ok. 100nm.



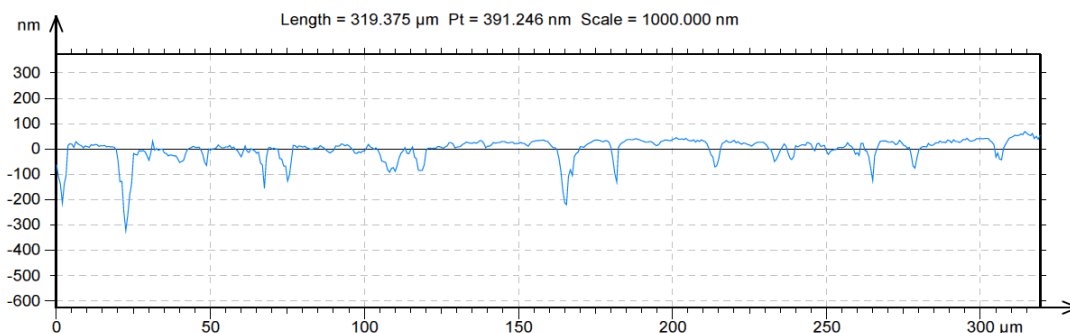
Rys. 4. Profil powierzchni kulki WC



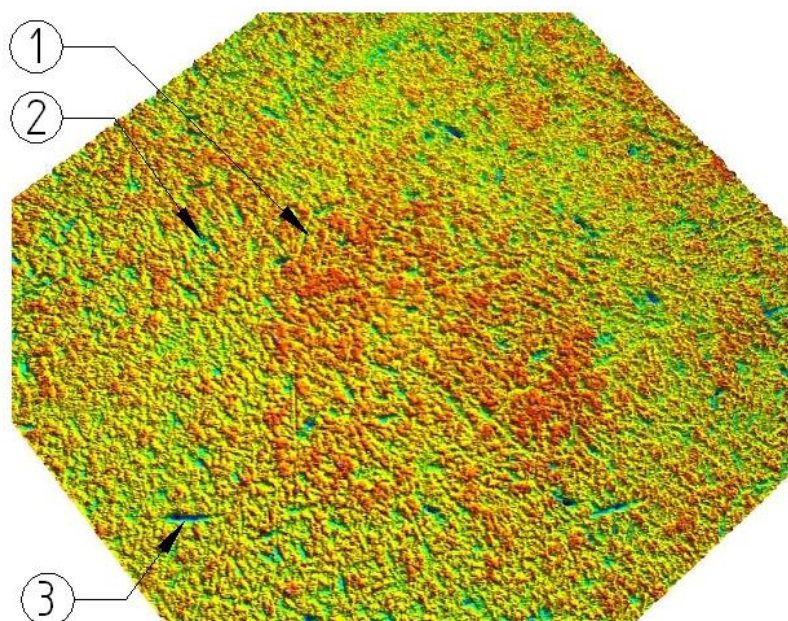
Rys. 5. Struktura powierzchni kulki wykonanej z SiC oraz parametry pomiaru chropowatości powierzchni: 1, 2- pory występujące na powierzchni, 3- pory o wydłużonym kształcie i znacznej głębokości

Na rysunku 5 przedstawiono powierzchnię kulki wykonaną z SiC. Cechą charakterystyczną tej powierzchni jest znaczna porowatość powierzchni. Pory mają zróżnicowaną wielkość i głębokość (1), (2), (3). Profilogram powierzchni kulki SiC przedstawiony na rys. 6 charakteryzuje się znaczną liczbą wgłębień o dużej głębokości. Wgłębienia te są elementami porowatości specyficznej dla tego materiału. Porowatości powodują, że dla tego materiału grubość warstwy określającej strukturę geometryczną powierzchni wynosi ok. 350nm.

Rysunek 7 przedstawia strukturę powierzchni kulki ceramicznej wykonanej z ZrO<sub>2</sub>. W strukturze tego materiału nie zauważa się porów natomiast na powierzchni występują pojedyncze rysy (3).

