

Eugene FELDSHTEIN\*, Halina PACHA-GOŁĘBIOWSKA\*\*

## WŁAŚCIWOŚCI TRIBOLOGICZNE WARSTWY WIERZCHNIEJ ELEMENTÓW Z ŻELIWA GJS2131 PO OBRÓBCE WYKOŃCZENIOWEJ TOCZENIEM

### TRIBOLOGICAL PROPERTIES OF SURFACE LAYERS OF GJS2131 CAST IRON PARTS AFTER FINISH TURNING

#### Słowa kluczowe:

żeliwo stopowe, tarcie, zużycie, temperatura, warunki obróbki

#### Key words:

cast iron alloyed, friction, wear, temperature, machining conditions

#### Streszczenie

W pracy przedstawiono wyniki badań właściwości tribologicznych powierzchni elementów wykonanych z żeliwa GJS2131 po obróbce wykończeniowej toczeniem z zastosowaniem różnych materiałów narzędziowych i w zróżnicowanych warunkach obróbki. Wykonane badania wykazały mniejszą wartość współczynnika tarcia w przypadku użycia materiału supertwardego CBN7050 oraz wolniejszy wzrost temperatury w strefie tarcia dla tego materiału narzędziowe-

---

\* Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Budowy i Eksploatacji Maszyn, 65-246 Zielona Góra, ul. Podgórna 50.

\*\* Zespół Szkół Technicznych, 64-100 Leszno, ul. Narutowicza 74a.

go o blisko 20% w stosunku do płytek z węglika spiekanego K10. Właściwy dobór warunków toczenia i materiałów narzędziowych w znaczący sposób wpływa na intensywność zużycia WW elementów trących. Najniższą wartość intensywności zużycia objętościowego dla żeliwa GJS2131 uzyskano przy zastosowaniu materiału CBN7050 w warunkach toczeniu z dużymi prędkościami i niewielkimi posuwami.

## WPROWADZENIE

Trwałość i niezawodność maszyn i urządzeń w dużej mierze zależy od właściwości eksploatacyjnych stykających się powierzchni części maszyn [L. 1, 2]. Skutkiem procesów zachodzących przy eksploatacji jest zużycie WW, które mierzy się miarami bezwzględnymi albo względnymi.

Według Z. Lawrowskiego [L. 3], bezwzględną miarą zużycia może być: objętość  $V$  lub masa  $m$  oddzielonego materiału lub grubość  $h$  oddzielonej warstwy, wówczas gdy miarą względną będzie odniesienie ubytku objętościowego, masowego lub liniowego do jednostki czasu, drogi tarcia lub pracy tarcia.

Procesy uszkodzenia maszyn i urządzeń rozpoczynają się w warstwie wierzchniej (WW) współpracujących elementów [L. 4, 5], na co mają wpływ warunki ich styku. Zużycie części maszyn – jest to zużycie WW utożsamiane ze zmianami masy, struktury geometrycznej powierzchni lub jej kształtu. Z tych względów należy wytwarzać taki stan WW części maszyn, aby zapewnił on uzyskanie ich optymalnej żywotności.

