

## **OCENA STANU POWIERZCHNI KULEK CERAMICZNYCH PO NAGNIATANIU TOCZNYM STALI HARTOWANEJ Cf 53**

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

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

### **STRESZCZENIE**

*W artykule przedstawiono wyniki z badań eksperymentalnych dotyczących przydatności kulek wykonanych z ceramiki technicznej, do nagniatania tocznego, narzędziami z dociskiem hydrostatycznym. W badaniach wykorzystano narzędzie umożliwiające wymianę kulek nagniatających. Badania wykonano poprzez nagniatanie wałków wykonanych ze stali Cf53 w stanie utwardzonym (zahartowanym). Wyniki badań obejmują charakterystyki stanu powierzchni kulek z ceramiki  $Si_3N_4$  i  $ZrO_2$  przed i po nagniataniu oraz efektów obróbki w postaci opisu stanu powierzchni w tym powstających wad w postaci przytarć i zatarć na powierzchni wałków.*

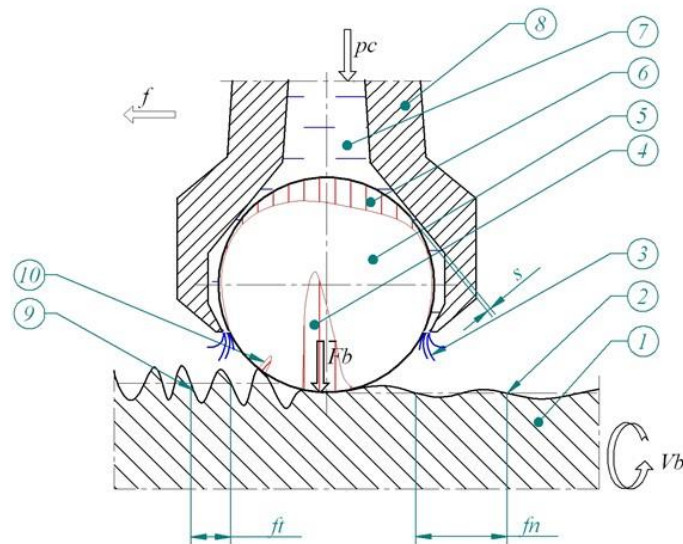
**Słowa kluczowe: nagniatanie, chropowatość powierzchni, parametry nagniatania, narzędzia z dociskiem hydrostatycznym**

### **1. WPROWADZENIE**

Nagniatanie jest obróbką wykończeniową polegającą na plastycznym odkształceniu powierzchni oddziaływania elementów roboczych narzędzia nagniatającego [14]. Wynikiem jej jest zmiana (zmniejszenie nierówności) struktury geometrycznej powierzchni oraz umocnienie powierzchniowe materiału. W przypadku materiałów nieutwardzonych odkształcenia plastyczne charakteryzuje się tym, że w wyniku docisku i posuwu narzędzia oddziaływanie elementu nagniatającego powoduje odkształcenia plastyczne wypełniające nierówności oraz przemieszczające nadmiar materiału nagniatanego wzdłuż powierzchni obrabianej. W przypadku materiałów twardych zakres odkształceń jest mniejszy i nie występuje przemieszczenie materiału, natomiast deformacja powierzchni następuje poprzez poślizgi materiału na płaszczyznach krystalograficznych. Sam proces odkształcenia jest skomplikowanym zjawiskiem zależnym od wielu czynników i parametrów obróbki w tym: od materiału obrabianego oraz rodzaju nagniatania (tocznego bądź ślizgowego). W procesie nagniatania występują również zjawiska tarcia. Efekty tarcia mogą doprowadzić do przyspieszonego zużycia bądź uszkodzenia elementów roboczych w narzędziach nagniatających. W wielu metodach nagniatania przebieg procesu tarcia ma odmienny charakter. Wpływ na to mają m.in. zarówno stan fizyko-chemiczny materiałów nagniatających i obrabianych, struktura geometryczna ich powierzchni [1, 2, 3, 6, 12] udział środka smarnego i jego właściwości trybologicznych, parametry obróbkowe oraz zastosowana kinematyka samego nagniatania [11, 14, 18]. Powszechnie stosowanymi odmianami kinematycznymi nagniatania hartowanych stali jest nagniatanie ślizgowe (nagniatanie elementem diamentowym) [5, 10] i nagniatanie toczne [7, 9, 16]. Obecnie dąży się aby w procesie nagniatania występujące w nim tarcie wywoływało jak najmniej niekorzystnych efektów,

a w szczególności minimalizacji energii cieplnej powstającej w wyniku obróbki. Wielkość powstającej energii cieplnej jest dużo mniejsza w wyniku tarcia tocznego w stosunku do ślizgowego. W procesie tarcia tocznego mogą występować podobne elementarne zjawiska tarcia jak w obróbce ślizgowej. Niemniej jednak nagniatanie toczne jaki i sam proces tarcia tocznego jest odmienny. Literatura [15] szeroko opisuje zjawisko tarcia tocznego w szczególności poślizgi w poszczególnych strefach nominalnych a także działanie smaru w tym obszarze.

Obecnie osiągnięcia inżynierii materiałowej pozwalają na zastąpienie elementów „nietocznych” – diamentowych, elementami nagniatającymi tocznymi, których właściwości spełniają wymagania obciążeniowe występujące w tym procesie. W konstrukcjach nagniataków zaczęto stosować nowe twarde materiały m.in. ceramikę techniczną. Zastosowanie tych materiałów na elementy toczne nagniatające hartowanych stali wymaga odpowiedniego łożyskowania [8, 9, 13, 17]. Wynika to przede wszystkim z używanych dużych sił podczas nagniatania hartowanych stali, które przy braku dobrego łożyskowania, mogą wprowadzać dodatkowe zakłócenia w procesie obróbki i wpływać na zużycie się elementów nagniatających. W celu eliminacji występującego niekorzystnego tarcia suchego i granicznego, stosuje się łożyskowanie hydrostatyczne (tarcie płynne) pomiędzy oprawą a elementem nagniatającym [4, 8, 9, 17]. Na rysunku 1 pokazano schemat nagniatania z dociskiem hydrostatycznym. Ze względu na budowę łożyska zastosowany jest jako element nagniatający (1) kulka. Na przedstawionym schemacie możemy przedstawić czynniki mogące mieć wpływ na zużycie pracującej kulki ceramicznej podczas nagniatania tocznego. W pierwszej kolejności są to naprężenia działające na kulkę. Przedstawiony rozkład naprężeń (6) na rys. 1 wynika z równoważenia działającej siły nacisku ciśnienia podawanego oleju hydrostatycznego. Natomiast naprężenia działające wypadkowo w przeciwnym kierunku istotne ze względu na zużycie kulki powstają w miejscu kontaktu kulki z materiałem obrabianym (4) i (10) rys. 1.



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 między nierównościami po toczeniu,  $f_n$  - odstępy między 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 [17]

Wzrost siły wypadkowej na poszczególnych wierzchołkach nierówności w strefie kontaktu może przyczynić się do przekroczenia lokalnych naprężeń krytycznych uszkadzających powierzchnię kulki ceramicznej. Rezultatem mogą być przytarcia, wykruszenia oraz spękania powierzchni ceramicznej [17]. Ponadto gwałtowne wejście narzędzia w strefę pracy wywołuje chwilowe zaburzenia ciśnienia w systemie hydraulicznym, co może spowodować zanik filmu olejowego (s) i przytarcie się kulki w gnieździe narzędzia.

