

## **NAGNIATANIE ŚLIZGOWE STALI HARTOWANEJ Cf53 KULKAMI CERAMICZNYMI**

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

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

### **STRESZCZENIE**

*Ceramika techniczna dostępna na rynku a stosowana na ostrza skrawające mogłaby być używana również na elementy robocze narzędzi nagniatających. Duża twardość tych materiałów jest korzystna natomiast inne właściwości fizyczne w tym parametry struktury geometrycznej powierzchni powodują, że nie zawsze są właściwym materiałem na elementy robocze w procesie nagniatania materiałów hartowanych. W tym artykule przedstawiono wyniki badań nagniatania ślizgowego powierzchni stali hartowanej Cf53 kulkami ceramicznymi wykonanymi z różnych rodzajów ceramiki technicznej. Otrzymana struktura geometryczna powierzchni jak i stan kulek po procesie nagniatania opisano na podstawie dokumentacji fotograficznej.*

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

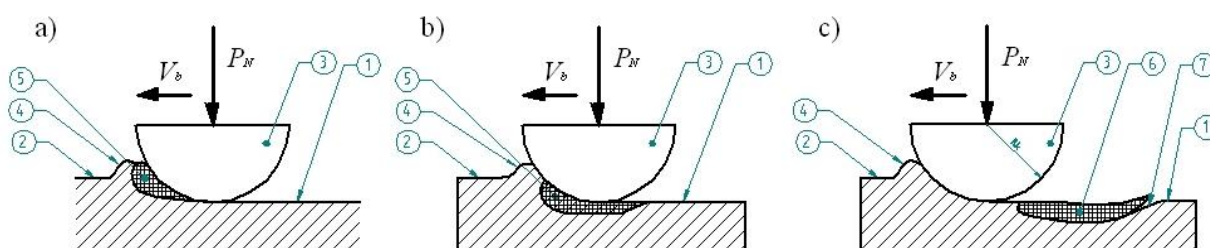
### **1. WPROWADZENIE**

Nagniatanie jako obróbka wykończeniowa jest powszechnie stosowana [2, 7, 9, 12]. Jest to obróbka bezodpadowa. Obecnie produkowane narzędzia umożliwiają jej stosowanie do wszystkich materiałów, które odkształcają się plastycznie (materiały miękkie) o twardości do ok. 65 HRC [8, 10, 14]. Obróbka ta umożliwia łączenie w jedną operację toczenia i nagniatania, co zwiększa produktywność i elastyczność produkcji ograniczając liczbę operacji technologicznych w procesie produkcyjnym. Jednym ze sposobów nagniatania jest nagniatanie ślizgowe [6, 15]. Jest ono zazwyczaj wykonywane nagniataniem z elementem diamentowym. Nagniatak taki oprócz wysokiej ceny ma też inne ograniczenia takie jak konieczność stosowania małych posuwów, co znacznie wydłuża czas obróbki. Wraz z rozwojem toczenia na twardo [3, 5, 13, 14] powstaje zapotrzebowanie na obróbkę wykończeniową, którą można by stosować na tokarce łącznie z toczeniem [4]. W takim przypadku potrzebne są również tanie narzędzia do nagniatania ślizgowego. Narzędzia z elementami roboczymi wykonanymi z ceramiki technicznej [1, 11] mogłyby być dobrym rozwiązaniem [3].

### **2. CHARAKTERYSTYKA NAGNIATANIA ŚLIZGOWEGO**

W wyniku nagniatania ślizgowego powierzchni stali hartowanej diamentem uzyskuje się zazwyczaj błyszczącą powierzchnię. Podczas tego procesu nie występuje zjawisko tworzenia się narostu na elemencie nagniatającym. Ceramika techniczna [19], mimo że, posiada dużą twardość i można na niej uzyskać niską chropowatość poprzez swoje właściwości i strukturę powierzchni nie zawsze nadaje się na elementy robocze w narzędziach nagniatających. W

przypadku ceramiki istotną cechą jest właściwość przywierania do powierzchni nagniatanej materiału z powierzchni obrabianej. Tworzenie się takiego narostu powoduje, że obszar odkształceń występuje na powierzchni narzędzia nagniatającego a przesuwa się w głąb materiału (przed elementem narostu). Powstający narost w skutek odkształceń materiału obrabianego może się też odrywać pozostawiając na powierzchni twarde struktury materiału, które to mogą się dodatkowo odłuszczać od powierzchni. Schemat wpasowywania w powierzchnię elementów narostu powstającego na narzędziu ceramicznym przedstawia rys. 1. Na tym rysunku przedstawiono schemat, w którym cały narost odrywa się jednocześnie, ale możliwe są też sytuacje odrywania się tylko części narostu, który w wyniku dalszego procesu nagniatania dalej się powiększa.



