

dr inż. Rafał Leonarcik

Sonoco Poland - Packaging Services Sp. z o.o.
Nowy Jozefów 70, 94-406 Łódź, Polska
rafal.leonarcik@sonoco.com

prof. dr hab. inż. Mirosław Urbaniak

Wydział Techniczny
Akademia im. Jakuba z Paradyża
ul. Fryderyka Chopina 52, 66-400 Gorzów Wielkopolski, Polska
murbaniak@ajp.edu.pl

dr inż. Ryszard Dębkowski

Institut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn
Politechnika Łódzka
ul. Stefanowskiego 1/15, 90-924 Łódź, Polska
ryszard.debkowski@p.lodz.pl

Metoda oceny właściwości eksploatacyjnych ściernic

Słowa kluczowe: szlifowanie, ściernica, właściwości eksploatacyjne, charakterystyka ściernicy

Streszczenie: W artykule przedstawiono nową, wielokryterialną metodę, w której grupa trzech wskaźników eksploatacyjnych, wyznaczonych na podstawie danych procesowych z krótkotrwałego testu pracy pary ściernica-przedmiot obrabiany przeprowadzonego na specjalnym stanowisku badawczym, pozwala na liczbowe wartościowanie procesu obróbki pod względem wydajności, jakości i kosztów. Przedstawiono wyniki badań ewaluacji zaproponowanych wskaźników oraz badania aplikacyjne metody w zakresie oceny właściwości eksploatacyjnych ściernic podczas szlifowania stali. W badaniach stosowano ceramiczne ściernice elektrokorundowe oraz stale narzędziowe i konstrukcyjne o różnej twardości. Wyniki doświadczeń wykazały, że zaproponowane formuły wskaźników są skutecznym narzędziem oceny przebiegu i wyników szlifowania dla określonej pary ściernica-materiał w badanym zakresie wartości nastawnych procesu szlifowania. Badania wykazały także, że różnice wartości wskaźników, występujące podczas testów szlifowania określonego rodzaju materiału ściernicami o różnej charakterystyce, są przydatne do optymalizacji wyboru rodzaju narzędzia i warunków obróbki.

1. Wprowadzenie

Szlifowanie jest podstawowym procesem obróbki wykańczającej przedmiotów hartowanych oraz wykonanych z materiałów trudnoobrabialnych, który umożliwia osiągnięcie wysokiej dokładności kształtowo-wymiarowej, niskiej chropowatości powierzchni oraz niskiej wartości naprężeń rozciągających w warstwie wierzchniej [1,15]. Wymienione walory obrabianych powierzchni mają istotne znaczenie dla trwałości i niezawodności części funkcjonujących samodzielnie lub będących składnikami urządzeń [35]. O zgodności wyników szlifowania z wymaganiami nadanymi przedmiotowi obrabianemu w fazie projektowania decyduje sposób zaprojektowania i wykonania operacji szlifierskich. Projektując proces szlifowania należy brać pod uwagę wiele zmiennych, dotyczących

