

# METODA OCENY WYBRANYCH CECH SZLIFOWALNOŚCI MATERIAŁÓW

Rafał LEONARCIK<sup>1</sup>, Mirosław URBANIAK<sup>2</sup>

## 1. WPROWADZENIE

W obróbce skrawaniem występuje pojęcie obrabialności materiału, które w stosunku do różnych metod, odmian i sposobów obróbki charakteryzuje podatność materiału na obróbkę. Istnieją pojęcia analogiczne związane bezpośrednio z podatnością na różne sposoby obróbki przy użyciu różnych technologii, np.: cieplną, mechaniczną, elektrochemiczną [2, 3]. W odniesieniu do powyższych teorii podatność materiału obrabianego na obróbkę ścierną nazywa się szlifowalnością. Jest to trudna do zdefiniowania własność materiału umownie wyznaczana poprzez szereg cech materiału szlifowanego, ściernicy i procesu szlifowania. Do tych cech należą:

- rodzaj i stan materiału,
- sposób szlifowania – zgrubne (wydajnościowe) i wykończeniowe (gładkościowe),
- odmiana szlifowania – czołowe, obwodowe, szlifowanie płaszczyzn, wałków, otworów,
- zastosowana ściernica w procesie,
- parametry zadane podczas procesu obciążania i szlifowania.

Szlifowalność według źródeł literaturowych [2] definiowana jest w dwojaki sposób:

1. Jest to podatność materiału w danych warunkach obróbki na zmiany objętości, kształtu i wymiarów, przez zeszlifowanie określonej objętości materiału bez zmiany właściwości wymaganych dla gotowego wyrobu.

2. Jest to miara sposobu, w jaki materiał obrabiany wpływa na ściernicę podczas procesu obróbkowego. Inaczej ujmując można tu oceniać odporność ściernicy na wpływ materiału szlifowanego.

---

<sup>1</sup> SONOCO POLAND Packaging Services, 94-406 ŁÓDŹ, ul. Nowy Józefów 70

<sup>2</sup> Katedra Technologii Maszyn Politechniki Łódzkiej, 90-924 ŁÓDŹ, ul. Stefanowskiego 1-15

Szlifowalność odnosi się nie tylko do oceny szlifowanych metali, bądź ceramiki, w przemyśle maszynowym, ale może być rozpatrywana również dla innych materiałów poddawanych obróbce ścierniej, takich jak np.: beton, granit [1, 2], itd.

Ocena szlifowalności materiałów jest ważnym problemem. Zagadnienie jest aktualne, wciąż nie do końca rozpoznane z powodu braku uznanej metody oceny szlifowalności. Te niedostatki oraz brak urządzeń do zbadania wskaźnika szlifowalności materiałów powodują zwiększoną pracochłonność doboru ściernic i parametrów nastawnych szlifowania.

## 2. OPIS METODY OCENY SZLIFOWALNOŚCI

Zaproponowane w literaturze metody oceny szlifowalności materiałów oraz badania skrawności ściernic, dotyczą głównie badania specyficznych materiałów (np.: ceramiki) i zostały zaprojektowane do badania konkretnych materiałów obrabianych oraz konkretnych ściernic.

Stopień skomplikowania prezentowanych metod jest wysoki co utrudnia ich zastosowania w codziennej, przemysłowej pracy.

Dotychczasowe podejście do rozwiązania problemu skupiło się na dwóch aspektach. Pierwszy dotyczył głównie monitorowania wielkości towarzyszących procesowi szlifowania za pomocą różnych przetworników, jak przykładowo: siłomierze, termopary, czujniki drgań. Drugi natomiast dotyczył optymalizacji parametrów celem zwiększenia efektywności procesu, rozumianej jako uzyskanie wymaganej jakości, maksymalizację wydajności lub minimalizację kosztów.

Na podstawie przeglądu literatury oraz badań wstępnych postawiono hipotezę, iż: *„istnieje możliwość standaryzacji oceny szlifowalności materiałów przez określenie grupy wskaźników dla pary obróbkowej przedmiot obrabiany – ściernica, których parametry są wyznaczane w warunkach stałej prędkości dosuwu zapewniającej zrównoważone warunki szlifowania”*.