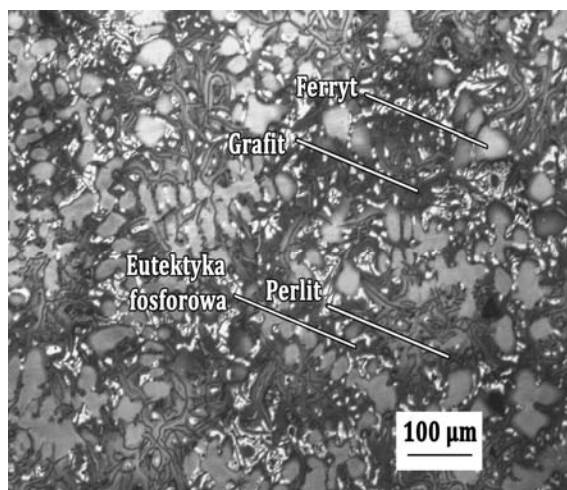
Współczesne żeliwa są to żeliwa wysokojakościowe, które charakteryzują się dużą odpornością na ścieranie oraz na oddziaływanie wysokich temperatur i dlatego szczególnie wykorzystywane są w przemyśle samochodowym, a podstawową korzyścią płynącą z zastosowania żeliw jako materiałów konstrukcyjnych jest zachowanie wymaganych właściwości mechanicznych i bezpieczeństwa eksploatacji [L. 6, 7]. Unikalne właściwości tych materiałów w konsekwencji umożliwiają optymalizację konstrukcji projektowanych części, czyli dalszą poprawę niezawodności i cech użytkowych wyrobu finalnego [L. 4, 8].

Celem badań było wskazanie materiału narzędziowego i warunków skrawania, przy których można uzyskać najlepsze właściwości tribologiczne WW, m.in. najniższe wartości współczynnika tarcia oraz intensywności zużycia objętościowego elementów wykonanych z żeliwa GJS2131.

## WARUNKI BADAŃ

Do badań zastosowano żeliwo sferoidalne GJS2131 o strukturze ferrytyczno-perlitycznej odporne na ścieranie. Materiał ten został opracowany przez zakłady przemysłowe produkujące odlewy elementów konstrukcyjnych pojazdów samochodowych, takich jak pierścienie tłokowe i tuleje cylindrowe.

Charakterystycznym szczegółem strukturalnym badanego żeliwa są obwódki utworzone z ziaren ferrytu, występujące wokół sferoidalnych wydzieleni grafitu (**Rys. 1**). Dzięki temu obok właściwości antykorozyjnych materiał ten zachowuje zdolność do tłumienia drgań i odporność na ścieranie. Ważnym składnikiem żeliwa GJS2131 jest fosfor, który tworzy odrębny składnik strukturalny – eutektykę fosforową zwaną steadytem, która powiększa twardość i odporność żeliwa na ścieranie. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne materiału przedstawiono w **Tab. 1**.



**Rys. 1. Struktura żeliwa GJS2131**

Fig. 1. Structure of GJS2131 cast iron

**Tabela 1. Skład chemiczny i właściwości mechaniczne żeliwa GJS2131**

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of GJS2131 cast iron

Skład chemiczny [% mas.]									$R_m$ [MPa]	HB	$E$ [MPa]	$\mu$
C	Si	Cu	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni				
2,49÷ ÷2,9	1,9÷ ÷2,5	5,4÷ ÷7,5	1,0÷ ÷1,5	0,33	0,04	1,0÷ ÷1,5	0,01	13,5÷ ÷17,5	150	120÷ ÷160	77	0,24

Obróbkę wykończeniową powierzchni próbek wykonano na tokarce CNC model Talent® 6/45 firmy „Hardinge”. Doboru parametrów toczenia dokonano, stosując plan całkowity typu 2<sup>2</sup> (**Tab. 2**).

Do badań wykorzystano oprawkę DCLNR2020K12 z płytkami wymiennymi CNGA 120408 wykonanymi z:

- regularnego azotku boru CBN, pokrytego warstwą azotku tytanu TiN (gatunek CBN7050) [L. 9],
- materiału ceramicznego na bazie czystego azotku krzemu, który zapewnia dobrą odporność na ścieranie przy wysokich temperaturach (gatunek CC6090) [L. 9],
- węglika spiekanego K10 [L. 10].