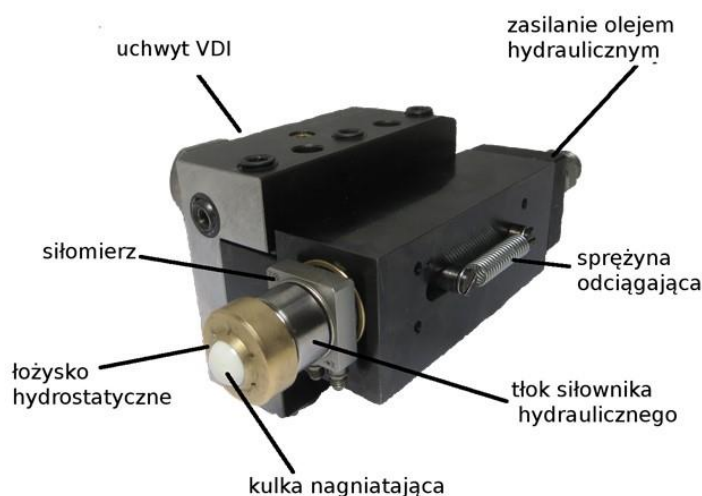
## 2. REALIZACJA BADAŃ

Badania przeprowadzono na tokarce CNC Razmer 2M-5-21/11. W celu realizacji obróbki przygotowano specjalne narzędzie do nagniatania z dociskiem hydraulicznym i łożyskowaniem hydrostatycznym kulki. Elementami nagniatającymi były ceramiczne kulki łożyskowe o średnicy  $\phi 1/2''$  wykonane z azotku krzemu  $Si_3N_4$  i tlenku cyrkonu  $ZrO_2$ . Na podstawie wstępnej analizy właściwości fizyko-chemicznych tych kulek można zauważyć, że nie ma pomiędzy nimi istotnych różnic. Podobna może być twardość ( $Si_3N_4$  1500÷1800HV,  $ZrO_2$  1200HV), wytrzymałość na ściskanie ( $800^\circ C$ ) w granicach 1,2-5,2 czy też odporność na pękanie kruche 1,8-6,5 MPa  $m^{1/2}$ .

Konstrukcje i sposób mocowania w uchwycie tokarki narzędzia nagniatającego przedstawiono odpowiednio na rys. 2 i 3. W badaniach zastosowano agregat wytwarzający ciśnienie do 400 bar. Jako medium zastosowano emulsję wody i oleju Hysol R (o zawartości 8%). Badania nagniataniem realizowano dla ustalonych ciśnień na agregacie hydraulicznym 300 i 400 bar.

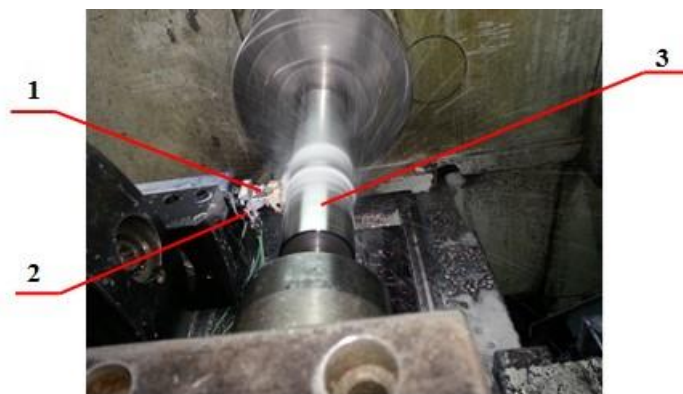
Nagniataniu poddano wałki po toczeniu na twardo płytką CBN (WNGA 080408 WZ- LS TB 650,  $ap=0,1mm$ ,  $vc=150m/min$ ,  $f=0,15mm$ ) o średnicy  $\phi 50$  mm i długości 245 mm oraz chropowatości powierzchni  $Ra = 0,9 \mu m$  wykonanych ze stali Cf 53 (C53), której twardość po zahartowaniu wynosiła  $62\pm 2HRC$ . Charakterystykę SGP powierzchni przedstawiono na rys. 4 natomiast parametry powierzchni po toczeniu zawarto w tab. 1.

W procesie nagniatania w celu pomiaru sił posłużono się zamontowanym w narzędziu nagniatającym siłomierzem firmy Kistler. Maksymalne siła docisku narzędzia  $P_x$  podczas nagniatania pomierzona w osi x wynosiła ok. 1600N dla wytwarzanego ciśnienia na agregacie 400 bar. Proces nagniatania dla obydwu kulek zrealizowano dla wartości posuwu nagniatania  $f_n = 0,1$  mm/obr i prędkości nagniatania  $v_n = 150m/min$  na odcinkach o długości 50 mm.

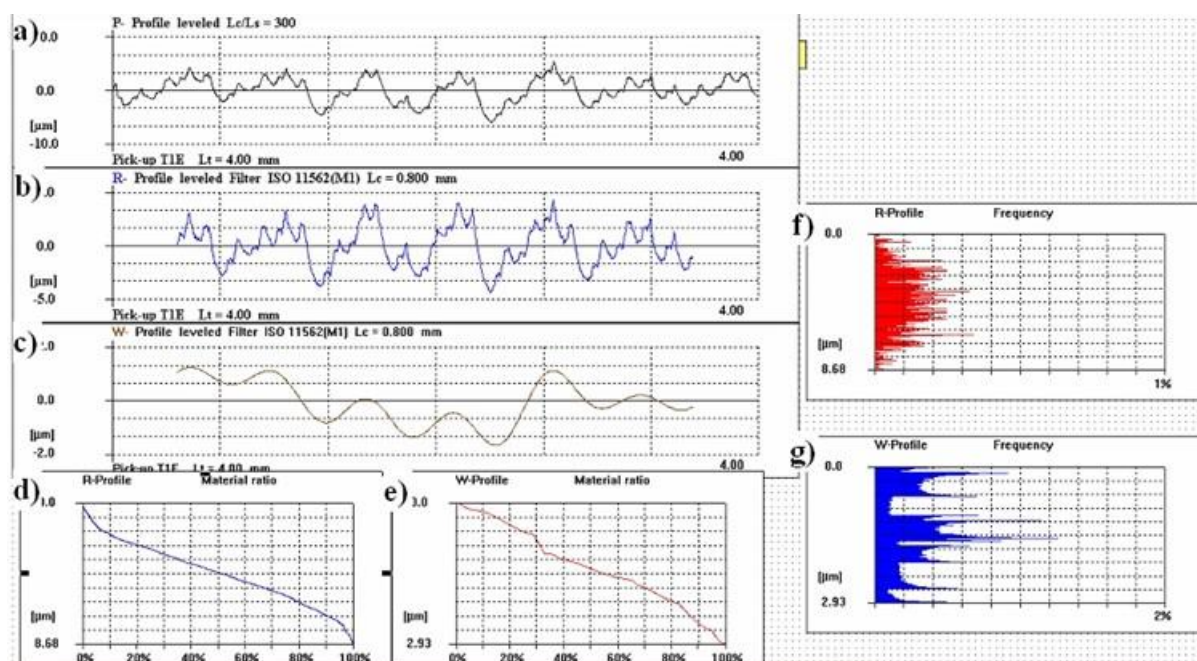


Rys. 2. Narzędzie do nagniatania z dociskiem hydrostatycznym





Rys. 3. Nagniatanie z dociskiem hydrostatycznym próbki ze stali Cf53 po hartowaniu na tokarce CNC:  
1- narzędzie nagniatające, 2- czujnik siły, 3- wałek – próbka ze stali Cf53 po hartowaniu



Rys. 4. Charakterystyka powierzchni po toczeniu: a) profil rzeczywisty; b) profil chropowatości; c) profil falistości; d) krzywa udziału materiałowego chropowatości; e) krzywa udziału materiałowego falistości; f) krzywa gęstości amplitudowej chropowatości; g) krzywa gęstości amplitudowej falistości

Tabela 1. Wartości parametrów powierzchni po toczeniu

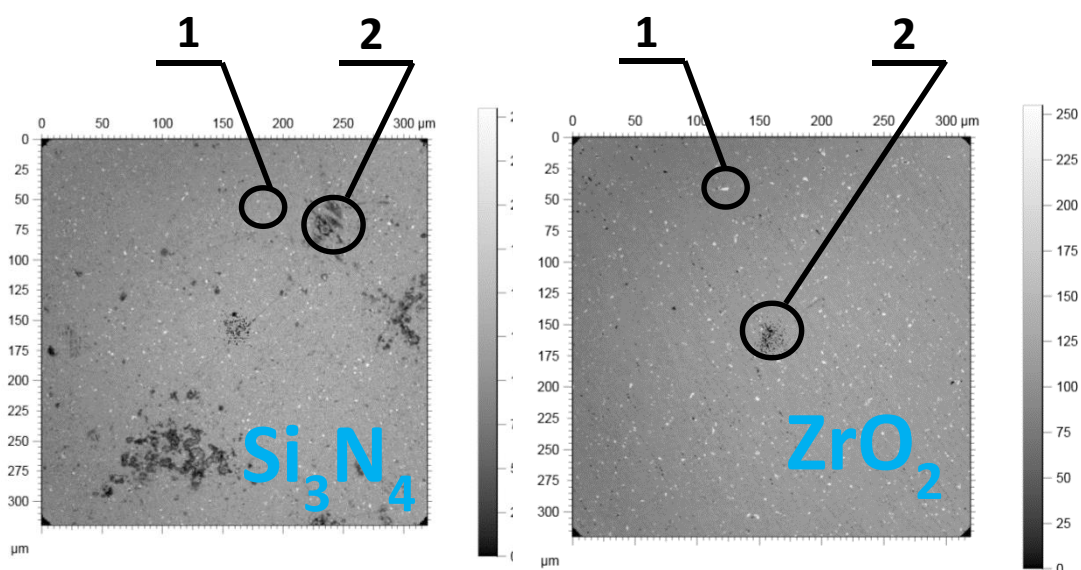
Nazwa parametru	Jednostki	Wartość
<i>Ra</i>	μm	1,30
<i>Rq</i>	μm	1,62
<i>Rt</i>	μm	8,58
<i>Rp</i>	μm	1,30
<i>Rv</i>	μm	2,15
<i>Wa</i>	μm	0,56
<i>Wz</i>	μm	1,43