Osiągnięto to przez utworzenie grupy trzech wskaźników oceny pod kątem wydajności, jakości i ekonomiczności procesu. Wartości wskaźników wyznaczano w ustalonym, kontrolowanym wydajnościowo przebiegu procesu szlifowania na wykonanym do tego celu stanowisku badawczym. Na nim testowano próbki materiału obrabianego szlifując je włącznie z pomocą dobranej ściernicy.

Wskaźnik szlifowalności materiału pod kątem wydajności szlifowania może mieć postać:

$$K_w = \frac{Z'}{F_t} \left[ \frac{mm^3}{N \cdot s} \right] \quad (1)$$

gdzie:

$Z'$  – właściwa wydajność objętościowa szlifowania [ $mm^2/s$ ],

$F_t'$  – właściwa składowa styczna siły szlifowania [ $N/mm$ ].

Usuwanie naddatku wiąże się w tym równaniu ze składową styczną siły szlifowania potrzebną do jego usuwania. Proponowana zależność określa ilość (objętość) zeszlifowanego materiału usuniętą przy użyciu określonej wartości siły stycznej szlifowania w jednostce czasu. Można również zinterpretować ten wskaźnik jako odwrotność zapotrzebowania siły stycznej na usunięcie jednostki objętości szlifowanego materiału. Większa wartość wskaźnika oznacza lepszą szlifowalność.

Z punktu widzenia jakości warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego zaproponowano wskaźnik szlifowalności następującej postaci:

$$K_j = \frac{F_n}{F_t \Delta T_p Ra} \quad [1/K \mu\text{m}] \quad (2)$$

gdzie:

$F_t$  – składowa styczna siły szlifowania [N],

$F_n$  – składowa normalna siły szlifowania [N],

$\Delta T_p$  – przyrost temperatury próbki w czasie próby [K],

$Ra$  – chropowatość powierzchni próbki uzyskana po próbie [ $\mu\text{m}$ ].

Wprowadzony iloraz składowych siły szlifowania można traktować jako odwrotność specyficznego współczynnika tarcia występującego w procesie kontaktu obróbczego ściernicy i przedmiotu. Rosnąca jego wartość zmniejsza gładzące oddziaływanie ściernicy. Drugim czynnikiem, istotnym dla jakości warstwy wierzchniej przedmiotu, jest wpływ przepływu ciepła. Uwzględniono to wprowadzając do wskaźnika przyrost temperatury warstwy wierzchniej. Następnie uwzględniono stan struktury geometrycznej powierzchni przez wprowadzenie parametru chropowatości przedmiotu  $Ra$ .

Zagadnienie specyficznego współczynnika tarcia może mieć też inne zastosowania. Z punktu widzenia ściernicy większa jego wartość informuje o większym udziale siły oddzielającej wióry i względnie mniejszym obciążeniu warstwy wierzchniej przedmiotu naciskiem w procesie. Stąd można spodziewać się lepszych jej właściwości skrawnych. W takim przypadku wskaźnik właściwości skrawnych miałby postać:

$$K_s = \frac{F_t}{F_n \Delta T_p Ra} \quad [1/K \mu\text{m}] \quad (3)$$

Specyficzny współczynnik tarcia można byłoby wykorzystać również do oceny zmian zdolności skrawnych ściernicy w okresie jej trwałości. Zmiana bowiem jego wartości, a ściślej zmniejszanie wartości, informuje o zmniejszającej się skrawności ściernicy. Są to jednak zagadnienia wykraczające poza zakres niniejszego opracowania.