**Tabela 2. Warunki toczenia**

Table 2. Conditions of turning

Warunki badań	Wartości normalizowane		Wartości rzeczywiste	
	$X_1$	$X_2$	$v_c$ [m/min]	$f$ [mm/obr.]
1	-1	-1	292	0,03
2	-1	+1	292	0,3
3	+1	-1	1118	0,03
4	+1	+1	1118	0,3

Badania tribologiczne powierzchni elementów z żeliwa wykonano z użyciem testera T-05 realizującego warunki pracy pary trącej rolka–kłoczek. Schemat pracy testera przedstawiono m.in. w [L. 11]. Kłocki (próbki) wycięto z tulei wykonanej z żeliwa GJS2131, tak żeby powierzchnia czołowa tulei stała się powierzchnią trącą. Rolki (przeciwpróbki) wykonano ze stali NC10 o twardości 60 HRC. Badania realizowano w warunkach styku skoncentrowanego. Jako środek smarowy zastosowano olej silnikowy CLASSIC SJ/CF 15 W/40. Warunki smarowania – zanurzeniowe, wartość obciążenia  $F = 300$  N, prędkość obrotowa rolki 0,85 m/s. Zakres badań obejmował pomiar sił tarcia i temperatury w strefie styku oraz pomiar sumarycznego zużycia stykających się elementów węzła tarcia, które jako charakterystyki czasowe zostały zarchiwizowane w zestawie komputerowym.

Wartości zużycia objętościowego próbki wyznaczono według wzoru:

$$Z_v = \frac{D^2 l}{8} \left[ 2 \sin^{-1} \frac{b}{D} - \sin \left( 2 \sin^{-1} \frac{b}{D} \right) \right] \quad [\text{mm}^3] \quad (1)$$

gdzie:  $D$  – średnica rolki [mm],  $b$  – średnia szerokość śladu wytarcia na próbce [mm],  $l$  – szerokość próbki [mm].

Wówczas względna intensywność zużycia objętościowego równa się:

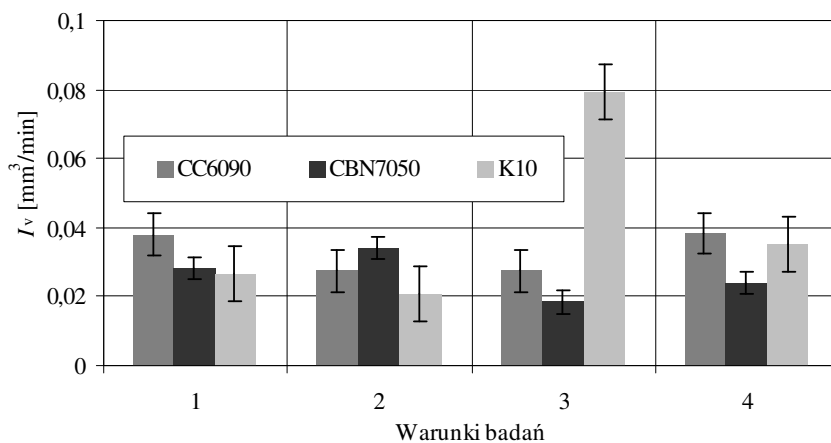
$$I_v = \frac{Z_v}{t} \quad [\text{mm}^3/\text{min}] \quad (2)$$

gdzie:  $t$  – czas tarcia [min].

## WYNIKI BADAŃ

W wyniku przeprowadzonych badań tribologicznych elementów z żeliwa GJS2131 otrzymano określone wyniki wartości intensywności zużycia objętościowego  $I_v$ , które przedstawiono na **Rys. 2** (numery warunków badań na tym rysunku i dalej są zgodne z numerami w **Tab. 2**). Analizując wartości zużycia objętościowego badanych próbek, odnotowano najmniejszą wartość  $I_v$  w przypadku zastosowania do toczenia płytek z materiału narzędziowego CBN7050 w warunkach badań: 3 i 4 oraz CC6090 przy minimalnych wartościach posuwu i maksymalnych wartościach prędkości skrawania, a także przy maksymalnych prędkościach i minimalnych posuwach (warunki badań 2 i 3 zgodne z numerami w **Tab. 2**).