charakterystyki ściernicy i warunków jej eksploatacji, tj. parametrów szlifowania, sposobu chłodzenia strefy obróbki oraz częstotliwości i sposobu wykonania zabiegu obciążania. Każdy z tych czynników ma istotny wpływ na końcowy wynik obróbki, gdyż wpływa na zjawiska zachodzące w strefie kontaktu pary trybologicznej, jaką tworzy ściernica z materiałem szlifowanym. Oddziaływanie ziaren ściernych narzędzia na przedmiot obrabiany można podzielić na trzy etapy [8,11]: odkształcenie sprężyste i tarcie wierzchołka o materiał, odkształcenie plastyczne wraz z tworzeniem się wypływek i tarcie wewnętrzne oraz tworzenie wiórów. Udział każdego z wymienionych etapów w procesie tworzenia wiórów zależy od właściwości przedmiotu obrabianego, parametrów szlifowania, warunków tarcia między ziarnami ściernymi a przedmiotem obrabianym oraz geometrii ostrzy ziaren ściernych [2,11,28]. W wyniku występującego tarcia znaczna część energii mechanicznej jest w dużej mierze przekształcana w ciepło [20,23] wywołując znaczny wzrost temperatury warstwy wierzchniej przedmiotu i jej zmiany strukturalne. Negatywnymi następstwami oddziaływania cieplnego procesu szlifowania są przypalenia warstwy wierzchniej, przemiany fazowe materiału, odpuszczanie (zmiękczenie) z możliwością ponownego utwardzania warstwy wierzchniej, niekorzystne resztkowe naprężenia rozciągające, pęknięcia i zmniejszona wytrzymałość zmęczeniowa [4,20,26]. W celu wyeliminowania negatywnych skutków oddziaływania ciepła na przedmiot obrabiany oraz na powierzchnię ściernicy należy dobrać właściwą ciecz chłodząco-smarującą (CCS), sposób jej podawania do strefy obróbki oraz natężenie przepływu [3,31]. Drugi z elementów pary trybologicznej - ściernica – ulega zużyciu na skutek różnych mechanizmów, których końcowym efektem są zmiany kształtu i właściwości narzędzia podczas obróbki, przez co zmniejsza się wydajność operacji szlifowania i pogarsza jakość obrabianego przedmiotu. Głównymi formami zużywania się powierzchni ściernicy są zużycie ściernic i wykruszenia. Wierzchołki ziaren ściernych ulegają stopniowo wywołanym zużyciem ściernym na skutek tarcia o powierzchnię przedmiotu obrabianego, plastycznym płynięciem wynikającym z wysokiej temperatury oraz ciśnienia a także w wyniku reakcji chemicznych, jakie wstępują na styku z materiałem przedmiotu. Ścieraniu ulegają także mostki spoiwa wiążące ziarna ściernic. Wykruszenie występujące na skutek pęknięcia lub odpryskiwania cząstek ziarna ściernego i mostków spoiwa jest następstwem obciążeń udarowych oraz mechanicznego i termicznego zużycia zmęczeniowego [10,19,22,24,27]. Wymienione formy zużycia nie występują osobno, o dominancja którejś z nich zależy od warunków szlifowania, tj. charakterystyki ściernicy (jej struktury, rodzaju i wielkości materiału ściernego, twardości, rodzaju spoiwa) oraz parametrów szlifowania, które zmieniają siłę wywieraną na ziarna. Każdy z wymienionych rodzajów zużycia ma wpływ na końcowy rezultat obróbki. W przypadku zużycia objętościowego, będącego następstwem wykruszania ziaren i spoiwa, będą występowały błędy kształtu lub odchylenia wymiarowe w przedmiocie obrabianym [29]. Natomiast powstanie płaskich powierzchni na wierzchołkach ziaren powoduje wzrost mocy i energii właściwej szlifowania, uszkodzenia termiczne i utratę dokładności obróbki [19]. Ocenę takiego stanu dokonuje się najskuteczniej optycznymi technikami pomiarowymi [5,18].

Na wzajemne oddziaływanie pary trybologicznej ściernica/przedmiot obrabiany istotny wpływ wywiera liczba aktywnych krawędzi skrawających występujących na powierzchni ściernicy. Niestety z uwagi na losowy rozkład ziaren ściernych w ściernicy oraz przyjmowane warunki obciążania liczba aktywnych krawędzi skrawających nie jest dla określonego rodzaju ściernicy wartością stałą [17,39]. Od liczby i równomierności rozkładu aktywnych krawędzi skrawających zależą siły szlifowania, otrzymywana chropowatość powierzchni oraz temperatura i wydajność procesu szlifowania [30]. Stąd w celu lepszej kontroli nad procesem szlifowania rozwija się grupa narzędzi o zdefiniowanym położeniu ziaren ściernych [9,40].

Jak z przedstawionego wyżej opisu wynika efekt operacji szlifierskiej zależy od wielu jednocześnie występujących czynników mających wpływ na wzajemne oddziaływanie pary przedmiot obrabiany – ściernica. Właściwy dobór ściernicy decyduje o powodzeniu operacji szlifowania. Właściwości ściernicy w interakcji z parametrami szlifowania i materiałem obrabianym mają decydujący wpływ na wydajność i osiągalną jakość przedmiotu obrabianego.