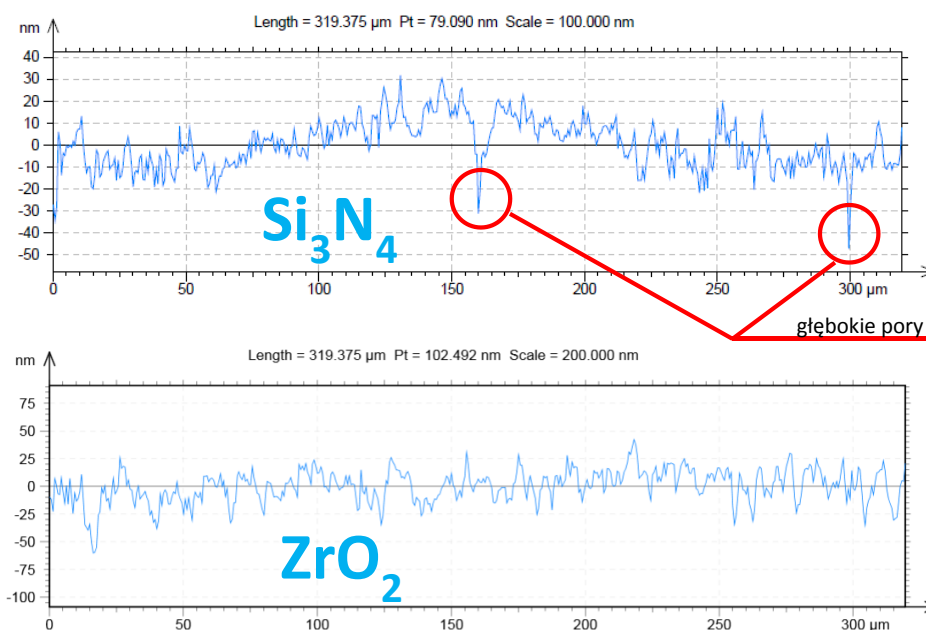
Badania struktury powierzchni przeprowadzono na mikroskopie konfokalnym „ $\mu$ surf explorer” firmy Nanofocus AG, natomiast fotografie powierzchni wykonano na mikroskopie optycznym Olympus SZX10.

### 3. WYNIKI BADAŃ

Na rysunku 5 przedstawiono fotografie powierzchni kulek ceramicznych  $\text{Si}_3\text{N}_4$  i  $\text{ZrO}_2$  i można zauważyć, że ceramika obu kulek  $\text{Si}_3\text{N}_4$  i  $\text{ZrO}_2$  posiada pory. Na tym rysunku oznaczono (1) wzniesienia oraz wgłębienia (2). Rysunek 6 przedstawia strukturę powierzchni kulek przedstawioną za pomocą profilogramów. Można na nich zauważyć, że struktura powierzchni jest regularna a nierówności powierzchni są bardzo małe i nie przekraczają wysokości  $0,07\mu\text{m}$ . Wartości parametrów powierzchni przedstawia tab. 2 dla układu profilowego i tab. 3 dla układu przestrzennego.



Rys. 5. Fotografie powierzchni kulek ceramicznych: 1- wzniesienia, 2- wgłębienia (pory)



Rys. 6. Profile chropowatości powierzchni badanych kulek  $\text{Si}_3\text{N}_4$  i  $\text{ZrO}_2$

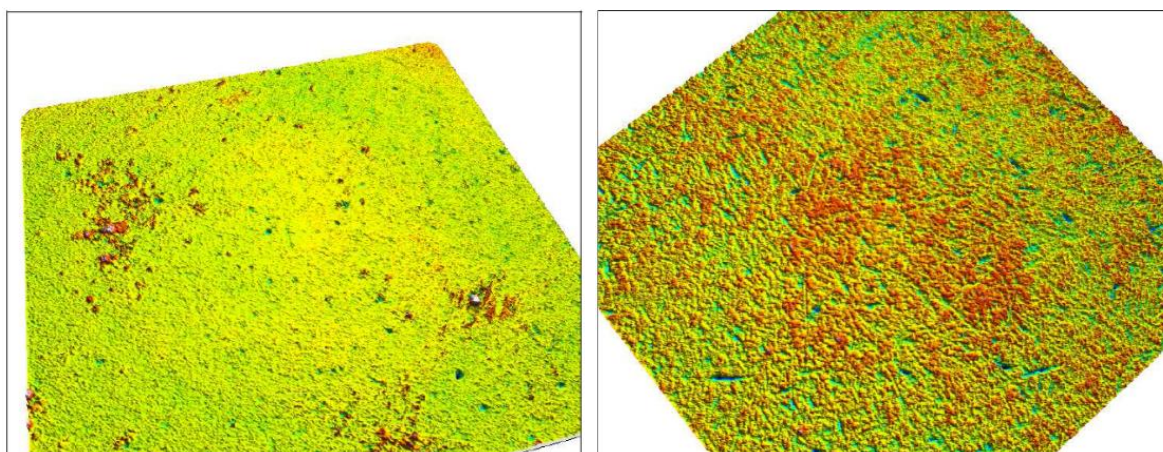
Tabela 2. Ocena wybranych parametrów chropowatości 2D dla kulek z ceramiki Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> i ZrO<sub>2</sub>

Parametr oceny wg ISO 4287	Wartości parametrów dla kulek z ceramiki Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Wartości parametrów dla kulek z ceramiki ZrO <sub>2</sub>
<b>Ra</b>	5,734 nm	10,379 nm
<b>Rz</b>	51,699 nm	69,455 nm
<b>Rt</b>	68,548 nm	86,356 nm
<b>Rp</b>	19,013 nm	31,861 nm
<b>Rv</b>	32,687 nm	37,594 nm
<b>Rc</b>	16,769 nm	29,690 nm
<b>Rq</b>	7,822 nm	13,280 nm
<b>Rsk</b>	-0,624	-0,263
<b>Rku</b>	6,038	3,378

Tabela 3. Ocena wybranych parametrów chropowatości 3D dla kulek z ceramiki Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> i ZrO<sub>2</sub>

Parametr oceny wg ISO 25178	Wartości parametrów dla kulek z ceramiki Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	Wartości parametrów dla kulek z ceramiki ZrO <sub>2</sub>
<b>Sa</b>	0,009 μm	0,013 μm
<b>Sp</b>	0,312 μm	0,222 μm
<b>Sq</b>	0,012 μm	0,017 μm
<b>Ssk</b>	-2,492	-0,545
<b>Sku</b>	51,167	6,350
<b>Sv</b>	0,291 μm	0,210 μm
<b>Sz</b>	0,603 μm	0,432 μm