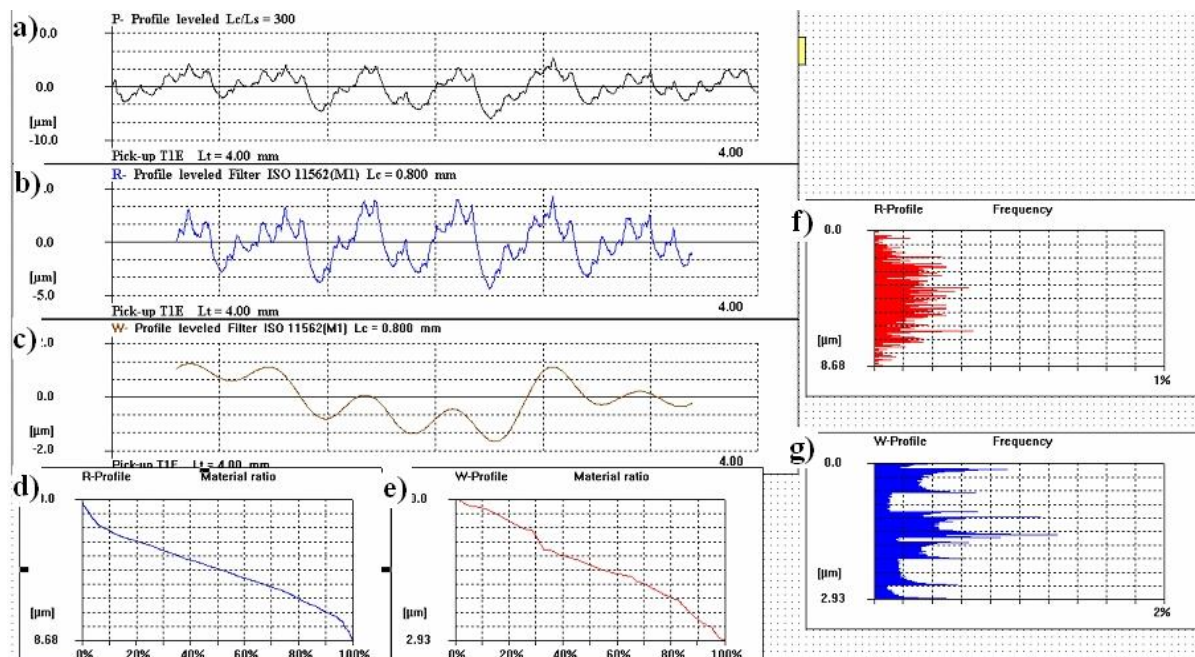
Rys. 1. Schemat powstawania i odrywania się narostu podczas nagniatania; a) powstający narost na narzędziu nagniatającym; b) odrywający się narost na powierzchni narzędzia nagniatającego; c) narost oderwany od narzędzia i wpasowany w powierzchnię obrabianą, 1- powierzchnia obrobiona, 2- powierzchnia obrabiana, 3- końcówka narzędzia, 4- spęczenie przed narzędziem, 5- narost na narzędziu, 6- materiał narostu wpasowany w powierzchnię, 7- miejsce odłuszczenia się powierzchni nagniatanej,  $R_k$ - promień narzędzia,  $P_N$ - siła normalna (nagniatająca),  $V_b$  prędkość nagniatania

### 3. BADANIA EKSPERYMENTALNE

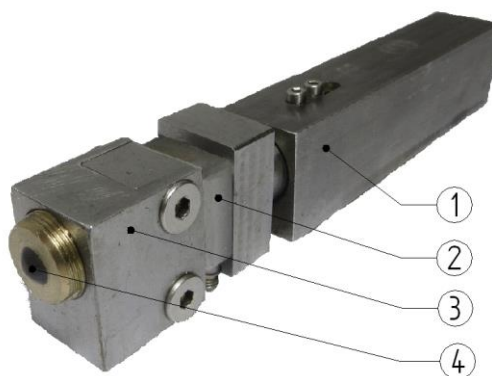
Badania wykonano na próbkach w postaci wałków  $\phi 50 \times 250$  wykonanych ze stali C53 (Cf53) i hartowanych powierzchniowo do twardości  $64 \pm 2\text{HRC}$ . Następnie wałki te toczono na twardo bez chłodzenia płytką CBN (WNGA 080408 WZ- LS TB 650). Parametry toczenia: głębokość  $a_p=0,1\text{mm}$ , prędkość toczenia  $V_c= 150\text{m/min}$ , posuw  $f=0,15\text{mm}$ . Charakterystykę struktury geometrycznej powierzchni przedstawiono na rys. 2. Wartości parametrów opisujących strukturę geometryczną powierzchni [16-18] po toczeniu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości parametrów powierzchni po toczeniu

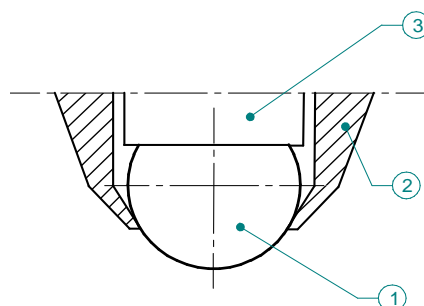
Nazwa parametru	Jednostki	Wartość
<b>Ra</b>	$\mu\text{m}$	1,30
<b>Rq</b>	$\mu\text{m}$	1,62
<b>Rt</b>	$\mu\text{m}$	8,58
<b>Rp</b>	$\mu\text{m}$	1,30
<b>Rv</b>	$\mu\text{m}$	2,15
<b>Wa</b>	$\mu\text{m}$	0,56
<b>Wz</b>	$\mu\text{m}$	1,43



Rys. 2. 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



Rys. 3. Narzędzie do nagniatania ślizgowego z dociskiem: 1- uchwyt z umieszczoną wewnątrz sprężyną, 2- czujnik siły, 3- głowica mocująca, 4- kulka nagniatająca