Ocenę właściwości eksploatacyjnych ściernicy można wykonać na podstawie wielkości fizycznych towarzyszących procesowi szlifowania oraz wielkości opisujących wynik obróbki [34]. Stawianie wniosków na podstawie wartości jednej wielkości nie jest wystarczająco miarodajne. Stąd w literaturze, m.in. [16,25], można znaleźć propozycje wskaźników szlifowania, które za pomocą równań matematycznych łączą kilka charakterystycznych wielkości, dzięki czemu jeden wskaźnik umożliwia wielostronną lub tematycznie ukierunkowaną ocenę badanego procesu. Wskaźniki te uwzględniają aspekty wydajnościowe, energetyczne i jakościowe procesu szlifowania i zawierają w swych formułach uznane [11,12,14,21,33,38] wielkości procesowe szlifowania, takie jak siła, moc, temperatura oraz wydajność szlifowania, zużycie ściernicy, amplituda drgań i emisja akustyczna a także wynik szlifowania w postaci parametrów oceny struktury geometrycznej powierzchni, czy też strefy wpływu ciepła.

Przykłady wskaźników, na podstawie których można orzekać o przebiegu procesu szlifowania a w tym o właściwościach eksploatacyjnych ściernic, przedstawiają wzory (1)-(4). Podstawowy wskaźnik szlifowania (tzw. *G*-ratio) określony jest wzorem (1). Jego wysoka wartość wskazuje, że przyjęta charakterystyka ściernicy i warunki szlifowania zapewniają dużą wydajność względną szlifowania, w wyniku czego udział kosztów narzędzia w kosztach operacji szlifowania jest niski.

$$G = \frac{V_m}{V_s} \quad (1)$$

gdzie:

V_m – objętość zeszlifowanego materiału,

V_s – zużycie objętościowe ściernicy.

Wskaźniki K_s opisane wzorami (2) [16] i (3) [25] ujmują szeroki zakres wielkości procesowych szlifowania. W liczniku obu wzorów znajdują się wielkości, które przyjmują duże wartości przy wysokiej wydajności procesu szlifowania oraz małym zużyciu ściernicy. Mianownik przyjmuje natomiast mniejsze wartości, gdy efektem szlifowania jest gładka powierzchnia a obróbka wymaga niskich nakładów energetycznych. Porównując przy pomocy tych wskaźników procesy szlifowania za lepszy uznaje się ten, dla którego wskaźniki przybierają większą wartość.

$$K_s = \frac{Z'_{max} \cdot G \cdot V'_w}{Rz \cdot W_{sp}} \quad (2)$$

$$K_s = \frac{G}{P_s \cdot Ra} \quad (3)$$

gdzie:

Z'_{max} – właściwa maksymalna wydajność objętościowa szlifowania [$\text{mm}^3/(\text{mm} \cdot \text{s})$],

V'_w – właściwy ubytek materiału [mm^3/mm],

Rz, Ra – parametry chropowatości powierzchni obrabianej [μm],

W_{sp} – specyficzna energia szlifowania ($W_{sp} = P_s / Z'_{max}$ [$\text{W}/\text{mm}^3/(\text{mm}/\text{s})$]),

P_s – moc szlifowania [W].

Wskaźnik Q'_t wg wzoru (4) [6], służący do oceny zdolności skrawnej czynnej powierzchni ściernicy, bazuje na wielkościach otrzymanych z testów wykonanych specjalnym

urządzeniem poza strefą obróbki. Określa on prędkość ubytku liniowego próbki (testera) dosuwanej ze stałą siłą do wirującej ściernicy.

$$Q'_t = \frac{\Delta l}{\Delta t} \quad (4)$$

gdzie:

Δl – ubytek długości testera [μm],

Δt – czas szlifowania testera [s].

Podobną zasadę pomiaru zastosowali twórcy wskaźnika G_c [7] do oceny procesu szlifowania próbek z materiałów ceramicznych diamentowymi taśmami ściernymi. Półka podczas testu na specjalnym urządzeniu badawczym dosuwana jest ze stałą, kontrolowaną siłą do taśmy ścierniej. Wydajność objętościowa Z_w prowadzonego w takich warunkach szlifowania jest funkcją siły normalnej szlifowania F_n , prędkości taśmy v_s , oraz właściwości materiału próbki Φ_c i właściwości skrawnych taśmy Φ_d . Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych autorzy [7] stwierdzili, że wydajność objętościowa szlifowania jest proporcjonalna zarówno do prędkości taśmy v_s , jak i siły normalnej szlifowania F_n . Przyjęli więc, że wskaźnik G_c charakteryzujący wzajemne oddziaływanie pary próbka-taśma ścierna będzie definiowany wzorem (5). Jego wartość, zależnie od przyjętej w badaniach konfiguracji pary: ten sam rodzaj taśmy ścierniej-różne materiały próbek lub różne taśmy ściernie-ten sam materiał próbki, będzie zależała odpowiednio od właściwości materiału próbki lub zdolności skrawnej taśmy ścierniej.

$$G_c = \frac{Z_w}{v_s F_n} \quad (5)$$

gdzie:

Z_w – wydajność objętościowa szlifowania [mm^3/s],

v_s – prędkość obwodowa taśmy ścierniej [m/s],

F_n – siła normalna [N].