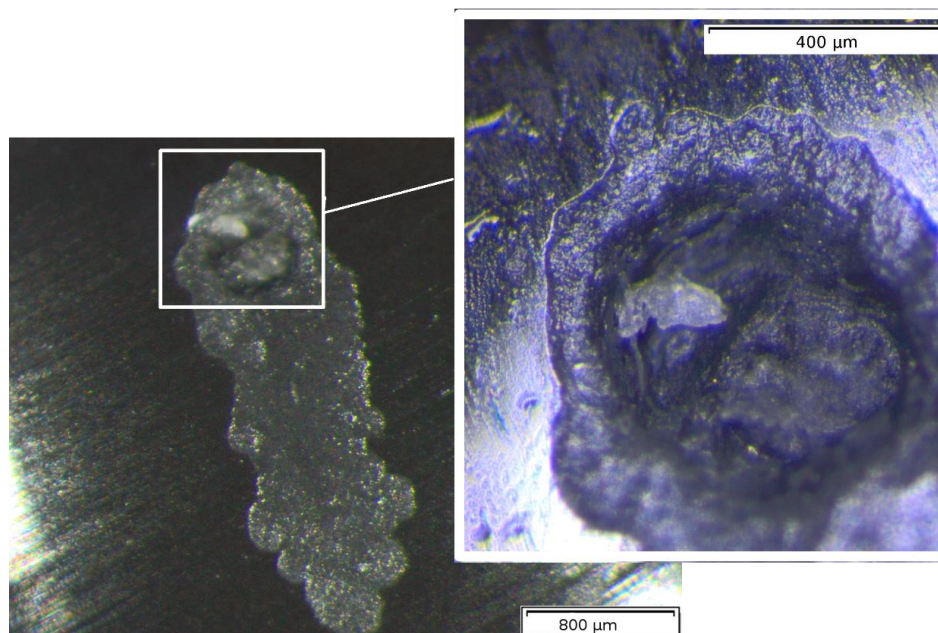
Strukturę powierzchni kulek ceramicznych przedstawiono na rys. 7 powierzchnie te nie wykazują dużych porów. W ujęciu makro powierzchnia kulek jest błyszcząca (odbijająca światło).



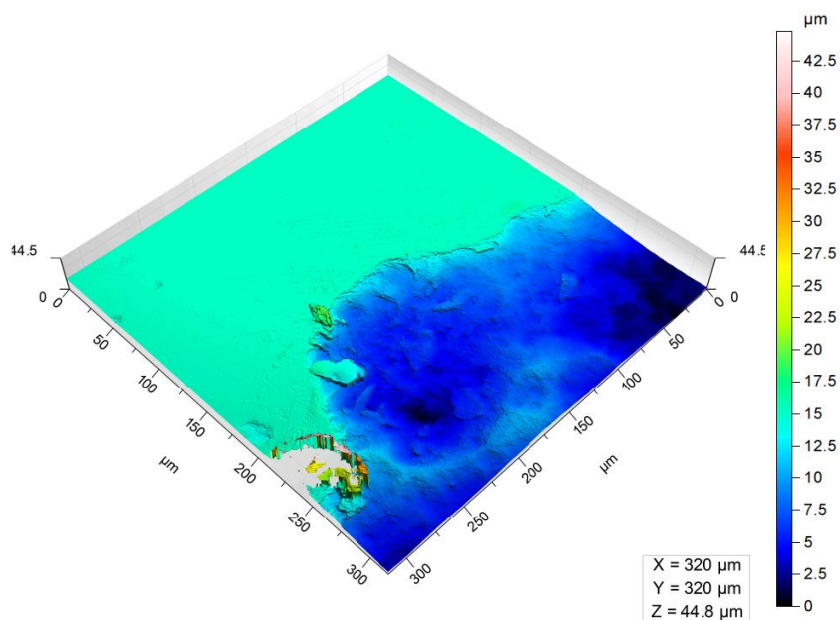
Rys. 7. Fotografie powierzchni kulek ceramicznych Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> i ZrO<sub>2</sub> w układzie 3D wykonane na mikroskopie konfokalnym (300x300 μm)

Rysunek 8 przedstawia stan powierzchni kulki, którą zdemontowano z narzędzia nagniatającego. Na powierzchni tej kulki zauważono wykruszenie, które jest skutkiem oddziaływania na powierzchnię dużych sił podczas kontaktu z materiałem obrabianym. Ubytek na powierzchni kulki ma podłużny kształt przy czym z jednej strony występuje w nim

dodatkowa wada, którą powiększono na rys. 8. Można przypuszczać, że tego rodzaju ubytek w powierzchni mógł być spowodowany wadą materiałową występującej w materiale kulki. Przyczynę tę może potwierdzać fakt, iż wykruszenie wystąpiło tylko w jednym miejscu kulki. Tego rodzaju ubytki na powierzchni kulek powodują dodatkowy wypływ cieczy z łożyska hydrostatycznego, co powoduje, że kulka dodatkowo zaciera się w gnieździe narzędzia.



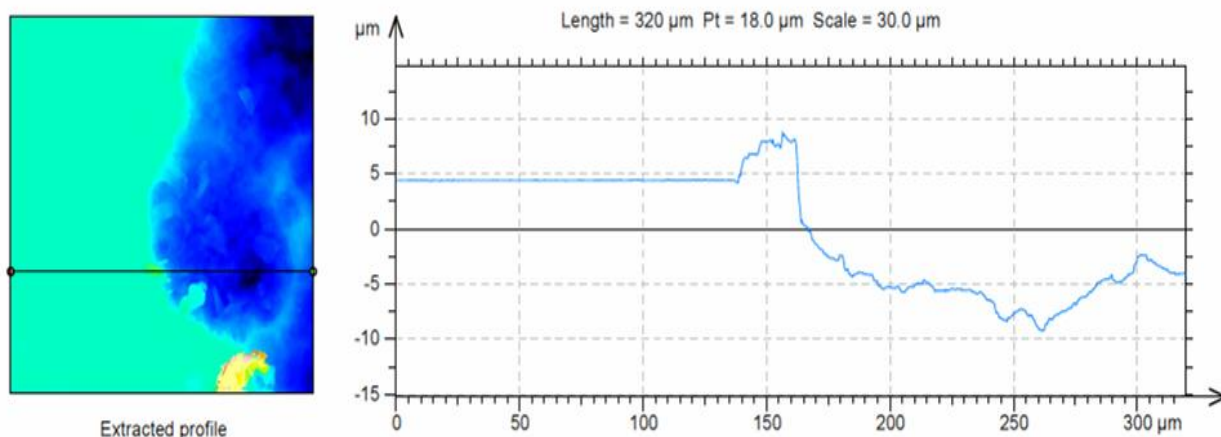
Rys. 8. Fotografia wykruszenia na powierzchni kulki ceramicznej  $\text{Si}_3\text{N}_4$



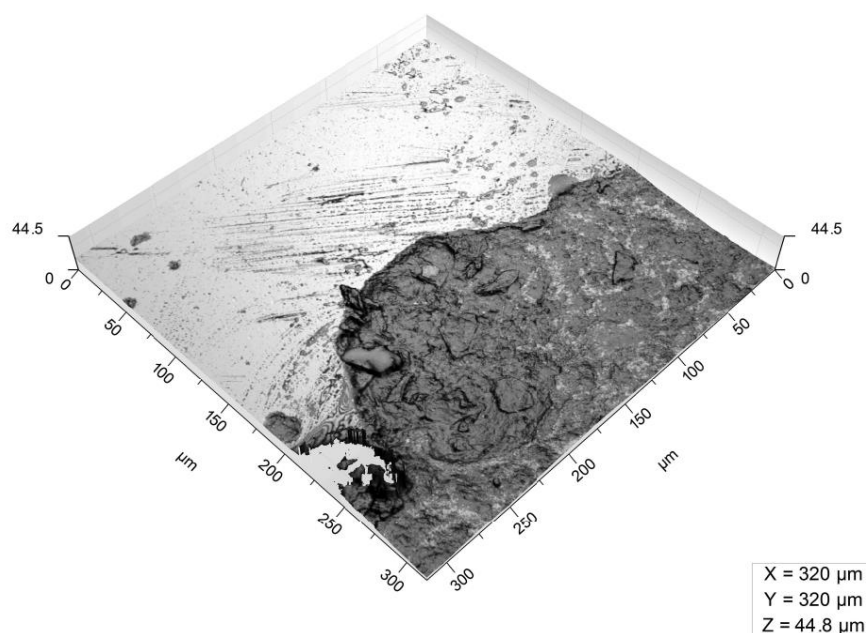
Rys. 9. Wykruszenie na powierzchni kulki ceramicznej  $\text{Si}_3\text{N}_4$

Na rysunku 9 przedstawiono strukturę 3D miejsca wykruszenia na powierzchni kulki. Interesującym elementem jest profil (rys. 10), który na krawędzi wykruszenia przy powierzchni wykazuje powstanie wzniesienia. Tego rodzaju zmiany w strukturze ceramiki nie powinny występować, więc możliwe jest że struktura ceramiki w tym miejscu została zanieczyszczona innym materiałem, co wyjaśniałoby powstawanie tego rodzaju struktur powierzchni.