Natomiast w przypadku zastosowania do toczenia płytek z węgla spiekane K10 w badanym zakresie parametrów obróbki najmniejszą wartość  $I_v$  uzyskano dla maksymalnego posuwu i małej prędkości (warunki badań 2 według **Tab. 2**). Najmniej korzystne wartości  $I_v$  otrzymano w przypadku próbek toczonych płytkami z materiału K10 przy minimalnym posuwie i maksymalnej prędkości skrawania.

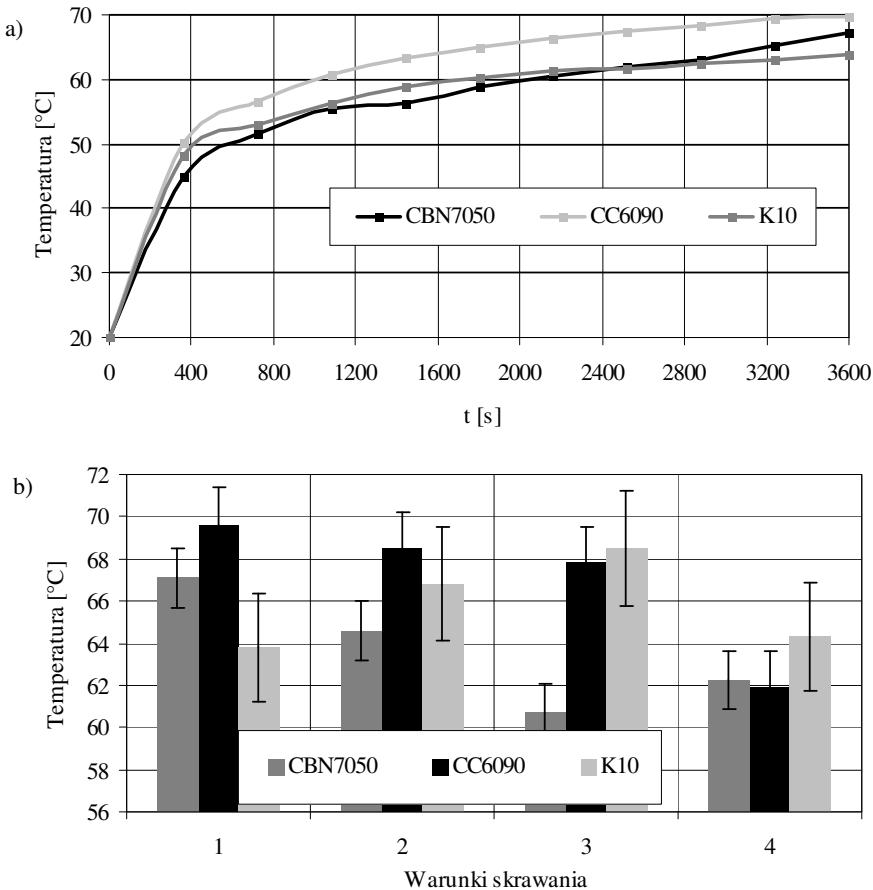


**Rys. 2. Porównanie intensywności zużycia objętościowego powierzchni z żeliwa GJS2131**  
 Fig. 2. Comparison of volumetric wear intensity of surfaces of GJS2131 cast iron

Na **Rys. 3a** przedstawiono zmiany temperatury w strefie styku węzła tarcia powierzchni z żeliwa GJS2131 od czasu tarcia i rodzaju materiału narzędziowego, a na **Rys. 3b** wartości temperatury w strefie styku powierzchni z żeliwa GJS2131 po toczeniu płytkami z różnych materiałów w zależności od parametrów skrawania.