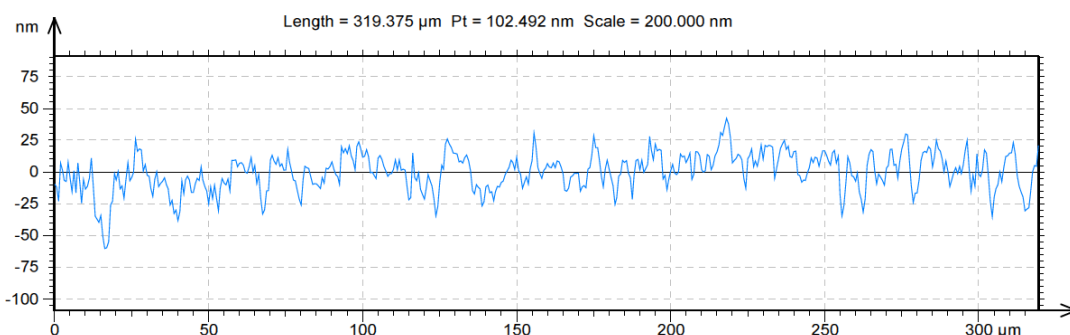


Rys. 6. Profil powierzchni kulki SiC



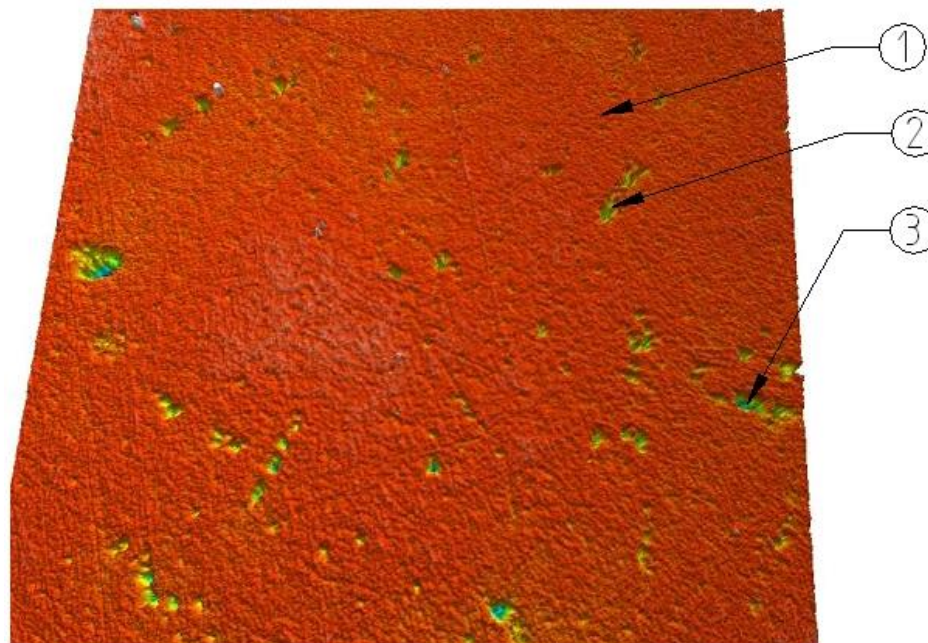
Rys.7. Struktura powierzchni kulki wykonanej z  $ZrO_2$  oraz parametry pomiaru chropowatości powierzchni: 1- wzniesienia powierzchni 2- zagłębienia występujące na powierzchni, 3- rysy występujące na powierzchni

Analizując profilogram (rys. 8) można stwierdzić, że struktura powierzchni jest regularna i nie występują na niej pojedyncze wgłębienia. Grubość struktury geometrycznej dla tej kulki wynosi ok. 110nm, co można zaobserwować na rys. 8.