Rys. 10. Profil wykruszenia na powierzchni kulki ceramicznej  $\text{Si}_3\text{N}_4$

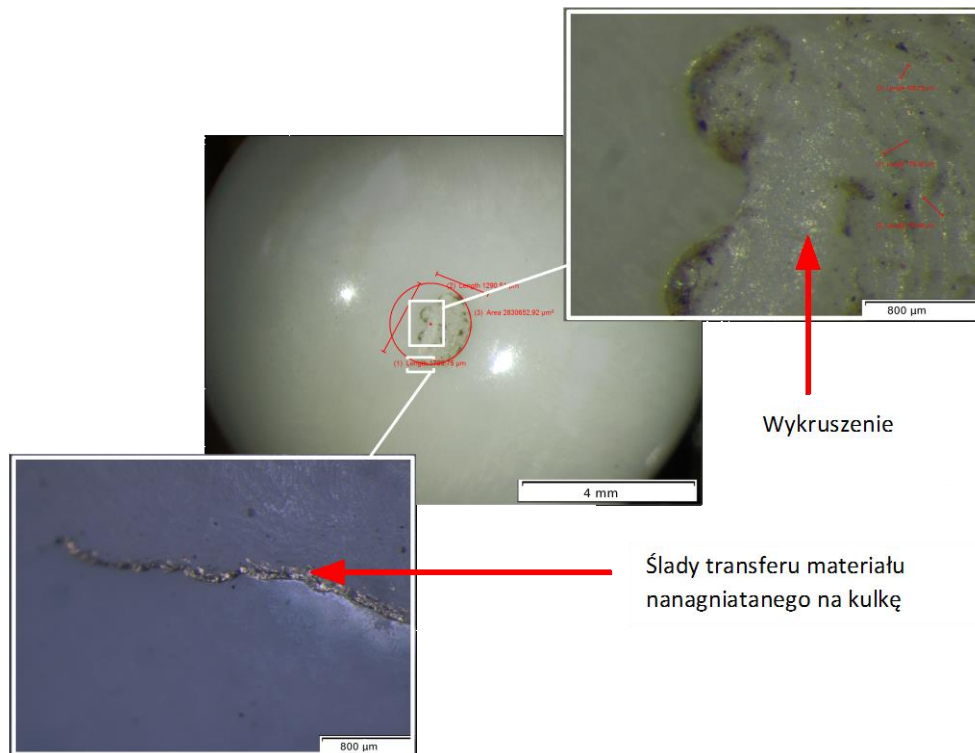


Rys. 11. Wykruszenie na powierzchni kulki ceramicznej  $\text{Si}_3\text{N}_4$

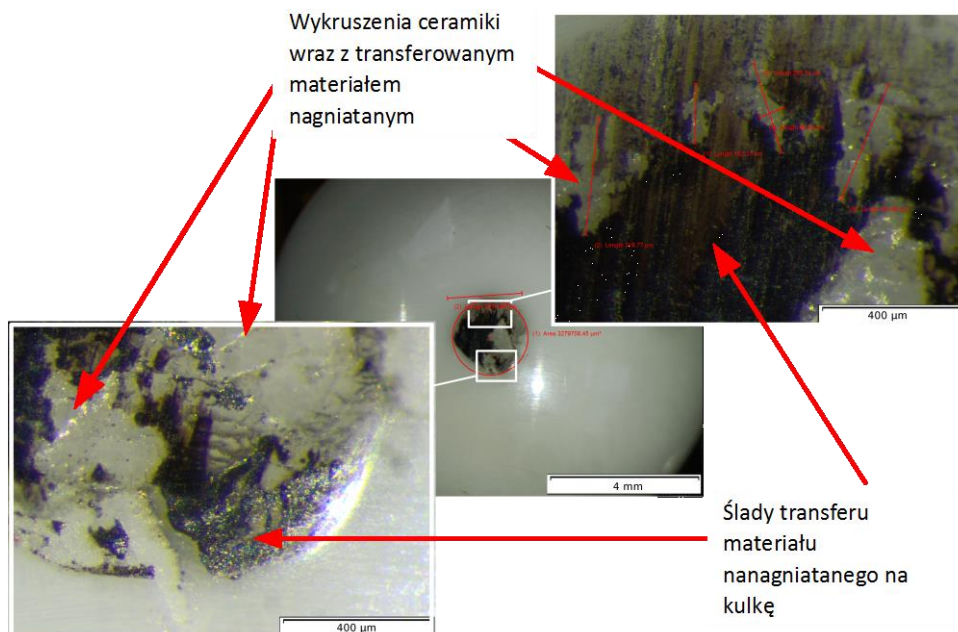
Rysunek 11 przedstawia fotografię wykruszenia powierzchni wykonaną za pomocą mikroskopu konfokalnego. Można na niej zauważyć niewielkie rysy na powierzchni kulki powstałe w trakcie procesu nagniatania jak i strukturę powierzchni po wykruszeniu, która sugeruje niejednorodność w strukturze materiału kulki.

Na rysunku 12 przedstawiono powierzchnię kulki wykonanej ceramiki  $\text{ZrO}_2$ . Na tym rysunku widoczne są rozległe wykruszenia powierzchni. Wykruszenia te są znacznie większe niż dla kulek z ceramiki  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Potwierdza to, iż kulka ta ma małą odporność na miejscowe obciążenia udarowe. Innym zjawiskiem, które wystąpiło na jej powierzchni jest transfer materiału z powierzchni nagniatanej na powierzchnię kulki.