Analizując proces szlifowania pod kątem ekonomiczności procesu przyjęto wskaźnik szlifowalności w postaci:

$$K_e = G \quad [-] \quad (4)$$

gdzie:

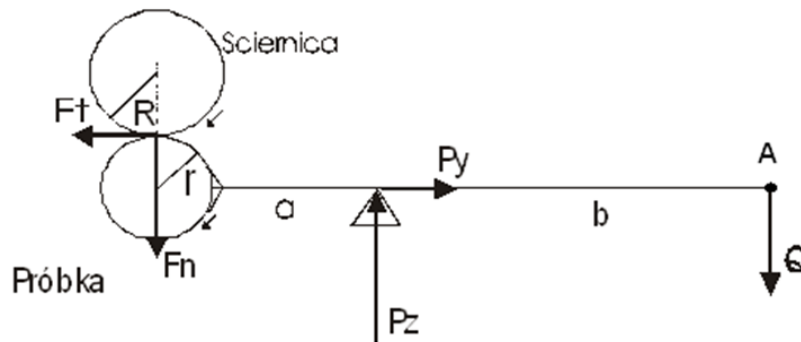
$G$  – wskaźnik szlifowania znany jako G-ratio wyraża wydajność względną szlifowania stanowiącą iloraz objętości materiału zeszlifowanego  $V_m$  i zużytej w tym celu objętości ściernicy  $V_s$ .

Włączenie tego wskaźnika jako elementu oceny szlifowalności materiałów jest istotne, głównie dlatego, że ma znaczenie jako składnik kosztu szlifowania.

Ocena szlifowalności w postaci grupy trzech wskaźników umożliwiających analizowanie trzech głównych cech współpracy ściernicy z przedmiotem szlifowanym daje pełniejszy obraz relacji zachodzących pomiędzy nimi.

Istnieje możliwość zbudowania innych wskaźników oceny szlifowalności materiałów, które mogą kłaść nacisk na inne, ważne elementy współpracy pomiędzy narzędziem i materiałem w szczególnych zadaniach obróbkowych. Tu przyjęte wskaźniki zostały zbudowane dla uzyskania klarownej postaci oceny oraz łatwości w interpretacji praktycznej. Wykorzystanie prezentowanego podejścia spełnia takie założenie.

Realizację metody badania grupy wskaźników szlifowalności oparto na koncepcji docisku walcowej próbki podlegającej szlifowaniu do ściernicy. Zespół próbki z napędem, stanowiący zamknięty układ obciążeń, umieszczono na dźwigni dwuramiennej, przedstawionej schematycznie na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat obciążenia dźwigni dociskowej

Dźwignia ta jest osią obrotu zamocowaną do trójskładnikowego siłomierza piezoelektrycznego. Wartości siły szlifowania, występujące pomiędzy elementami pary obróbczej równoważone są na osi siłomierza dając możliwość pomiaru ich składowych.

Składowa pozioma  $P_y$  jest rejestrowana przez siłomierz i równoważę siłę styczną szlifowania  $F_t$  (zgodnie z równaniem sił na kierunku dźwigni). Składową normalną szlifowania  $F_n$  można wyznaczyć z równania momentów względem punktu przyłożenia siły zewnętrznej Q (punkt A na rysunku 1) i wynosi ona:

$$F_n = \frac{Pz*b - Ft*r}{a+b+r} \quad (5)$$

Powyższa koncepcja stanowi zgłoszenie patentowe [4].

Na dźwigni można zamocować pirometry ustawione prostopadle do powierzchni współpracującej pary obróbczej przedmiot – ściernica.

Konstrukcję stanowiska, układ sterowania i zasadę jego funkcjonowania przedstawiono na obradach Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej w 2011 roku [5].

### 3. METODYKA BADAŃ

Weryfikację metody przeprowadzono szlifując hartowaną stal 145Cr6, wykorzystując dwie ściernice dedykowane do obróbki tego materiału:

- a) 1-350x20x127-M463I8VE01NPB5-35 – oznaczone 46I8, lub I8
- b) 1-350x20x127-99A46J7VE01-35 – oznaczone 46J7, lub J7

Są to ściernice ceramiczne z monokorundu (a) oraz elektrokorundu szlachetnego (b).