Rys. 4. Schemat mocowania kulki w narzędziu: 1- kulka nagniatająca, 2- nakrętka zabezpieczająca, 3- podstawa kulki

Powierzchnia toczona była następnie nagniatana ślizgowo za pomocą kulek ceramicznych. Kulki mocowano w narzędziu przedstawionym na rys. 3. Sposób mocowania

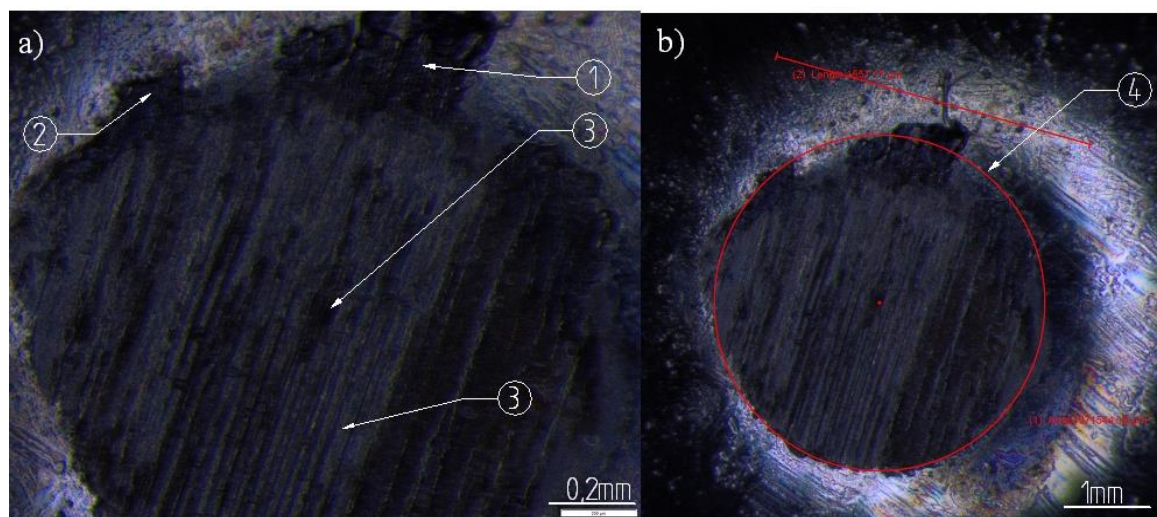
kulki przedstawia rys. 4, przy czym kulki były szlifowane z jednej strony w celu wykonania spłaszczenia zabezpieczającego kulkę przed obracaniem się w uchwycie. Parametry nagniatania były jednakowe dla wszystkich kulek i wynosiły: prędkość nagniatania  $V_b=150\text{m/min}$  (obroty  $960\text{obr/min}$ ), posuw nagniatania  $f_n = 0,05\text{mm/obr.}$ , siła docisku  $F_n=1280\text{N}$ , stosowano kulki o średnicy  $\phi 3/8''$ , powierzchnię toczoną pokryto przed nagniataniem olejem maszynowym.

Wyniki prób nagniatania ślizgowego dla poszczególnych rodzajów ceramiki zestawiono w tabeli 2. Na próbkach przewidziano drogę nagniatania  $450\div 500\text{m}$ . Próby przerywano, gdy podczas nagniatania wystąpiły dodatkowe zjawiska takie jak iskrzenie czy pojawiające się wióry jak też przypalanie się powierzchni.

Tabela 2. Zestawienie wyników nagniatania ślizgowego elementami ceramicznymi

L.p.	Nazwa ceramiki	Droga przebyta przez kulkę [m]	Uwagi
1	Si3N4	462	
2	SiC	9	Gwałtowne zużycie, pojawiło się iskrzenie
3	WC	94	Kulka zaczęła skrawać pojawiły się wióry
4	Al2O3	128	
5	ZrO2	502	

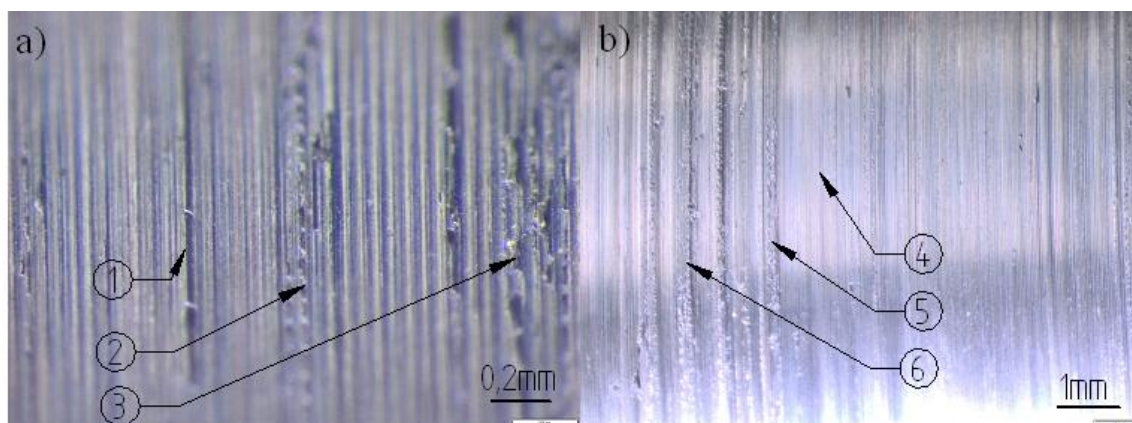
Na otrzymanych powierzchniach stwierdzono występowanie struktur wskazujących na zatarcia oraz, silne nagrzewanie się, na której zauważono tworzenie się warstwy tlenkowej.