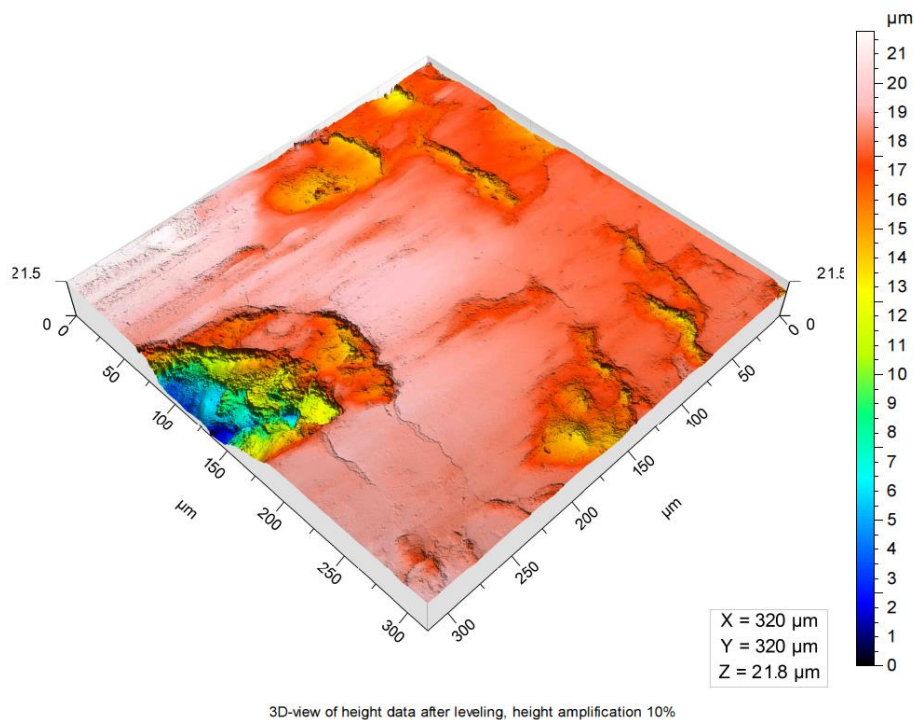


Rys. 12. Wykruszenie na powierzchni kulki ceramicznej  $ZrO_2$

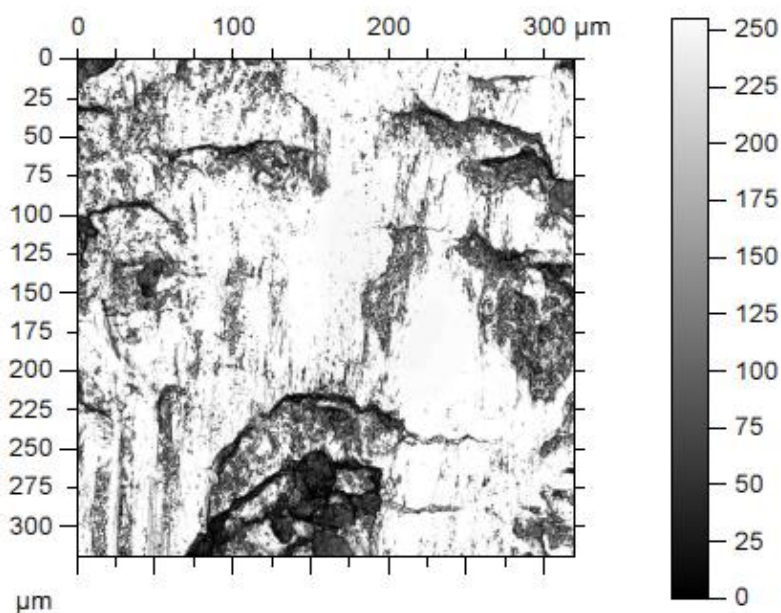


Rys. 13. Wykruszenia na zatartej powierzchni kulki  $ZrO_2$

Ślady transferowanego materiału obrabianego na powierzchnię kulki nagniatanej widoczne są na rysunku 12 i 13. Rysunek 13 przedstawia miejsca z transferowanym materiałem nagniatanym podobne są do śladów po nagniataniu ślizgowym. W trakcie procesu nagniatania prawdopodobnie dochodziło do zatrzymań ruchu kulki, które spowodowały utratę poduszki hydrostatycznej poprzez dodatkowy wypływ cieczy przez miejsca wykruszeń.

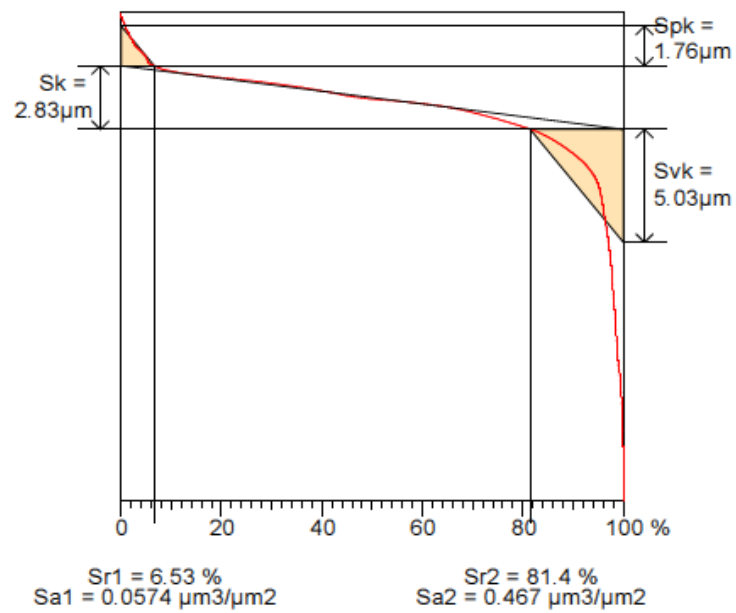


Rys. 14. Wykruszenia na zatartej powierzchni kulki  $ZrO_2$

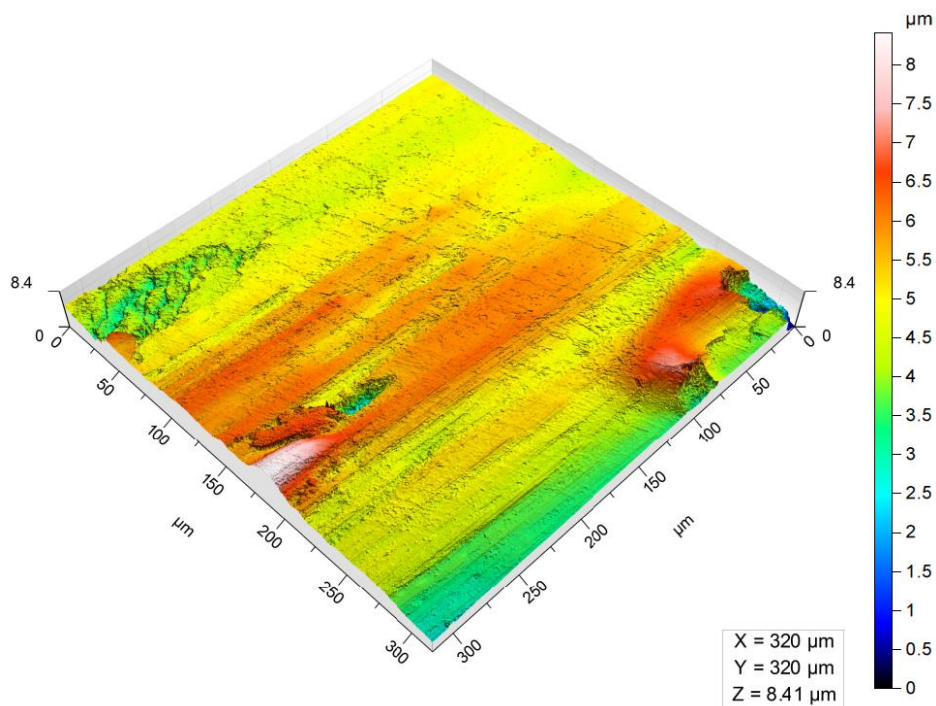


Rys. 15. Struktura wykruszeń kulki  $ZrO_2$

Struktura wykruszeń powierzchni kulki ceramicznej  $ZrO_2$  przedstawiona na rys. 14 i 15 wskazuje na małą odporność materiału do pracy w warunkach obciążenia występującego podczas nagniatania. Mimo, że ceramika ta ma bardzo wysoką twardość, co przedstawiono na wstępie, to inne jej właściwości, tj. struktura materiału i odporność na obciążenie udarowe powodują, że nie jest to odpowiedni materiał do nagniatania stali hartowanej.



Rys. 16. Struktura udziału materiałowego kulki  $ZrO_2$  po nagniatniu

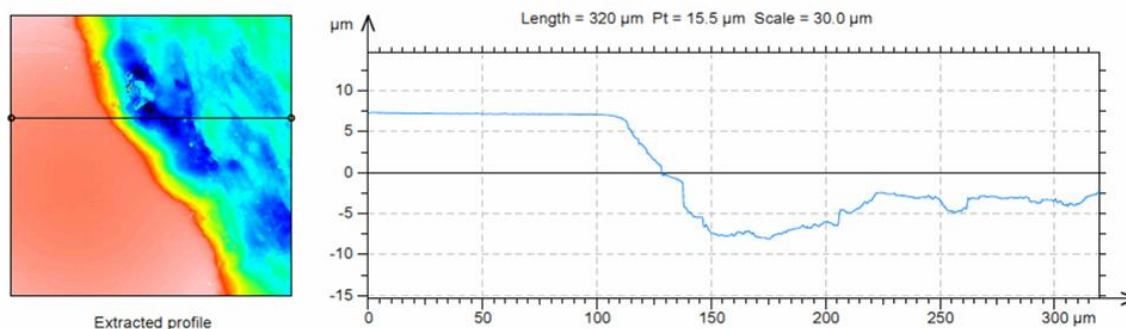


Rys. 17. Wykruszenia na zatartej powierzchni kulki  $ZrO_2$

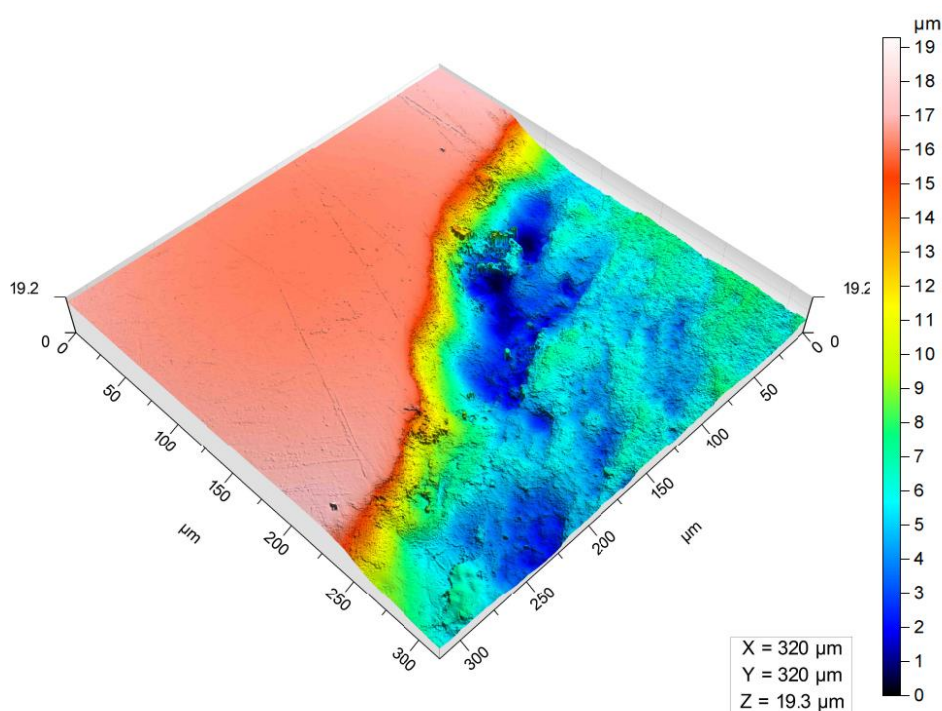
Na rysunku 16 przedstawiono strukturę udziału materiałowego kuli ceramicznej, którą wykonywano proces nagniatania. Na rysunku tym można zauważyć że w skutek wykruszeń powstają znaczne wgłębienia na jej powierzchni.