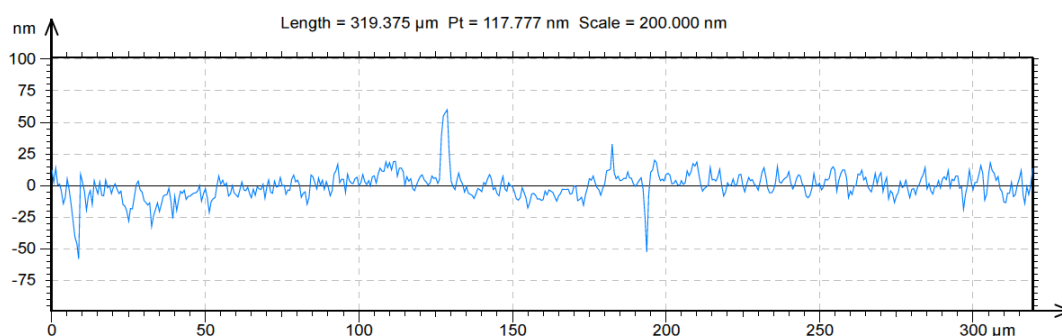


Rys. 8. Profil powierzchni kulki  $ZrO_2$

Na rysunku 9 przedstawiono strukturę powierzchni kulki wykonanej z  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Występuje na nim struktura podstawowa (1) o stosunkowo niewielkiej grubości warstwy chropowatości. W tej strukturze są pojedyncze obszary zagłębień (2), (3) o znacznej głębokości. Obszary zagłębień nie mają regularnego charakteru i położenie ich na powierzchni jest dość przypadkowe. Na profilogramie tej powierzchni przedstawionym na rys. 10 zauważyć można pojedyncze wgłębienia o znacznej głębokości, które mogą być odwzorowaniem wyżej opisanych obszarów zagłębień. Na tym profilogramie można też zauważyć pojedyncze wzniesienia niespotykane w strukturze innego rodzaju ceramiki technicznej.

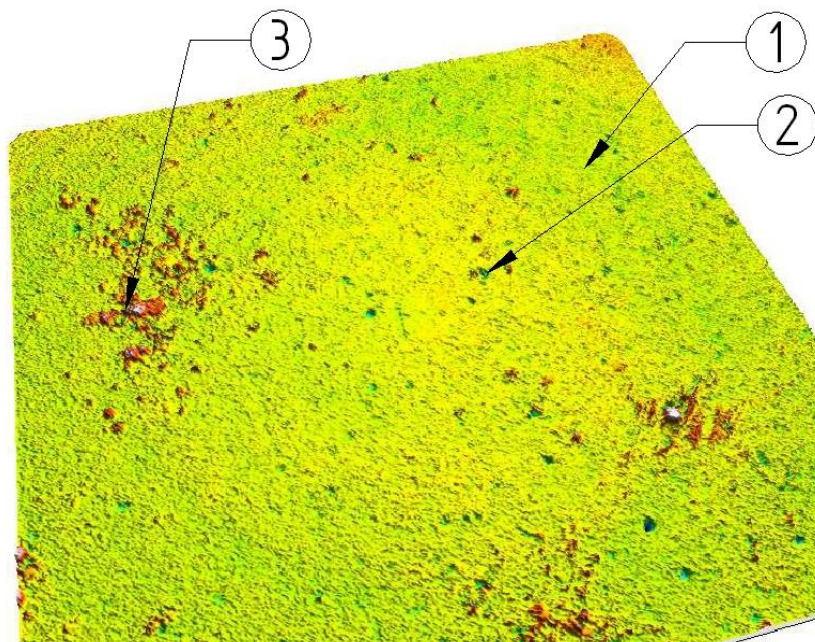


Rys. 9. Struktura powierzchni kulki wykonanej z  $\text{Al}_2\text{O}_3$  oraz parametry pomiaru chropowatości powierzchni: 1- struktura wzniesień powierzchni, 2, 3- zagłębienia powierzchni (pory)

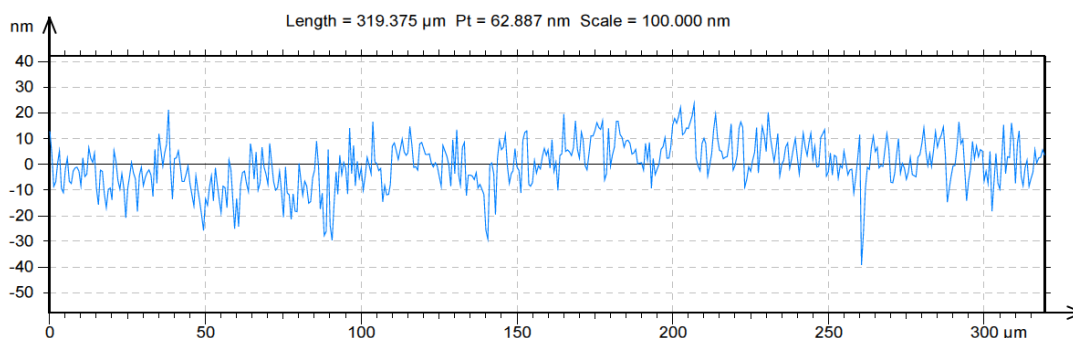


Rys. 10. Profil powierzchni kulki  $\text{Al}_2\text{O}_3$

Na rysunku 11 przedstawiono strukturę geometryczną powierzchni kulki wykonanej z  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Powierzchnia ta charakteryzuje się dużym stopniem jednorodności. Niewielkie zagłębienia występują rzadko w strukturze powierzchni. Obszary wzniesień (3) występujące na powierzchni mogą być pozostałościami po wcześniejszej obróbce w postaci materiałów tam stosowanych. Profilogram powierzchni przedstawiony na rys. 12 obrazuje pojedyncze wgłębienia w strukturze powierzchni. Poza tym grubość strefy chropowatości jest stosunkowo mała.