Jak wcześniej nadmieniono, grupa wskaźników była wyznaczana w obszarze zmienności parametrów nastawnych. Badania zaplanowano w oparciu o eksperyment planowany przeprowadzony przy wykorzystaniu programu Minitab oraz Statistica, w celu ograniczenia ilości doświadczeń. Do eksperymentu wybrano plan  $3^2$  (plan trójwartościowy, dwuparametrowy, pełny). Wielkościami wejściowymi eksperymentu były: dosuw próbki  $a_e$  oraz prędkość obwodowa próbki  $v_p$ . Zakresy ich zmian podano w tabeli 1.

Tabela 1. Wielkości wejściowe procesu szlifowania

Parametr	Przedział wartości	Jednostka
$a_e$	0,005 – 0,02	[mm]
$v_p$	0,15 – 0,3	[m/s]
$v_s$	26	[m/s]
chłodzenie	bez cieczy	-
$t$ (czas szlifowania)	1	min

Czas testów, na jedną minutę ustalono w badaniach wstępnych biorąc pod uwagę przebiegi przyrostu temperatury. Dla ściernic był to minimalny czas nasycenia pojemności cieplnej w danych warunkach, a dla przedmiotu przedział proporcjonalnego wzrostu temperatury warstwy wierzchniej.

Badania przeprowadzono w jednakowych warunkach przygotowania ściernic obciążaniem stosując obciążacz diamentowy jednoziarnisty z dosuwem  $a_d = 0,01\text{mm}$  przejście i stopniem pokrycia  $k_d = 1,5$  w pięciu przejściach roboczych bez wygładzania.

#### 4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

Wynik eksperymentu planowanego został opracowane i przedstawione graficznie w programie CurveExpert Professional v.1.5. Korzystając z wyżej wspomnianego oprogramowania wykonywano dopasowanie modelu funkcji do punktów pomiarowych przy zastosowaniu modelu potęgowego (klasy E):

$$y = ax_1^b * x_2^c \quad (6)$$

gdzie:

- $x_1$  – odpowiada wartościom zmiennej dosuwu próbki do ściernicy na obrót próbki  $a_e$  [mm],
- $x_2$  – odpowiada prędkości obwodowej próbki  $v_p$  [m/s],
- $a, b, c, d$  – wartości uzyskane z funkcji dopasowania.

##### 4.1. OPRACOWANIE WSKAŹNIKÓW SZLIFOWALNOŚCI

Na wykresach 3D przedstawiono wartości obliczonych wskaźników: wydajnościowego, jakościowego oraz ekonomicznego. Pokazano tu ich zmienność w zależności od wartości nastaw procesu szlifowania  $a_e$  i  $v_p$ . Do prezentacji graficznej grupy wskaźników wybrano wyniki badań uzyskane podczas testów stali 145Cr6 z wykorzystaniem ściernicy: 1-350x20x127-99A46J7VE01-35.

Na rysunku 2 przedstawiono wykresy przestrzenne opisujące wpływ wartości dosuwu na obrót próbki  $a_e$  oraz prędkości obwodowej próbki  $v_p$  na wartość: wydajnościowego -  $K_w$ , jakościowego -  $K_j$  i ekonomicznego wskaźnika szlifowalności materiałów -  $K_e$ .

Powierzchnię opisującą wpływ wartości wejściowych procesu szlifowania na wydajnościowy wskaźnik szlifowalności stali 145Cr6 przedstawia równanie:

$$K_w = 62,356a_e^{0,737} * v_p^{0,64} \quad (7)$$

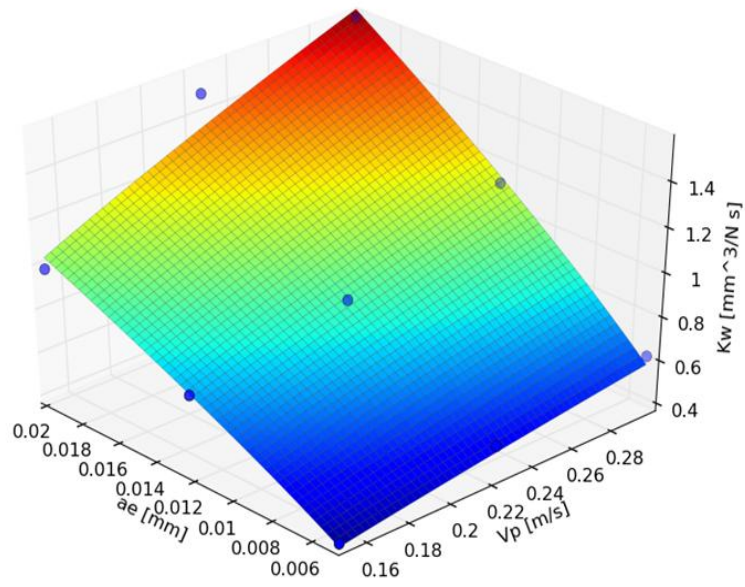
Współczynnik korelacji dla tej funkcji wynosi 0,98.

Wskaźnik jakościowy procesu szlifowania dla tej oceny wyraża się zależnością:

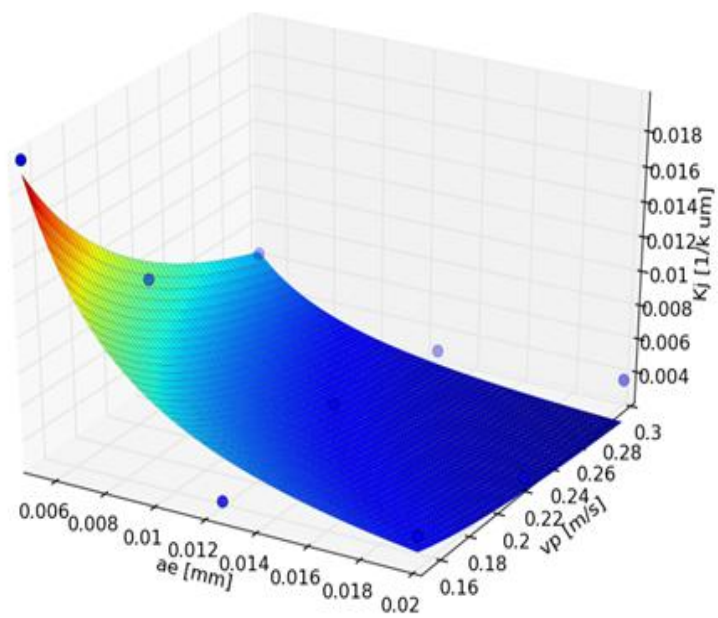
$$K_j = 0,935E^{-6} * a_e^{-1,35} * v_p^{-1,60} \quad (8)$$

Współczynnik korelacji dla tej funkcji wynosi 0,96.

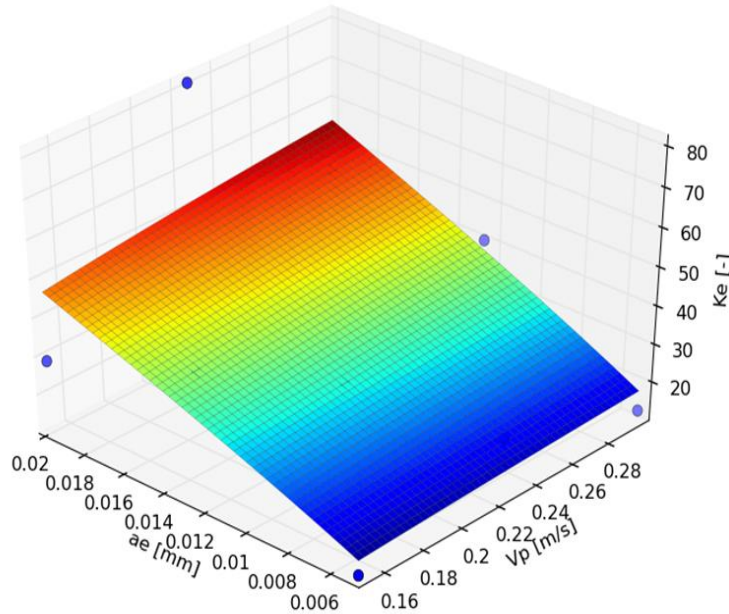
a)



b)



c)