Struktura powierzchni kuli ceramicznej  $ZrO_2$  poza strefą głównych śladów pracy została przedstawiona na rys. 17. W tych miejscach również pozostają niewielkie ślady zużycia kuli.





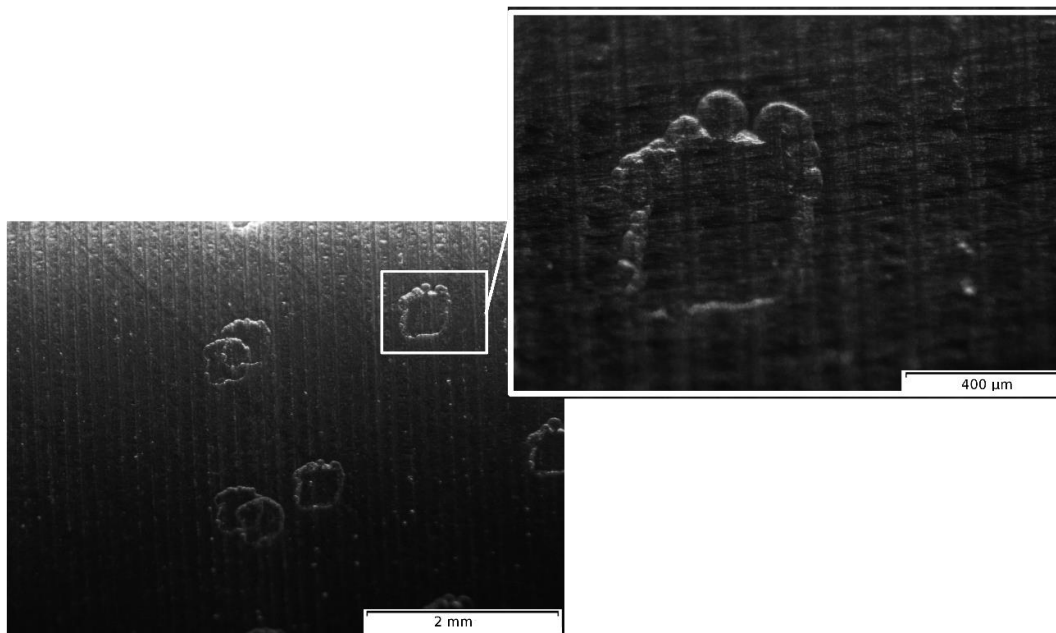
Rys. 18. Widok powierzchni na krawędzi wykruszenia kulki  $ZrO_2$



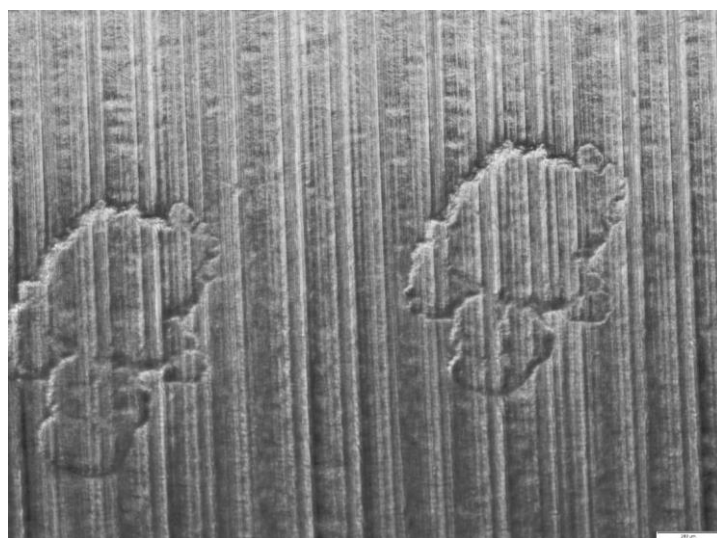
Rys. 19. Profil wykruszenia – kulka ceramiczna  $ZrO_2$

Na rysunku 18 przedstawiono strukturę powierzchni kulki na krawędzi wykruszenia. Profil tego miejsca przedstawiony na rys. 19 nie wykazuje wzniesienia w porównaniu do kulki  $Si_3N_4$ .

Strukturę powierzchni nagniataną kulką ceramiczną  $ZrO_2$  przedstawiono na rys. 20. Na tej powierzchni widoczne są ślady wykruszenia powierzchni kulki nagniatającej, które stanowią powtarzający się wzór odbity na powierzchni. Z odbitego wzoru (rys. 21) można wnioskować, że miejsce wykruszenia składa się z wielu małych „odłupań” powierzchni i tworzy nieregularny obrys.

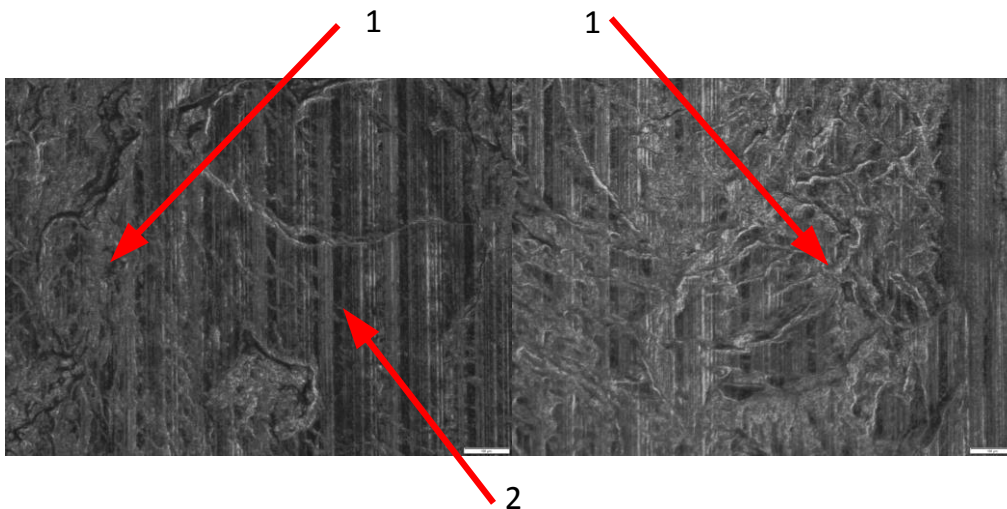


Rys. 20. Powierzchnia wałka ze stali hartowanej Cf53(C53) o twardości 64HRC z widocznymi śladami odbicia wykuszającej się kulki  $ZrO_2$  (300bar)



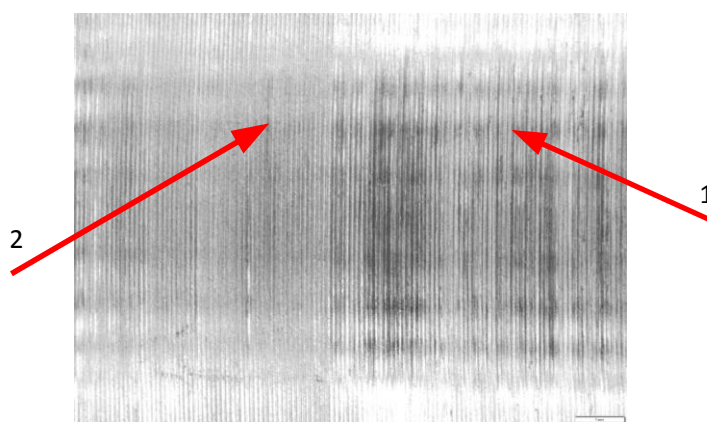
Rys. 21. Powierzchnia wałka ze stali hartowanej Cf53 (64HRC): 1- odbicia wykuszającej się kulki  $ZrO_2$  podczas nagniatania z ciśnieniem 400 bar

Na rysunku 22 przedstawiono strukturę powierzchni elementu nagniatanego kulką ceramiczną  $Si_3N_4$  na której uszkodzenia kulki wielokrotnie się odbiły tworząc specyficzną strukturę powierzchni.