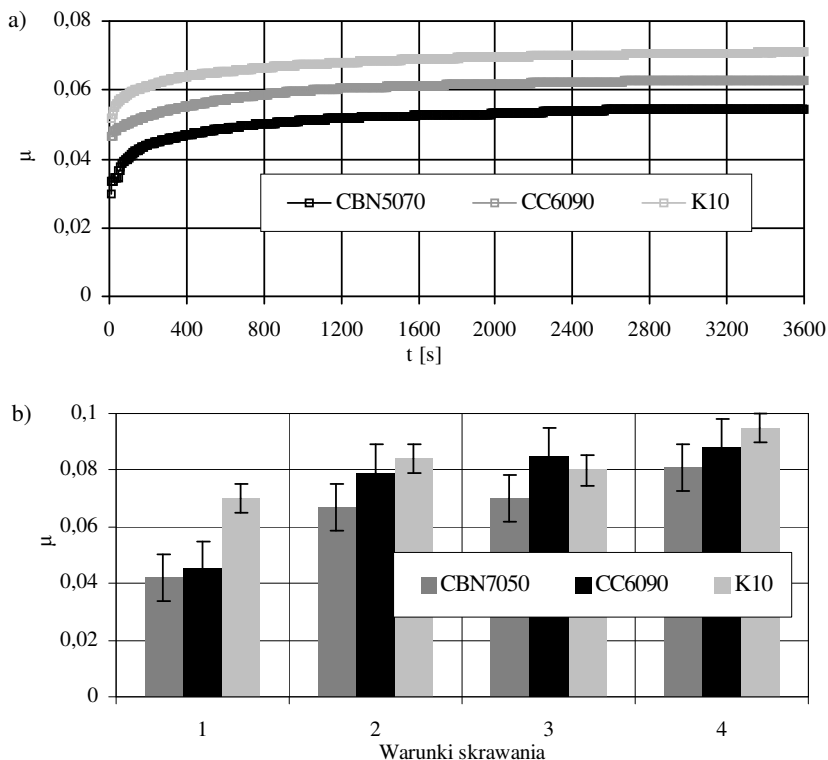
Przy analizie zmian wartości temperatury węzła tarcia zależnie od czasu i materiału narzędziowego (**Rys. 3a**) daje się zauważyć wolniejszy wzrost tem-

peratury o blisko 10% na korzyść ostrza z materiałów CBN7050 i K10 w porównaniu z płytkami z materiału CC6090. Z kolei najniższą temperaturę powierzchni toczoną płytką z CBN7050 zaobserwowano przy maksymalnej prędkości skrawania w całym badanym zakresie posuwów (**Rys. 3b**). Najniższą temperaturę powierzchni po toczeniu płytką z materiału CC6090 uzyskano dla maksymalnej wartości prędkości skrawania i małego posuwu. W przypadku materiału narzędziowego K10 wartość temperatury powierzchni osiągnęła najniższą wartość przy minimalnych prędkościach skrawania i posuwach.



**Rys. 3. Zmiany temperatury tarcia na powierzchni z żeliwa GJS2131 przy zastosowaniu różnych materiałów narzędziowych: a) w zależności od czasu tarcia, b) w zależności od parametrów skrawania (Tab. 2)**

**Fig. 3. Temperature changes of cast iron GJS2131 friction surface when using different tool materials: a) depending on the time of friction, b) depending on the cutting parameters (Table 2)**



**Rys. 4. Zmiany współczynnika tarcia na powierzchni z żeliwa GJS2131 przy zastosowaniu różnych materiałów narzędziowych: a) w zależności od czasu tarcia (warunki badań nr 1 wg Tab. 2), b) w zależności od parametrów skrawania (Tab. 2)**

Fig. 4. Coefficient of friction changes of cast iron GJS2131 friction surface when using different tool materials: a) depending on the time of friction (investigation conditions nr 1 according Table 2), b) depending on the cutting parameters (Table 2)

**Rys. 4a** przedstawia zmiany współczynnika tarcia powierzchni w zależności od materiału narzędziowego i czasu tarcia. Wyraźnie widoczne jest zmniejszenie o 20% wartości współczynnika  $\mu$  tarcia w przypadku wykorzystania materiału CBN7050 w stosunku do węgla spiekane K10 oraz o 10% mniejsza wartość  $\mu$  w stosunku do CC6090 przy toczeniu z minimalnym posuwem i minimalną prędkością skrawania (według Tab. 2).