Na podstawie przytoczonych przykładów można zauważyć, że liczba wielkości na podstawie których określana jest wartość wskaźnika, zależy od przyjętych kryteriów oceny oraz poglądu twórców na sposób tej oceny. Uwzględnienie we wskaźniku bardzo wielu wielkości charakteryzujących proces szlifowania nie jest jednak korzystne ze względu m.in. na różną ich zmienność w czasie trwającego procesu. Dlatego dąży się, aby zawierał on jedynie wielkości ujmujące oczekiwany efekt szlifowania. I tak, jeśli celem szlifowania jest uzyskanie wysokiej jakości obróbki, którą charakteryzuje niska chropowatość obrabianej powierzchni oraz brak uszkodzeń cieplnych warstwy wierzchniej przedmiotu obrabianego, to wskaźnik K_{s1} powinien być odwrotnie proporcjonalny do parametrów opisujących te wymagania (np. parametru Ra oraz głębokości strefy wpływu ciepła z_T), wzór (6) [25].

$$K_{s1} = f\left(\frac{1}{Ra, z_T}\right) \quad (6)$$

W przypadku, gdy celem szlifowania jest duża wydajność, wskaźnik winien uwzględniać te charakterystyki procesu, które będą definiowały objętość usuwanej warstwy w jednostce czasu oraz te wielkości, które mogą temu procesowi towarzyszyć i jednocześnie go zakłócać. Pierwsze winny znaleźć się w liczniku podnosząc wartość wskaźnika dla wydajnego procesu a drugie w mianowniku, by zmniejszyć wartość wskaźnika, jeśli negatywne zjawiska ocenianego procesu będą na wysokim poziomie. Przykład takiego wskaźnika przedstawia wzór (7), w którym proponuje się zastosować takie charakterystyki jak maksymalna

wydajność objętościowa szlifowania Z'_{max} , właściwy ubytek materiału obrabianego V'_m oraz amplitudę drgań x_d i stopień zalepienia czynnej powierzchni ściernicy – A_z [25].

$$K_{s2} = f\left(\frac{Z'_{max} V'_m}{x_d, A_z}\right) \quad (7)$$

Ocena procesu szlifowania w aspekcie ekonomicznym winna głównie uwzględniać szybkość zużywania się ściernicy oraz nakłady energetyczne związane z procesem obróbki. Wskaźnik, który realizuje powyższy cel (8), zawiera w liczniku wskaźnika szlifowania G , który odnosi objętość zeszlifowanego materiału do objętościowego zużycia ściernicy, a w mianowniku wielkości które niekorzystnie wpływają na wynik szlifowania, ale jednocześnie świadczą o nakładach energetycznych na proces obróbki, tj. temperaturę szlifowania T_{max} , składowe siły szlifowania F_n i F_t , amplitudę drgań x_d oraz stopień zalepienia ściernicy A_z [25].

$$K_{s3} = \frac{G}{f(T_{max}, F_n, F_t, x_d, A_z)} \quad (8)$$

Pomimo stosowania we wskaźnikach kilku wielkości mierzalnych, nie uzyskano jeszcze takich rezultatów, które potwierdziłyby, że jest możliwe określenie za pomocą jednego równania, przebiegu i wyników procesu szlifowania. Dlatego w celu uzyskania przejrzystej informacji o badanym procesie powinno stosować się kilka wskaźników, właściwie dobranych do przyjętych kryteriów. Przyczynia się to także do zmniejszenia niezbędnej liczby analizowanych czynników a przez to do łatwiejszej realizacji badań. Wyznaczenie wartości wielkości procesowych, które są stosowane we wskaźnikach, wymaga wykonywania badań z wykorzystaniem aparatury kontrolno-pomiarowej dostępnej w większości przypadków tylko w laboratoriach badawczych a nie w warunkach produkcyjnych. Stanowi to barierę dla precyzyjnego i sprawnego projektowania przemysłowych operacji szlifierskich pod kątem optymalizowania właściwości eksploatacyjnych ściernic.