Rys. 22. Powierzchnia wałka ze stali hartowanej Cf53 (C53) o twardości 64HRC: 1- odbicia wykruszającej się kulki Si3N4 podczas nagniatania z ciśnieniem 400 bar, 2- powierzchnia nagniatana

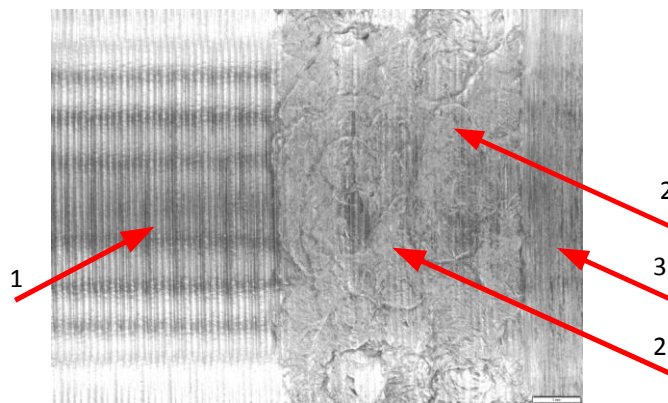
Podobnie wygląda struktura powierzchni po nagniataniu kulką ZrO<sub>2</sub>. Wykruszenia na powierzchni kulki powodują powstawanie dodatkowych nierówności powierzchni elementu nagniatanego. Rysunek 23 przedstawia porównanie powierzchni toczonej i nagniatanej zatartą kulką ZrO<sub>2</sub>. Zatarta kulka zablokowała się w gnieździe narzędzia, co spowodowało nagniatanie ślizgowe.



Rys. 23. Wałek – stal hartowana Cf53 (64HRC): 1- przypalenia powierzchni spowodowane zatarciem się kulki (ZrO<sub>2</sub>) ciśnienie na agregacie nagniatającym 400 bar, 2- powierzchnia po toczeniu

Natomiast zablokowanie się kulki w gnieździe narzędzia nagniatającego powoduje nagniatanie ślizgowe powierzchni, którego rezultaty przedstawiono na rys. 24. W tym przypadku duża siła nagniatania i twardy materiał powodują przypalenia na powierzchni nagniatanej, co przedstawia (1) na rys 24.





Rys. 24. Wałek – stal hartowana Cf53 (64HRC): 1- przypalenia na powierzchni od poślizgu kulki  $\text{Si}_3\text{N}_4$  - ciśnienie na agregacie nagniatającym 400 bar, 2- powierzchnia nagnieciona, 3- powierzchnia z zatarciami

#### 4. WNIOSKI

W wyniku przeprowadzonych badań można sformułować następujące uwagi i spostrzeżenia:

- Podczas nagniatania tocznego stali hartowanej dociskiem hydrostatycznym na powierzchni kulki występują znaczne naciski miejscowe, które mają charakter udarowy wywołują pękanie powierzchniowe kulek ceramicznych  $\text{ZrO}_2$ . W procesie nagniatania tocznego kulki ceramiczne  $\text{Si}_3\text{N}_4$  wykazują większą trwałość.
- Porównując powierzchnie kulek po nagniataniu tocznym z  $\text{ZrO}_2$  i z  $\text{Si}_3\text{N}_4$  zauważono, że na kulce ceramicznej  $\text{Si}_3\text{N}_4$  było tylko jedno wykruszenie (które mogło być spowodowane wadą wewnętrzną materiału kulki). Natomiast na powierzchni kulek z  $\text{ZrO}_2$  zauważono występowanie siatki pęknięć i znaczne wykruszenia powierzchni. Z kolei, w przypadku nagniatania kulką  $\text{ZrO}_2$ , powierzchnia kulki wykazywała tendencje pokrywania się materiałem nagniatanym.
- Stwierdzono powielanie się pęknięć i wykruszeń na strukturze nagniatanych powierzchni wałków.

#### LITERATURA

- [1] Dobrzyński M., Przybylski W., Waszczur P.: Ocena parametrów chropowatości powierzchni toczonych otworów w kołach zębatych obrabianych nagniataniem, Tribologia: tarcie, zużycie, smarowanie, Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich, 2011, s. 61-68
- [2] Dzionk S., Ścibiorski B.: Abstract: Hardened steel surface waviness created by rolling burnishing process, The 9<sup>th</sup> International Conference Mechatronic Systems and Materials MSM-2013, Vilnius, Lithuania 2013, s. 57-58
- [3] Dzionk S., 2012, Surface waviness of components machined by burnishing method. Archives of Mechanical Technology and Automation Vol. 32 no 3, pp. 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] Galda L., Koszela W., Pawlus P.: Surface geometry of side bearings after percussive burnishing, Tribology International, Vol.40 Issue:10-12, December 2007, pp. 1516-1525

- [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*, Vol. 13, No. 2, pp. 46-58.
- [7] Grzesik W., Zak K., Prazmowski M.: Surface integrity of hard turned parts modified by ball burnishing, *Journal of Machine Engineering*, Vol. 12, No. 1, 2012, pp. 18-27
- [8] Grochała D., Sosnowski M.: Problemy technologii nagniatania powierzchni przestrzennych złożonych na centrach obróbkowych, *Miesięcznik naukowo – techniczny MECHANIK 1/2011* s.14-18
- [9] Klocke F., Libermann J., 1998, Roller Burnishing of Hard Turned Surfaces, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* Vol. 38, No 5-6, p. 419-423
- [10] Korzynski, M., Lubas, J., Swirad, S., Dudek, K.: Surface layer characteristics due to slide diamond burnishing with a cylindrical-ended tool, *Journal of Materials Processing Technology* 211, 2011, pp. 84–94
- [11] Kułakowska A., Patyk R.: Polioptymalizacja operacji nagniatania naporowo tocznego, *PAK* vol. 58, nr 10/2012
- [12] Neslusan M., Grzesik W., 2012, Analysis of surface roughness on bearing steel parts after cutting, superfinishing and burnishing operations, *Journal of Machine Engineering*, Vol. 12, No. 1, pp. 111-118.
- [13] Olszak W., Chmielewski K., Kwaczyński W., Grochała D.: Stabilizacja siły nagniatania powierzchni 3D narzędziem hydrostatycznym ze sprężystym miechem, *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*, tom 3, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2011, s. 9-17.
- [14] Przybylski W.: *Obróbka nagniataniem. Technologia i oprzyrządowanie*, WNT, Warszawa, 1979
- [15] Reynolds O.: On Rolling Friction, *Phil. Trans. Roy. Soc.*, 1876, Vol. 166, pp. 155
- [16] Ścibiorski B., Dzionk S: 2013, Abstract: Hardened steel surface roughness created by rolling burnishing process, *The 9<sup>th</sup> International Conference Mechatronic Systems and Materials MSM-2013*, Vilnius, Lithuania, s. 211-2012
- [17] Ścibiorski B.: Wybrane problemy nagniatania tocznego stali twardych ceramiką na tokarce CNC, *Inżynieria Maszyn*, R. 18, z. 2, 2013, s. 32-44
- [18] Zaborski A., 2011, Strefy kontaktu w procesie nagniatania, *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*, tom 3, Politechnika Gdańska, Gdańsk, s. 76-90

## **ASSESSMENT OF THE SURFACE OF THE CERAMIC BALLS USED IN ROLLING BURNISHING OF HARDENED STEEL CF53**

### ***SUMMARY***

*The article presents the results of experimental tests concerning the usability of technical ceramics for rolling burnishing with hydrostatic tool pressure. The tool enables the exchange of burnishing balls was used in the study that involved burnishing shafts made of hardened Cf53 steel. The research comprises the surface characteristics of balls made of Si3N4 and ZrO2 ceramics both before and after the burnishing as well as related technological effects in the form of surface state description including the defects in the sort of seizing on shafts surface.*

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