Rys. 11. Struktura powierzchni kulki wykonanej z  $\text{Si}_3\text{N}_4$  oraz parametry pomiaru chropowatości powierzchni: 1- struktura powierzchni, 2- niewielkie pory występujące na powierzchni, 3- dodatkowy materiał występujący na powierzchni.



Rys. 12. Profil powierzchni kulki  $\text{Si}_3\text{N}_4$

#### 4. WNIOSKI

Analizując strukturę powierzchni kulek można stwierdzić, że:

- grubość warstwy chropowatość jest najmniejsza dla badanej ceramiki  $\text{ZrO}_2$  i wynosi ona  $0,0864\mu\text{m}$  natomiast największą wartość uzyskuje ceramika  $\text{SiC}$  która wynosi  $0,356\mu\text{m}$ .
- porównując wartości średnie nierówności parametr  $Ra$  jest najmniejszy dla kulki  $\text{Al}_2\text{O}_3$  i wynosi on  $0,006\mu\text{m}$ , natomiast największą wartość tego parametru ma kulka  $\text{SiC}$  która wynosi  $0,026\mu\text{m}$ .
- analizując wgłębienia profilu to najmniejszą wartość uzyskano dla kulki  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , która wynosiła  $0,031\mu\text{m}$  natomiast największą wartość ma kulka  $\text{SiC}$   $0,185\mu\text{m}$ ,
- w zakresie występowania porów na powierzchni to najmniejszą ilość stwierdzono dla kulek  $\text{ZrO}_2$  i  $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,



- na kulce  $\text{Al}_2\text{O}_3$  występują znaczne wzniesienia niewystępujące na powierzchniach innych rodzajów ceramiki.

Przyjmując kryterium dużej gładkości powierzchni (lub minimalizację wskaźników chropowatości) można stwierdzić, że najbardziej korzystną powierzchnię ma ją kulki wykonane z  $\text{ZrO}_2$  i  $\text{Si}_3\text{N}_4$ .