Powyższa konkluzja skłoniła autorów pracy do podjęcia dwojakiego rodzaju działań. Pierwszym było opracowanie zespołu wskaźników, które w możliwie szerokim zakresie charakteryzowałyby przebieg i wyniki procesu szlifowania i były przydatne do oceny porównawczej właściwości eksploatacyjnych ściernic. Drugim działaniem było zaprojektowanie urządzenia, przydatnego zarówno w warunkach laboratoryjnych jak i przemysłowych, do wykonywania krótkotrwałych testów szlifowania, na podstawie których można wyznaczać wartości parametrów zastosowanych we wskaźnikach.

2. Opis metody oceny właściwości eksploatacyjnych ściernic

W celu oceny właściwości eksploatacyjnych zaproponowano grupę trzech wskaźników, które opisują proces szlifowania przy użyciu badanych ściernic pod kątem wydajności, jakości i ekonomiczności.

Przyjęto, że wskaźnik oceny wydajności K_w będzie określony równaniem (9).

$$K_w = \frac{Z'}{F'_t} \left[\frac{mm^3}{N \cdot s} \right] \quad (9)$$

gdzie:

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

F'_t – właściwa składowa styczna siły szlifowania [N/mm].

W proponowanym równaniu objętość usuwanego naddatku obróbkowego powiązано ze składową styczną siły szlifowania, która występuje w czasie skrawania. Zależność określa

ilość zeszlifowanego w jednostce czasu materiału przypadającą na jednostkę składowej stycznej siły szlifowania. Większa wartość wskaźnika oznacza lepszą wydajność.

Wskaźnik K_j , ujmujący jakość warstwy wierzchniej przedmiotu szlifowanego, określono zależnością (10).

$$K_j = \frac{F_n}{Ra \cdot F_t \cdot \Delta T_p} \left[\frac{1}{K \cdot \mu m} \right] \quad (10)$$

gdzie:

F_t – składowa styczna siły szlifowania [N],

F_n – składowa normalna siły szlifowania [N],

ΔT_p – przyrost temperatury próbki w czasie próby [K],

Ra – chropowatość powierzchni próbki [μm].

Zastosowany we wskaźniku iloraz składowych siły szlifowania (F_n/F_t) można traktować jako odwrotność współczynnika kontaktu tribologicznego łączącego usuwanie naddatku i tarcie występujące w procesie szlifowania przedmiotu ściernicą. Rosnąca jego wartość wskazuje na mniejsze gładzące oddziaływanie ściernicy. Drugim czynnikiem, istotnym dla jakości warstwy wierzchniej przedmiotu, jest przepływ ciepła. Uwzględniono to wprowadzając do wskaźnika przyrost temperatury powierzchni szlifowanej ΔT_p . Natomiast stan struktury geometrycznej powierzchni uwzględniono przez wprowadzenie parametru chropowatości przedmiotu Ra .

Jako wskaźnik K_e (11), którego zadaniem jest opis procesu obróbki pod kątem ekonomicznym, przyjęto uznany w literaturze wskaźnik szlifowania G -ratio wyrażający wydajność względną szlifowania. Jego wartość jest ilorzem objętości zeszlifowanego materiału V_m i zużytej w tym celu objętości materiału ściernicy V_s .

$$K_e = G \quad (11)$$

Ocena procesu szlifowania na podstawie trzech wskaźników może dać pełniejszy obraz relacji zachodzących pomiędzy ściernicą a przedmiotem obrabianym, umożliwiając analizowanie właściwości eksploatacyjnych ściernic pod kątem wydajności, osiąganego jakości obrabianej powierzchni oraz udziału narzędzia w kosztach operacji. Przyjęte wskaźniki opracowano mając także na uwadze możliwość ich praktycznego zastosowania, zwracając uwagę na zakres przyjętych kryteriów oceny oraz możliwość łatwej interpretacji otrzymanych wyników.