Przedstawione na **Rys. 4b** wartości współczynnika tarcia powierzchni z żeliwa GJS2131 w zależności od zastosowanych materiałów i warunków skrawania wskazują, że najniższą wartość  $\mu$  zapewnia materiał narzędziowy CBN7050 we wszystkich warunkach badań, gorzej wypadł materiał ceramiczny CC6090, a jeszcze gorzej – węgiel spiekany K10. Najmniejsze wartości współczynnika tarcia wszystkie materiały narzędziowe zapewniają przy minimalnych wartościach prędkości skrawania i posuwu.

Właściwości tribologiczne powierzchni są uzależnione od stanu jej warstwy wierzchniej. W celu określenia takich powiązań dokonano analizy korelacyjnej między wybranymi wskaźnikami stanu WW oraz wartościami współczynnika tarcia  $\mu$  i intensywnością zużycia objętościowego  $I_v$ . Analizowano także wpływ średniego wymiaru  $D_{\text{HKL}}$  obszarów rozpraszania koherentnego, mikrotwardości  $\text{HV}_{0,05}$ , stopnia zdefektowania płaszczyzn atomowych  $\Delta d/d$ , gęstości dyslokacji  $\rho$  w objętości kryształu oraz naprężeń głównych I-go rodzaju, działających w kierunku prostopadłym do powierzchni badanej. Zasady i wyniki badań wymienionych wskaźników WW przedstawiono w [L. 12].

W **Tab. 3** zamieszczono wielkości współczynników korelacji między wskaźnikami WW a jej wskaźnikami tribologicznymi oraz korelacji między poszczególnymi wskaźnikami tribologicznymi WW. Dla wyraźniejszego zobrazowania, jak znacząca jest korelacja, istotne wartości zaznaczono odcieniami szarości. Ciemniejszy odcień wyróżnia korelację bardzo wysoką np. 0,975 lub wysoką np.  $-0,735$ . Natomiast jaśniejszymi odcieniami oznaczono korelację średnią, np. 0,645 lub słabą, np. 0,525. Korelacji niskiej lub jej braku oznaczono na biało.

**Tabela 3. Współczynniki korelacji między wskaźnikami stanu WW a jej wskaźnikami tribologicznymi**

Table 3. Correlation coefficients between indicators of the surface layer state and its tribological indicators

Skojarzenia	Materiał narzędziowy		
	CBN7050	CC6090	K10
$\mu - I_v$	0,407	-0,594	0,611
$D_{\text{HKL}} - I_v$	-0,372	-0,270	0,453
$\text{HV}_{0,05} - I_v$	-0,735	0,975	0,569
$\Delta d/d - I_v$	-0,855	-0,970	0,166
$\rho - I_v$	-0,360	-0,061	-0,088
$(\sigma_1 + \sigma_2) - I_v$	-0,811	0,467	-0,621
$\Delta d/d - D_{\text{HKL}}$	-0,053	0,036	-0,792
$D_{\text{HKL}} - \text{HV}_{0,05}$	0,728	0,546	-0,393
$D_{\text{HKL}} - \mu$	0,319	-0,285	-0,107
$\text{HV}_{0,05} - \mu$	0,881	-0,556	0,406
$\Delta d/d - \mu$	0,868	-0,882	-0,937
$(\sigma_1 + \sigma_2) - \mu$	0,949	0,127	0,621
$\Delta d/d - D_{\text{HKL}}$	-0,053	0,036	-0,792
$D_{\text{HK}} - \text{HV}_{0,05}$	0,728	0,546	-0,393