Rys. 5. Zużycie kulki WC podczas procesu nagniatania: a) ślady zużycia; b) widok strefy kontaktu; 1, 2- wykruszenia powierzchni kulek, 3- nierówności strefy kontaktu, 4- zarys strefy kontaktu kulki z powierzchnią nagniataną

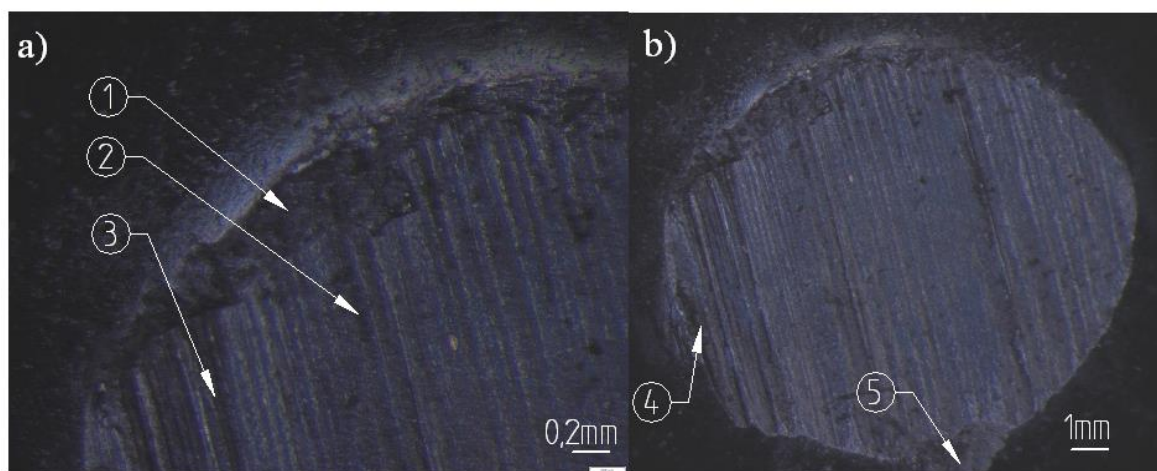
Na rysunku 5 przedstawiono fotografię powierzchni zużycia kulki wykonanej z WC. Można zauważyć ślady zużycia powierzchni kulki (3) jak i wykruszenia (1). W strukturze

przedstawionej na rys. 5a widoczne są też ślady transferu materiału nagniatanego na powierzchnię kulki. Rysunek 6 przedstawia powierzchnię nagniataną kulką WC. Na tej powierzchni widoczne są fragmenty materiału (narostu powstającego na kulce a wpasowanego w powierzchnię jak i sfery zatarć powierzchni. Ze względu, iż zatarcia powierzchni występują okresowo można przypuszczać, że są one wynikiem okresowego powstawania narostu na powierzchni nagniatanej kulki.



Rys. 6. Struktura powierzchni po nagniataniu ślizgowym kulką WC: a) szczegóły nierówności powierzchni; b) widok ogólny powierzchni, 1- rysy powierzchni, 2, 3- nieregularne ślady wykruszeń, 4- powierzchnia bez zatarć, 5, 6 -elementy zatarć na powierzchni

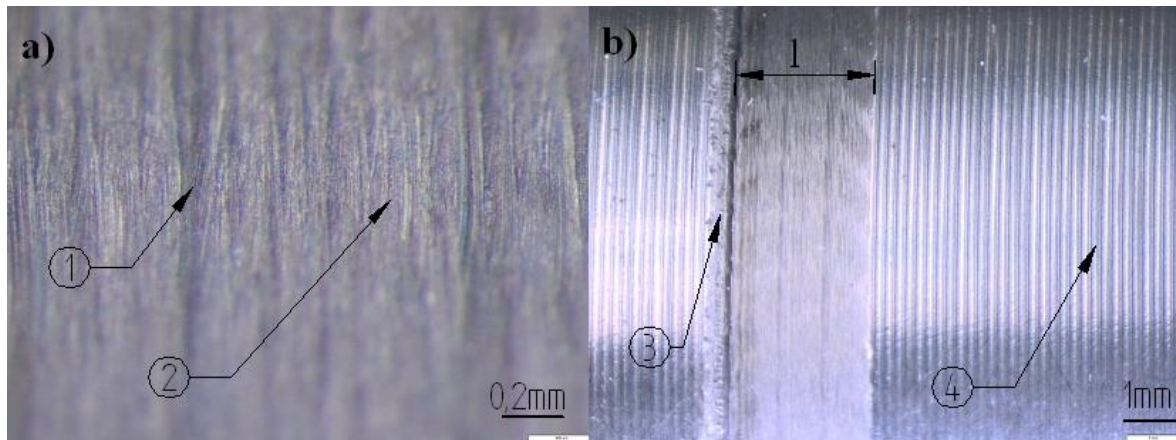
Rysunek 7 przedstawia powierzchnię nagniatającą kulki wykonanej z SiC. Pomimo bardzo krótkiej drogi, jaką przebyła ta kulka (poz. 2 tab. 2) ślady zużycia (2) i (4) są bardzo widoczne. Zauważyć też można występujące wykruszenia powierzchni (1).