3. Urządzenie do badań eksploatacyjnych ściernic

Jednym z głównych założeń projektowych budowy urządzenia była możliwość jego aplikacji w warunkach przemysłowych oraz zapewnienie możliwości jego stosowania na różnych szlifierkach. Zaprojektowane urządzenie, którego schemat przedstawia rysunek 1, dostosowane jest do wykonywania badań na szlifierkach do płaszczyzn. Zasada działania urządzenia polega na nadawaniu ruchu obrotowego walcowej próbce 1 i wywołaniu jej dosuwu ze stałą prędkością do czynnej powierzchni ściernicy 9. Po zetknięciu z wirującą ściernicą powierzchnia walcowa próbki ulega szlifowaniu wgłębniemu. Zastosowane napędy ruchu obrotowego i promieniowego próbki zapewniają kontrolę wydajności przebiegającej obróbki.

W konstrukcji urządzenia można wyróżnić (rys. 1):

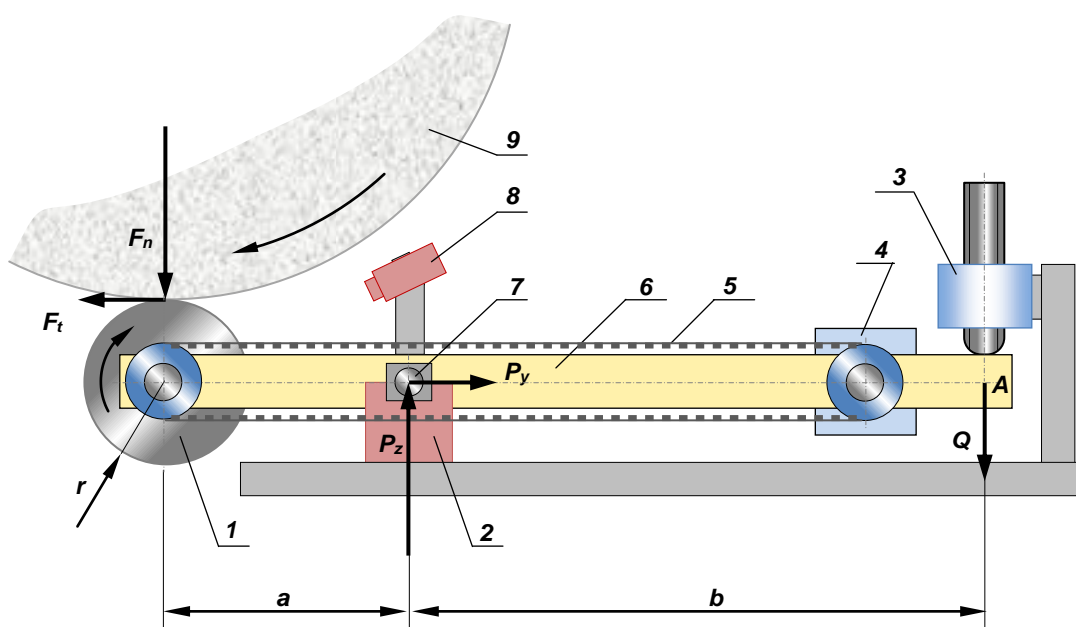
- zespół próbki z napędem pasowym 5 umieszczony na łożyskowanej tocznie dźwigni dwuramiennej 6,
- oś dźwigni 7, która jest zamocowana bezpośrednio na piezoelektrycznym, trójskładowym czujniku siły 2,

- pirometr punktowy 8 zamocowany na dźwigni prostopadle do powierzchni próbki szlifowanej 1,
- aktuator 3 ze śrubą naciskową dźwigni.

Umieszczenie siłomierza pod osią dźwigni umożliwiło ocenę sił szlifowania. Z rozkładu sił występujących w czasie szlifowania (rys.1) i ich rzutowania na kierunek dźwigni wynika, że rejestrowana przez siłomierz składowa pozioma siły P_y ma wartość stycznej siły szlifowania F_t . Natomiast składową normalną siły szlifowania F_n można określić na podstawie równania (12), wyznaczonego z warunków równowagi momentów względem punktu przyłożenia siły zewnętrznej Q (punkt A na rysunku 1).

$$F_n = \frac{P_z \cdot b - F_t \cdot r}{a+b} \quad (12)$$

Opisane urządzenie zostało opatentowane [37] a konstrukcję stanowiska, układ sterowania automatycznego i aplikację cyklu pomiarowego szlifowalności przedstawiono w pracy [36].