Analiza wartości współczynników korelacji między wskaźnikami stanu WW a jej wskaźnikami tribologicznymi uwidacznia bardzo wysoką korelację dla materiału narzędziowego CBN7950 pomiędzy intensywnością zużycia  $I_v$  a stopniem zdefektowania płaszczyzn atomowych  $\Delta d/d$ , makronaprężeniami ( $\sigma_1 + \sigma_2$ ) i mikrotwardością  $HV_{0,05}$  oraz współczynnikiem tarcia. Bardzo wysoka korelacja istnieje także pomiędzy ( $\sigma_1 + \sigma_2$ ) a współczynnikiem tarcia  $\mu$  oraz pomiędzy gęstością dyslokacji i mikrotwardością a  $\mu$ . W przypadku korelacji pomiędzy współczynnikiem tarcia  $\mu$  a intensywnością zużycia  $I_v$  przyjmuje ona średnie wartości, które świadczą o umiarkowanym wpływie  $\mu$  na zużycie WW badanych próbek.

W przypadku materiału narzędziowego CC6090 bardzo wysoka korelacja istnieje pomiędzy intensywnością zużycia a mikrotwardością i stopniem zdefektowania płaszczyzn atomowych, wysoka korelacja pomiędzy  $\Delta d/d$  a współczynnikiem tarcia oraz średnia korelacja pomiędzy współczynnikiem tarcia a  $I_v$ . Dla materiału narzędziowego K10 występuje bardzo wysoka korelacja pomiędzy  $\Delta d/d$  a  $\mu$ , natomiast średnia korelacja pomiędzy intensywnością zużycia a  $HV_{0,05}$  i obszarami rozpraszania koherentnego  $D_{HKL}$ , a także pomiędzy stopniem zdefektowania płaszczyzn atomowych  $\Delta d/d$  a średnim wymiarem  $D_{HKL}$  obszarów rozpraszania koherentnego.

## WNIOSKI

W wyniku badań tribologicznych próbek z żeliwa GJS2131 ustalono, że wartości intensywności zużycia objętościowego  $I_v$  są zróżnicowane zależnie od zastosowanych materiałów narzędziowych, warunków badań. Najniższą wartość  $I_v$  zapewnia zastosowanie do toczenia płytek z CBN7050 przy maksymalnej prędkości skrawania i minimalnym posuwie oraz płytek z K10 przy minimalnej prędkości skrawania i maksymalnym posuwie w badanym zakresie tych parametrów. W przypadku zastosowania materiału CC6090 najniższa wartość  $I_v$  występuje przy minimalnej prędkości skrawania i maksymalnym posuwie oraz przy maksymalnej prędkości skrawania i minimalnym posuwie.

Wartości współczynnika tarcia kształtują się różnie, zależnie od materiału narzędziowego. W przypadku materiału CBN7050 zarejestrowano mniejsze o 20% wartości współczynnika tarcia  $\mu$  w stosunku do materiału K10 przy zastosowaniu minimalnych posuwów i prędkości skrawania.

Zaobserwowano wolniejszy wzrost temperatury węzła tarcia o blisko 10% na korzyść materiału ostrza z CBN7050 i K10 w stosunku do płytek z materiału CC6090. Temperatura powierzchni toczonej płytką z materiału CBN7050 osiągnęła najniższą wartość przy maksymalnej prędkości skrawania i minimalnym posuwie, a dla materiału CC6090 przy maksymalnej prędkości skrawania i posuwie.

Badania współzależności między poszczególnymi wskaźnikami stanu warstwy wierzchniej a jej wskaźnikami tribologicznymi wykazały bardzo wysoką korelację pomiędzy intensywnością zużycia objętościowego  $I_v$  a makronaprężeniami oraz stopniem zdefektowania płaszczyzn atomowych i mikrotwardością, dla materiału narzędziowego CBN7050 oraz pomiędzy makronaprężeniami a współczynnikiem tarcia, w przypadku materiału CC6090 pomiędzy intensywnością zużycia objętościowego a mikrotwardością i stopniem zdefektowania płaszczyzn atomowych. Dla materiału K10 występuje bardzo wysoka korelacja pomiędzy stopniem zdefektowania płaszczyzn atomowych  $\Delta d/d$  a współczynnikiem tarcia, a średnia korelacja pomiędzy  $I_v$  a mikrotwardością, makronaprężeniami, obszarem rozpraszania koherentnego  $D_{HKL}$  oraz współczynnikiem tarcia  $\mu$ . Średnia korelacja występuje również dla materiałów narzędziowych CBN7050 i CC6090, między innymi pomiędzy intensywnością zużycia objętościowego  $I_v$  i współczynnikiem tarcia  $\mu$ .