Rys. 7. Zużycie kulki SiC podczas procesu nagniatania: a) ślady zużycia; b) widok strefy kontaktu; 1, 5- wykruszenia powierzchni kulek, 2, 3- nierówności strefy kontaktu

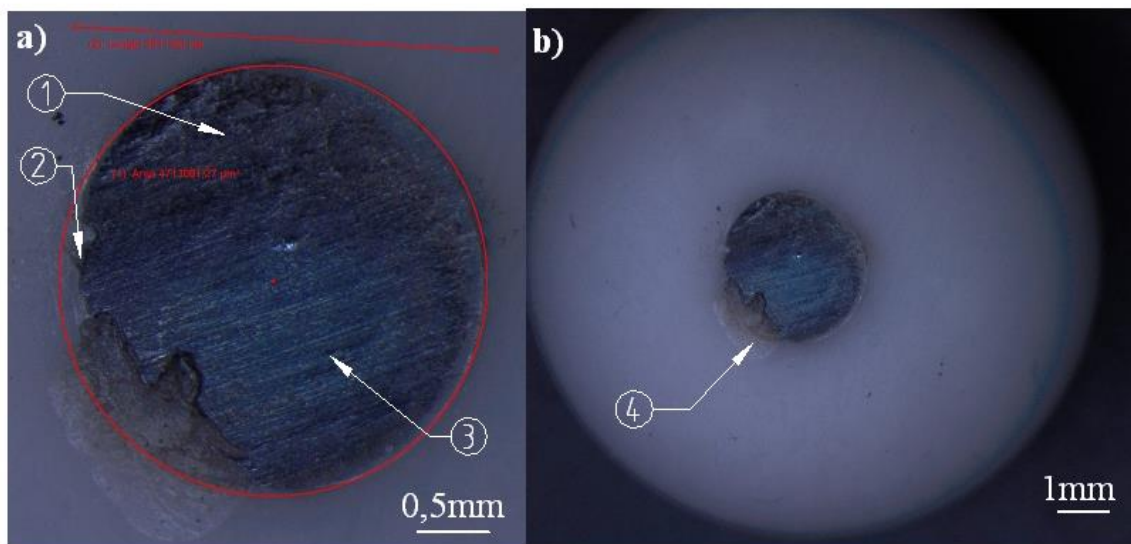
Struktura powierzchni nagniatanej kulką wykonaną z SiC została przedstawiona na rys. 8. Ze względu na pojawiające się iskrzenie nagniatanie przerwano po przebyciu przez narzędzie drogi 9m. Szerokość powierzchni zagniecionej przedstawiono na rys. 8b o szerokości l. Na tej szerokości można zauważyć zadziory (3) występujące na krańcach obszaru. Sugerują one, że proces nagniatania bardziej przypominał skrawanie ze zdejmowaniem materiału z powierzchni. Ten rodzaj pracy kulki potwierdza też obraz powierzchni nagniatanej rys. 8a która wygląda jak powierzchnia po zatarciu. Występują na niej dodatkowe nierówności

powstające w wyniku odrywania materiału z powierzchni. W oparciu o te materiały można, stwierdzić, że ten rodzaj ceramiki zupełnie nie sprawdza się w procesie nagniatania ślizgowego.



Rys. 8. Struktura powierzchni po nagniataniu ślizgowym kulką SiC: a) szczegóły nierówności powierzchni, b) widok ogólny powierzchni, 1- rysy na powierzchni po nagniataniu, 3- nieregularne ślady deformacji występujących pomiędzy powierzchnią toczoną a nagniataną, 4- powierzchnia toczona, l- szerokość strefy nagniatania

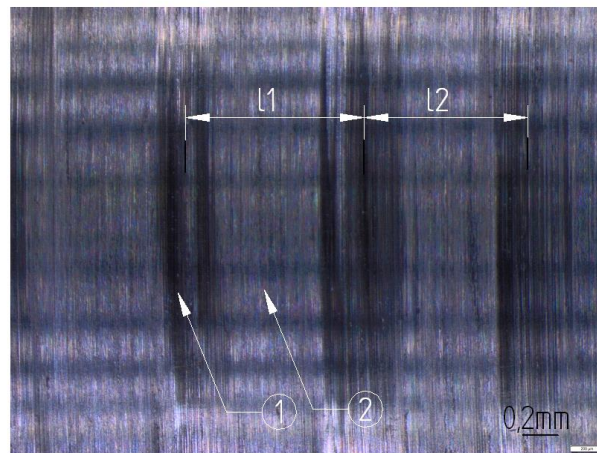
Na rysunku 9 przedstawiono kulę wykonaną z  $ZrO_2$ . Na tej powierzchni nie występują ślady zużycia powierzchni w miejscu kontaktu z powierzchnią nagniataną. Natomiast występują bardzo duże ubytki w postaci wyruszeń (4). W strefie kontaktu kulki z powierzchnią nagniataną zauważyć można warstwę materiału, która pochodzi z powierzchni obrabianej. Warstwa ta zmienia powierzchnię odkształceń, która występuje podczas operacji nagniatania, co skutkuje powstaniem dodatkowych oporów nagniatania.