Rys. 2. Wpływ  $a_e$  i  $v_p$  na wydajnościowy wskaźnik szlifowalności  $K_w$  (a), jakościowy wskaźnik szlifowalności  $K_j$  (b) oraz ekonomiczny wskaźnik szlifowalności  $K_e$  (c) dla badań procesu szlifowania do którego użyto próbki ze stali 145Cr6 oraz ściernicę 46J7

Powierzchnię opisującą wartość ekonomicznego wskaźnika szlifowalności materiałów, zależną od  $a_e$  i  $v_p$ , przedstawia równanie:

$$K_e = 1807,97 a_e^{0,821} * v_p^{0,232} \quad (9)$$

Współczynnik korelacji dla tej funkcji wynosi 0,71.

Dla wskaźnika wydajnościowego procesu szlifowania istotna jest siła potrzebna do usunięcia jednostkowej objętości obrabianego materiału podczas procesu szlifowania. Wraz ze wzrostem wartości głębokości dosuwu na obrót próbki do ściernicy  $a_e$  oraz wraz ze wzrostem prędkości obwodowej próbki  $v_p$  rośnie wartość wskaźnika wydajnościowego szlifowania. Z punktu widzenia procesu szlifowania, im większa wartość wskaźnika wydajnościowego, tym naddatek na obróbkę jest łatwiej usuwany przy określonych nastawach procesu i lepsza jest szlifowalność badanego materiału.

Z punktu widzenia oceny jakościowej szlifowanego materiału wraz ze wzrostem wartości prezentowanego wskaźnika wzrasta jakość jego warstwy wierzchniej po obróbce, czyli przewiduje się mniejsze naprężenia oraz mniejszą chropowatość. Na prezentowanym przykładzie (rys. 2 b) można stwierdzić, iż wraz ze zmniejszaniem dosuwu na obrót próbki do ściernicy  $a_e$  wzrasta wartość jakościowego wskaźnik



szlifowalności i w mniejszym stopniu wzrasta jego wartość ze zmniejszaniem prędkości obwodowej przedmiotu.

Na przykładzie wykresu ekonomicznego wskaźnika szlifowalności (rys. 2c) można zaobserwować niemal liniowy wzrost wartości ekonomicznego wskaźnika szlifowalności materiału wraz ze wzrostem wartości dosuwu na obrót próbki do ściernicy oraz niewielki, podobny wpływ prędkości obwodowej próbki na zmianę wartości wskaźnika.

#### 4.2. PORÓWNANIE ZASTOSOWANIA ŚCIERNIC

Dla większej przejrzystości porównań zastosowano ocenę w funkcji uznanego parametru równoważnej grubości wiórów ( $h_{eq}$ ), określającego w zwartej formie intensywność procesu szlifowania i ujmującego obydwie nastawne wielkości procesów szlifowania realizowanych w badaniach ( $a_e$ ,  $v_p$ ). Zastosowano tu mnożnik celem zmiany jednostki grubości wióra na mikrometry. Przyjmuje on więc postać według wzoru:

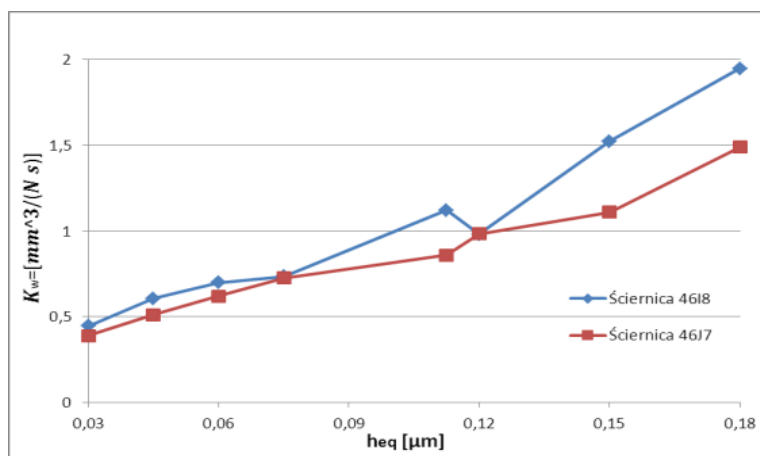
$$h_{eq} = 1000 * \frac{a_e v_p}{v_s} \quad [\mu\text{m}] \quad (10)$$

gdzie:

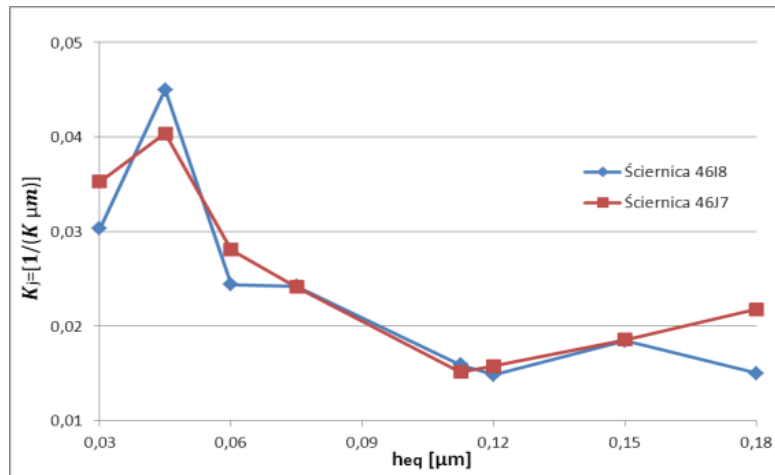
- $a_e$  – dosuw na obrót próbki [mm/obr],
- $v_p$  – prędkość obwodowa próbki [m/s],
- $v_s$  – prędkość obwodowa ściernicy [m/s].

Analizie porównawczej poddano wyniki badań uzyskane podczas szlifowania stali 145Cr6 ściernicami 46I8 oraz 46J7. Wyniki wydajnościowego wskaźnika szlifowalności dla tego materiału, oraz użytych ściernic, przedstawiono na rysunku 3.

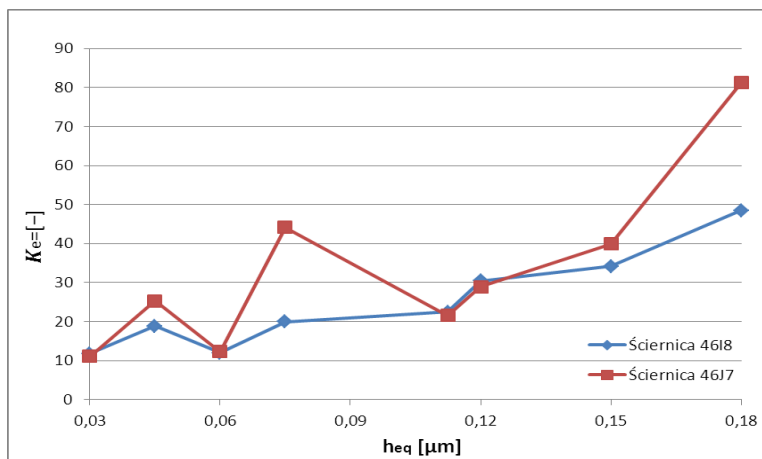
a)



b)



c)



Rys. 3. Wykres wydajnościowego, jakościowego oraz ekonomicznego wskaźnika szlifowalności stali 145Cr6 uzyskany podczas szlifowania z wykorzystaniem ściernic 46I8 oraz 46J7, przedstawiony w funkcji  $h_{eq}$

Jak można zaobserwować na wykresie (rys. 3a), wydajnościowy wskaźnik szlifowalności stali 145Cr6 przy obróbce ściernicami 46I8 oraz 46J7 jest zbliżony. Jedynie dla bardziej intensywnej wartości nastawnej procesu szlifowania większe wartości przyjmował wskaźnik wydajnościowy szlifowalności dla ściernicy 46I8. Potwierdza to pozytywną reakcję wskaźnika, gdyż pomimo niewielkich różnic w charakterystyce narzędzi wartości wskaźnika są różne na korzyść ściernicy ze ścierniwem monokorundowym o bardziej otwartej strukturze.