Wysokie współczynniki korelacji świadczą o zdecydowanym wpływie poszczególnych wskaźników umocnienia WW powierzchni z badanego żeliwa na ich właściwości tribologiczne.

## LITERATURA

1. Pytko S., Lewitowicz J.: Zagadnienia tarcia i zużywania. Praca zbiorowa „Wybrane problemy tribologii”. PWN, Warszawa 1990.
2. Sadowski J.: Nowe miary zużycia, zużywania i odporności na zużywanie tribologiczne. Tribologia, 2005, nr 1, s. 7–24.
3. Lawrowski Z.: Tribologia. Tarcie, zużywanie, smarowanie. PWN, Warszawa 1993.
4. Hebda M., Wachal A.: Trybologia. WNT, Warszawa 1980.
5. Posmyk A.: Badania tribologiczne materiałów kompozytowych przeznaczonych na podzespoły technicznych środków transportu. Polskie Towarzystwo Materiałów Kompozytowych, Kompozyty, nr 10, 2010, s. 70–75.
6. Pytko S.: Trwałość i niezawodność maszyn miarą postępu technicznego. Wydawnictwo AGH, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Kraków 1994.
7. Zwierzycki W.: Wybrane zagadnienia zużywania się materiałów w ślizgowych węzłach maszyn. PWN, Warszawa 1990.
8. Kaźmierczak A.: Tarcie i zużycie zespołu tłok–pierścieni cylinder. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005.
9. Katalog główny. SANDVIK Coromant, 2009.
10. Katalog generalny. MITSUBISCHI, 2009.
11. <http://katalog.itee.radom.pl/images/stories/karty/58.t-05.pdf>
12. Feldshtein E., Pacha-Gołębiowska H.: Wpływ warunków wykończeniowej obróbki toczeniem na właściwości powierzchni elementów z żeliwa stopowego GJS2131. Inżynieria Materiałowa, nr 6, R. 30, 2009, s. 509–515.

## Summary

In this paper, the results of studies on the surface tribological properties of parts made of spheroidal graphite cast iron GJS2131 with a ferrite-pearlite structure after finish turning with different tool materials and machining conditions are presented. Investigations revealed minimum values of the friction coefficient and the slower, 20%, increase of temperature in the case of inserts made of “superhard” material CBN7050 compared to the hard alloy K10. The correct choice of turning conditions and tool material significantly affects the intensity of the wear of the rubbing surfaces. The lowest values of the volumetric wear rate intensity are registered in the case of CBN7050 tool material when turning at high speeds and low feed rates and in the case of K10 material when turning at low speeds and high feed rates. When using the investigated tool materials, very significant correlation between the state of the surface layer and its tribological characteristics has been set. In particular, the material CBN7050 has high coefficients of correlation between the intensity of wear  $I_v$  and the degree of distances distortion  $\Delta d/d$  between the planes of the crystal net, macrostresses  $(\sigma_1 + \sigma_2)$ , microhardness  $HV_{0.05}$ , and the friction coefficient, as well as between the values of  $(\sigma_1 + \sigma_2)$  and the friction coefficient or between the dislocation density, microhardness and the friction coefficient. The coefficients of correlation between the friction coefficient and wear rate are less significant. This is evidence of a moderate influence of the friction coefficient on the wear rate of turned surfaces.