Rys. 9. Zużycie kulki  $ZrO_2$  podczas procesu nagniatania: a) ślady zużycia; b) widok strefy kontaktu, 1- powierzchnia kontaktu z warstwą materiału nagniatanego, 2- niewielkie wykruszenie w strefie kontaktu, 3- nierówności strefy kontaktu, 4- wyruszenia na powierzchni kulki występujące poza strefą kontaktu

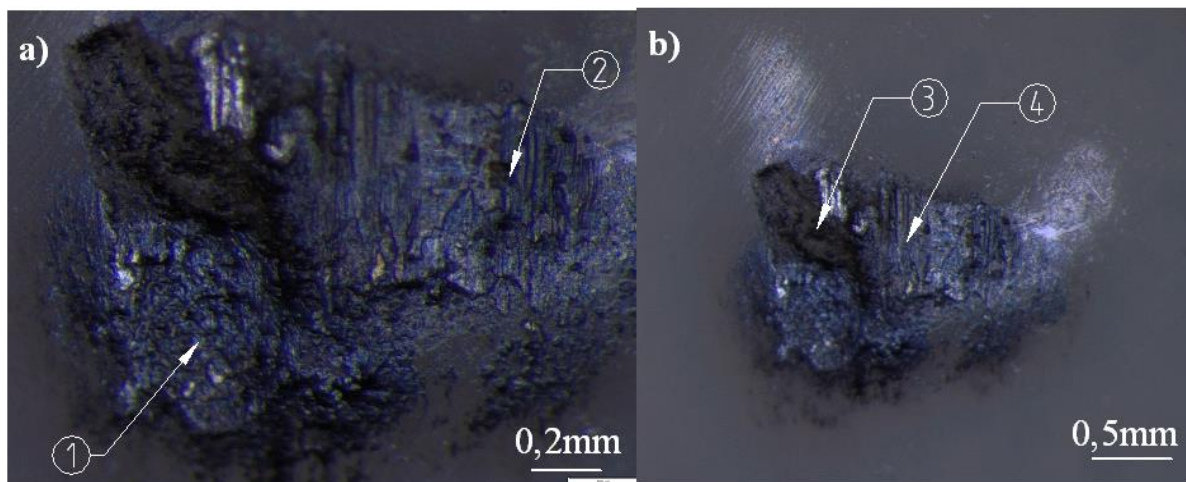
Rysunek 10 przedstawia powierzchnię wałka nagniatanego ślizgowo kulką  $ZrO_2$ . Można na nim zauważyć regularne ślady przypaleń powierzchni (1). Powstawanie tak regularnych śladów może być powodowane tworzącym się na powierzchni kulki narostem, który po

pewnym czasie się odrywa. Zwiększone opory nagniatania ślizgowego poprzez odkształcanie się materiału nagniatanego na powierzchni narostu powodują silne nagrzewanie się powierzchni, co zaobserwowano w tym przypadku.



Rys. 10. Struktura powierzchni po nagniataniu ślizgowym kulką  $ZrO_2$ : 1- przypalenia powierzchni nagniatanej, 2- powierzchnia nagniatana, 11, 12- odległości pomiędzy występującymi przywaleniami powierzchni

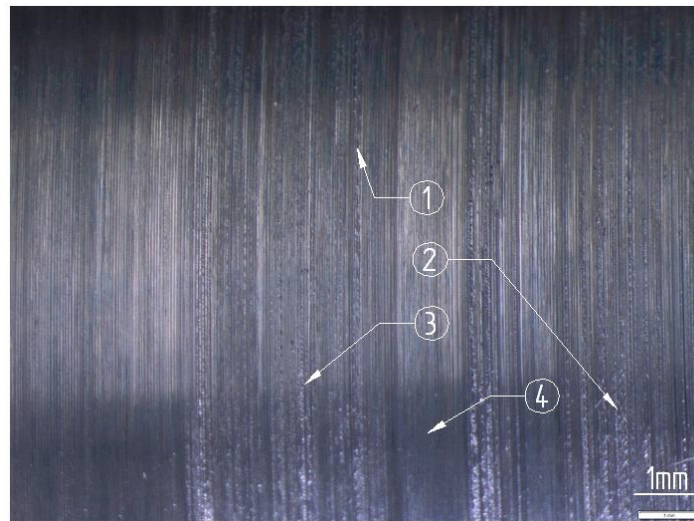
Na rysunku 11 przedstawiono strefę kontaktu kulki wykonanej z ceramiki  $Al_2O_3$ . Na tym rysunku nie ma widocznych śladów zużycia kulki. Natomiast można zauważyć wykruszenie (3) na powierzchni kulki oraz materiał nagniatany nałożony na powierzchnię kontaktu kulki z przedmiotem nagniatanym. Na dodatkowej warstwie materiału nałożonego z powierzchni nagniatanej można zauważyć nierówności (2) odpowiadające strukturze powierzchni nagniatanej. Materiał naniesiony na powierzchnię kontaktu kulki jest mocno przywarty do powierzchni i w tym przypadku odrywanie się narostu może przebiegać w inny sposób a niżeli dla kulki  $ZrO_2$ .