Największe wartości jakościowego wskaźnika szlifowalności (rys. 3b) dla obydwu par obróbczych uzyskano dla niewielkich wartości nastaw procesu szlifowania skumulowanych w równoważnej grubości wióra  $h_{eq}$ . Z jakościowego punktu widzenia obie ściernice podczas szlifowania stali 145Cr6 zachowują się bardzo podobnie.

Analizując proces szlifowania pod kątem ekonomicznym (rys. 3c) podczas obróbki stali 145Cr6 ogólnie lepsza okazała się ściernica 46J7, gdyż przy jej użyciu uzyskano większe lub porównywalne wartości ekonomicznego wskaźnika szlifowalności materiałów, a więc mniejsze zużycie ściernicy.

Oceniając wybrane pary obróbcze z punktu widzenia wydajnościowego wskaźnika oceny szlifowalności można stwierdzić, że lepsze wyniki uzyskano stosując ściernicę 46I8 (zwłaszcza dla większych wartości  $h_{eq}$ ), natomiast z punktu widzenia ekonomicznego wskaźnika szlifowalności lepszymi własnościami wykazała się ściernica 46J7. Pod względem jakościowym dobór ściernic okazał się równoważny.

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników wielkości mierzonych i opracowanych wskaźników szlifowalności materiałów pod kątem wydajności, jakości oraz ekonomiczności procesu, proponowana metoda oceny szlifowalności wydaje się skuteczna w badanym zakresie wartości nastawnych procesu szlifowania określonym w obszarze dosuwu na obrót próbki do ściernicy  $a_e$  oraz prędkości obwodowej próbki  $v_p$ .

Zastosowanie eksperymentu planowanego mającego głównie na celu ograniczenie liczby wykonywanych testów oraz dobór odpowiednich par wielkości nastawnych procesów szlifowania, umożliwiło dodatkowo opisanie badanego zjawiska równaniem matematycznym, które pozwala na przewidzenie wyników szlifowania i wartości wskaźników dla innych pośrednich punktów z przestrzeni eksperymentu. Zastosowanie funkcji potęgowych okazało się dobrym narzędziem służącym do opisanie testów szlifowania. Przedstawiona metoda oceny szlifowalności materiałów zawiera procedurę przeprowadzania badań, dedykowane stanowisko do oceny szlifowalności oraz sformułowane wskaźniki określające szlifowalność materiałów pod kątem wydajności, jakości i ekonomiczności procesu szlifowania. Zaprezentowane podejście może być rozwiązaniem problemu oceny procesu szlifowania, co potwierdza postawioną hipotezę. Zastosowanie bezstykowych metod pomiaru temperatury dało możliwość łatwego uwzględnienia wpływu ciepła w analizie zagadnień szlifowalności materiałów. Ocena szlifowalności materiałów jest uzależniona od dobranych narzędzi ściernych. Sugeruje się więc oceniać szlifowalność w aspekcie pary obróbczej: przedmiot obrabiany (w określonym stanie po obróbce cieplnej) – ściernica (o określonej charakterystyce).

## 6. LITERATURA

- [1] CHANDE KARE DEVELOPS GRINDABILITY TEST SYSTEM – strona internetowa:  
<http://html.ornl.gov/mituc/chand.html> (5.03.2011).
- [2] OCZOŚ K., PORZYCKI J., Szlifowanie – Podstawy i Technika, WNT Warszawa, 1986.
- [3] OLSZAK W., Obróbka skrawaniem, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008.
- [4] URBANIAK M., SKOWRON M., LEONARCIK R., Zgłoszenie Patentowe nr.: P - 388640, pt.:  
Urządzenie pomiarowe
- [5] URBANIAK M., LEONARCIK R., SZAJDER M., Stanowisko do oceny szlifowalności  
materiałów, Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Gdańsk, wrzesień 2011 r.