## LITERATURA:

- [1] Balland P., Laurent T., Degre F., Moreau V.: Mechanics of the burnishing process, *Precision Engineering* 37 (2013) 129-134.
- [2] Blugan Gurdial, Mousab Hadad, Tomas Graule, Jakob Kuebler:  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -TiN-SiC three particle phase composites for wear applications, *Ceramics International* 40 (2014) 1439-1446.
- [3] Bo Zhang, Akira Nakajima: Dynamics of magnetic fluid support grinding of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramic ball for ultraprecision bearings and its importance in spherical surface generation, *Precision Engineering* 27 (2003) 1-8.
- [4] Brostow W., Czechowski K., Polowski W., Rusek P., Tobiła D., Wrońska I.: Slide diamond burnishing of tool steels with adhesive coatings and diffusion layers, *Materials Research Innovations* 2013 vol. 17 no 4 s.269-277.
- [5] Effner U., Woydt M.: Importance of machining on tribology of lubricated slip-rolling contacts of  $\text{Si}_3\text{N}_4$ , SiC,  $\text{Si}_3\text{N}_4$ -TiN and  $\text{ZrO}_2$ , *Wear* 216(1998) 123-130.
- [6] Grzesik W., Żak K.: Producing high quality hardened parts using sequential hard turning and ball burnishing operations, *Precision Engineering* 37 (2013) 849-855.
- [7] Hamadache H., Laouar L., N.E. Zeghib N.E., Chaoui K.: Characteristics of Rb40 steel superficial layer under ball and roller burnishing, *Journal of Materials Processing Technology* 180 (2006) 130-136.
- [8] Hong-Bin Qiao, Qiang Guo, Ai-Guo Tian, Guo- Liang Pan, Le-Bo Xu: A study on friction and wear characteristics of nanometer  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /PEEK composites under the dry sliding condition, *Tribology International* 40 (2007) 105-110.
- [9] Kang J., Hadfield M., Cundill R.T.: Rolling contact fatigue performance of HIPed  $\text{Si}_3\text{N}_4$  with different surface roughness, *Ceramics International* 27 (2001) 781-794.
- [10] Kang J., Hadfield M.: Comparison of four-ball and five-ball rolling contact fatigue tests on lubricated  $\text{Si}_3\text{N}_4$ /steel contact, *Materials and Design* 24 (2003) 595-604.
- [11] Kang N. Lee, Dennis S. Fox, Narottam P. Bansal: Rare earth silicate environmental barrier coatings for SiC/SiC composites and  $\text{Si}_3\text{N}_4$  ceramics, *Journal of the European Ceramic Society* 25 (2005) 1705-1715.
- [12] Klocke F., Liermann J.: Roller Burnishing of Hard Turned Surfaces, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 38 Nos 5-6 (1998) pp. 1956-1964.
- [13] Luca L., Neagu-Ventzel S., Marinescu I.: Effects of working parameters on surface finish in ball-burnishing of hardened steels, *Precision Engineering* 2005r., nr 29, s.253-256.
- [14] Meenu Srivastava, V.K. Wiliam Grips, K.S. Rajam: Influence of SiC,  $\text{Si}_3\text{N}_4$  and  $\text{Al}_2\text{O}_3$  particles on the structure and properties of electrodeposited Ni, *Materials Letters* 62 (2008) 3487-3489.
- [15] Ming Jiang, R. Komanduri: On the finishing of  $\text{Si}_3\text{N}_4$  balls for bearing applications, *Wear* 215 (1998) 267-278.
- [16] Umehara N., Kirtane T., Gerlick R., Jain V.K., Komanduri R.: A new apparatus for finishing large size/large batch silicon nitride ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ) balls for hybrid bearing applications by magnetic float polishing (MFP), *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 46 (2006) 151-169.

- [17] Walter Harrer, Marco Deluca, Roger Morrell: Failure analysis of a ceramic ball race bearing made of Y-TZP zirconia, *Engineering Failure Analysis* 36 (2014) 262-268.
- [18] Yen Y.C, Sartkulvanich, Altan T.: Finite Element Modeling of Roller Burnishing Process, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 01/2005.
- [19] Yesha Zheng, Joaquim Manuel Vieira, Filipe José Oliveira, Joao Paulo Davim, Pedro Brogueira: Relationship between flexural strength and surface roughness for hot-pressed Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> self-reinforced ceramics, *Journal of the European Ceramic Society* 20 (2000) 1345-1353.
- [20] Norma PN EN ISO 4287;1999 Specyfikacje geometrii wyrobów – struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa- Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [21] Norma PN EN ISO 4287;1999/A1:2010 Specyfikacje geometrii wyrobów – struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa- Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [22] Norma PN EN ISO 4287; 2011 Specyfikacje geometrii wyrobów – struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa- Zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni.
- [23] Norma PN-EN ISO 25178-2:20122010 Specyfikacje geometrii wyrobów – struktura geometryczna powierzchni: Przestrzenna - Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [24] Materiały promocyjne firmy CERAMIT [dostęp 20.II.2014]: „Własności tworzyw ceramicznych w porównaniu ze stalą stopową”. Dostęp w Internecie: <http://ceramit.pl/images/wlasnosci.pdf>
- [25] Miyoshi K.: Structures and Mechanical Properties of natural and synthetic diamonds, NASA/TM-!998-107247 [dostęp 20.II.2014r.]  
//archive.org/stream/nasa\_techdoc\_19980210770/19980210770#page/n0/mode/2up

## **CERAMIC BALLS AS BURNISHING ELEMENTS OF HARDENED STEEL SURFACE**

### **SUMMARY**

*Burnishing hardened materials is usually performed using diamond-tipped tools. In this process working tool sphere is relatively small due to its significant cost. This causes the burnishing parameters and in particular the feed rate must be very low that considerably prolongs the process. In addition, while burnishing with such a tool additional structures of irregularities associated with material burring are created. Ceramic materials are characterized by high hardness, and mass-production might lower their price. There are ceramic balls of high accuracy and low surface roughness available on the market place. A more detailed analysis of their properties could enable to determine the scope of their application. This paper includes the analysis of ceramic balls surface state regarding their geometrical structure in the context of the respective application of the sliding burnishing process*

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