Rys. 11. Zużycie kulki  $Al_2O_3$  podczas procesu nagniatania: a) ślady zużycia; b) widok strefy kontaktu; 1,2- powierzchnia kontaktu z warstwą materiału nagniatanego, 3- wykruszenie w strefie kontaktu 3- nierówności strefy kontaktu, 4- warstwa materiału nagniatanego ze śladami nierówności

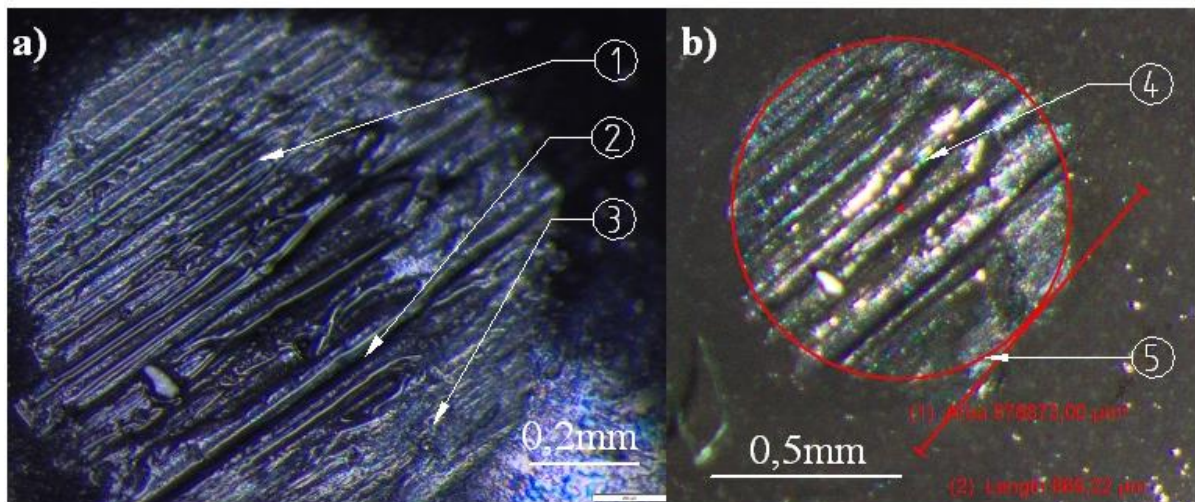
Strukturę powierzchni nagniatanej kulką  $Al_2O_3$  przedstawiono na rys. 12. Na tym rysunku widoczne są struktury powierzchni z dodatkowymi elementami nierówności (1), (2), (3). Wynikać mogą one z nakładania się materiału z powierzchni nagniatanej na element

nagniatający a następnie powierzchnia deformacji materiału przesuwa się tworząc tego typu powierzchnię. Zauważono też przerwy (4) w tego typu strukturze, które mogą być spowodowane odrywaniem się narostu od elementu nagniatającego.



Rys. 12. Struktura powierzchni po nagniataniu ślizgowym kulką  $\text{Al}_2\text{O}_3$ : 1, 2, 3- zatarcia na powierzchni nagniatanej, 4- powierzchnia nagniatana bez wad

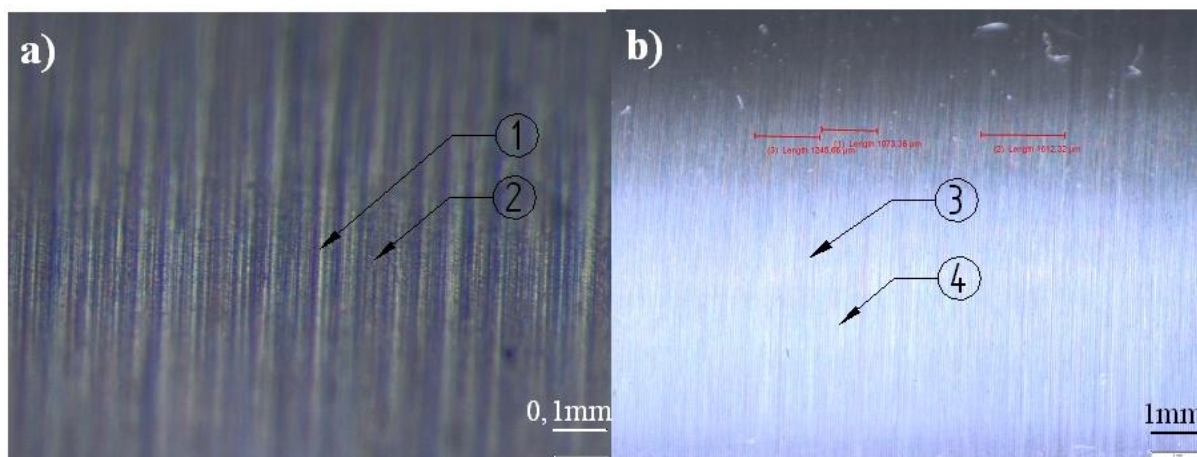
Na rysunku 13 przedstawiono powierzchnię kontaktu kulki  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Na tej powierzchni można zauważyć ślady zużycia natomiast w tym przypadku nie występują wykruszenia powierzchni. Ślady zużycia są odwzorowaniem powierzchni nagniatanej. W tym przypadku trudno jest określić czy następuje transfer materiału nagniatanego na powierzchnię nagniatającą. Na podstawie śladów ze strefy kontaktu trudno to wykluczyć.



Rys. 13. Zużycie kulki  $\text{Si}_3\text{N}_4$  podczas procesu nagniatania: a) ślady zużycia; b) widok strefy kontaktu, 1, 2, 3- nierówności powierzchni w strefie kontaktu, 4- nierówności pozostałe po obróbce, 5- zarys strefy kontaktu

Na rysunku 14 przedstawiono powierzchnię wałka hartowanego nagniatanego za pomocą kulki ceramicznej  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Powierzchnia ta nie wykazuje okresowych zmian w strukturze nierówności. Powiększenie przedstawione na rys. 14a pokazuje, że po nagniataniu częściowo pozostała struktura po obróbce poprzedzającej - toczeniu.





Rys. 14. Struktura powierzchni po nagniataniu ślizgowym kulką  $\text{Si}_3\text{N}_4$ : a) szczegóły nierówności powierzchni, b) widok ogólny powierzchni; 1- wzniesienia powierzchni po nagniataniu, 2- wgłębienia powierzchni po nagniataniu, 3, 4 - widok powierzchni nagniatanej

#### 4. PODSUMOWANIE

- Największą powierzchnię nagnieciono stosując kulki  $\text{Si}_3\text{N}_4$  i  $\text{ZrO}_2$ .
- Na kulce  $\text{Si}_3\text{N}_4$  nie zauważono wykruszeń natomiast występuje zużycie powierzchni.
- Kulki  $\text{ZrO}_2$  i  $\text{Al}_2\text{O}_3$  wykazują najmniejsze zużycie powierzchni natomiast występują wykruszenia powierzchni.
- Podczas nagniatania wystąpiło zjawisko gwałtownego nagrzewania się powierzchni elementu nagniatanego.
- Ceramika WC i SiC nie sprawdziła się jako elementy ślizgowe w badanych narzędziach nagniatających.

#### LITERATURA:

- [1] 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.
- [2] Fang-Jung Shiou, Chih-Cheng Hsu: Surface finishing of hardened and tempered stainless tool steel using sequential ball grinding, ball burnishing and ball polishing processes on a machining centre, *Journal of materials processing technology* 205 (2008) 249-258.
- [3] Fu C.H., Sealy M.P., Guo Y.B., Wei X.T.: Austenite-Martensite Phase Transformation Nitinol by Ball Burnishing, *Journal of Materials Processing Technology* (2014).
- [4] Grzesik W., Żak K.: Producing high quality hardened parts using sequential hard turning and ball burnishing operations, *Precision Engineering* 37 (2013) 849-855.
- [5] Klocke F., Liermann J.: Roller Burnishing of Hard Turned Surfaces, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 38 Nos 5-6 (1998) pp. 1956-1964.
- [6] Korzyński M.: Modeling and experimental validation of the force-surface roughness relation for smoothing with a spherical tool, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 47 (2007) pp. 1956-1964.
- [7] Kułakowska A., Patyk R.: Polioptymalizacja operacji nagniatania naporowo tocznego, *PAK* vol. 58, nr 10/2012, s. 892-895.
- [8] López de Lacalle L.N., Lamikiz A., Muñoa J., Sánchez J.A.: Quality improvement of ball-end milled sculptured surfaces by ball burnishing, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 45 (2005) 1659-1668.

- [9] 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.
- [10] Maximov J.T., Kuzmanov T.V., Duncheva G.V., Ganev N.: Spherical motion burnishing implemented on lathes, *International Journal of Machine Tools & Manufacture* 49 (2009) 824-831.
- [11] Ming Jiang, R. Komanduri: On the finishing of Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> balls for bearing applications, *Wear* 215 (1998) 267-278
- [12] Olszak W., Grochała D.: Nagniatanie powierzchni 3D na frezarkach CNC, *Współczesne problemy w technologii obróbki przez nagniatanie*, pod red. W. Przybylskiego, tom II, KTMiAP WM Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2008, s.387-398.
- [13] Pytlak B.: The roughness parameters 2D and 3D and some characteristics of the machined surface topography after hard turning and grinding of hardened 18CrMo4 steel: Komisja Budowy Maszyn PAN – oddział w Poznaniu, *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* Vol. 31 nr 4 2011, s. 49-55.
- [14] Rodriguez A., López de Lacalle L.N., Celaya A., Lamkiz A., Albizuri J.: Surface improvement of shafts by the deep ball-burnishing technique, *Surface & Coatings Technology* 206 (2012) 2817-2824.
- [15] Świrad S.: The surface texture analysis after sliding burnishing with cylindrical elements, *Wear* 271 (2011) 576-581.
- [16] Norma PN EN ISO 4287;1999 Specyfikacje geometrii wyrobów – struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa- Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [17] Norma PN EN ISO 4287;1999/A1:2010 Specyfikacje geometrii wyrobów – struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa- Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [18] Norma PN EN ISO 4287; 2011 Specyfikacje geometrii wyrobów – struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa- Zasady i procedury oceny struktury geometrycznej powierzchni.
- [19] 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>

## SLIDING BURNISHING OF HARDENED STEEL CF 53 USING CERAMIC BALLS

### **SUMMARY**

*Technical ceramics used for cutting edges and available on the market would also be applied to working elements of burnishing tools. High hardness of these materials is beneficial however some other physical properties including the parameters related to their geometrical surface structure cause their inadequacy for tools applied to burnishing hardened materials. This article presents the research results of sliding burnishing of hardened Cf53 steel surfaces using tools made of different kind of technical ceramics. The resulting geometric structure of the surface and the state of the balls after burnishing process were described based on photographic documentation.*

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