Rys. 1. Schemat urządzenia do badań eksploatacyjnych ściernic
 1 – próbka, 2 – siłomierz Kistler typ 9317B, 3 – aktuator, 4 – silnik napędu próbki, 5 – pas zębaty, 6 – dźwignia, 7 – oś dźwigni, 8 – pirometr, 9 – ściernica

4. Ewaluacja wskaźników właściwości eksploatacyjnych ściernic

W celu oceny, czy zaprojektowane formuły wskaźników oraz sposób pozyskiwania danych niezbędnych do ich wyznaczenia umożliwia uzyskanie informacji przydatnych do obiektywnej oceny właściwości eksploatacyjnych ściernic, wykonano badania w różnych warunkach szlifowania, tj.:

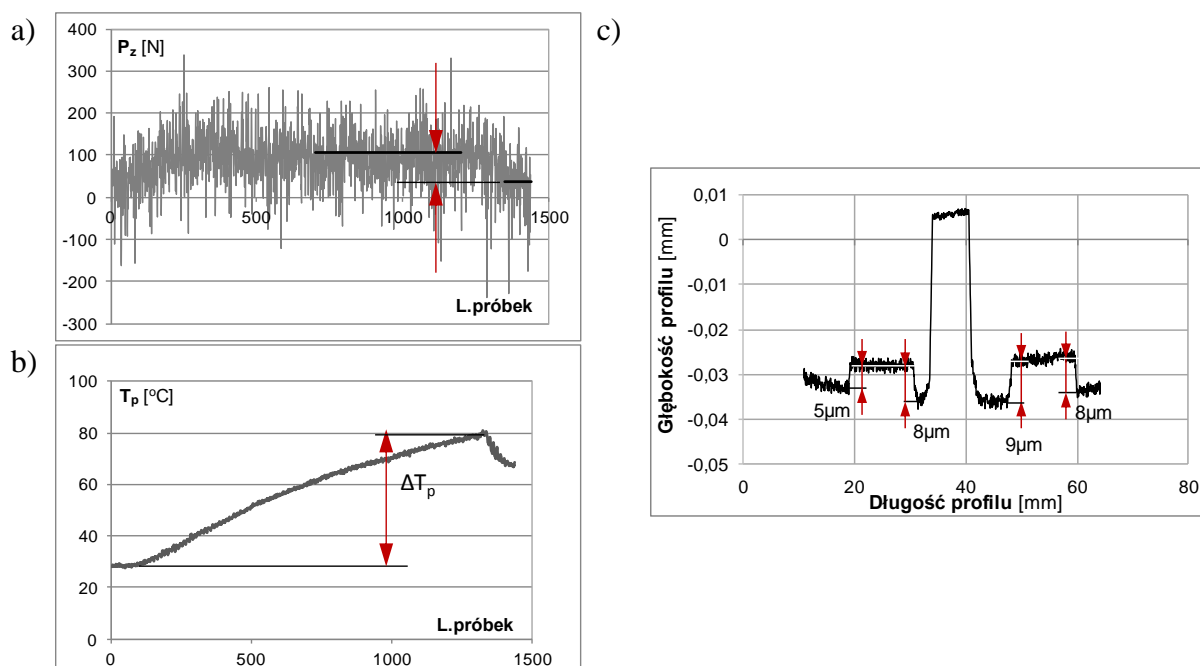
- szlifowanie z różnymi wartościami nastawnymi na urządzeniu testowym,
- szlifowanie powierzchni płaskich i walcowych,
- szlifowanie na sucho i z użyciem cieczy chłodząco-smarującej.

Badania wykonano na szlifierce do płaszczyzn SPG 30x80 (PONAR-Głowno). Szlifowano próbki ze stali narzędziowej do pracy na zimno (145Cr6 – 65HRC) ściernicą z elektrokorundu szlachetnego 1-350x20x127-99A46J7VE01-35. Każdy test, dla wynikającego z planu badań zestawienia parametrów szlifowania, powtarzano 3-krotnie. Utrzymanie jednakowej zdolności skrawnej ściernicy w trakcie badań zapewniono poprzez wykonywanie przed każdym testem zabiegu obciążania. Do obciążania używano obciążacza diamentowego jednoziarnistego o znanej czynnej szerokości diamentu b_d . Posuw obciążania f_d dobierano w taki sposób, by zachować tę samą wartość wskaźnika pokrycia przy obciążaniu $k_d = 1,5$ (równanie (13)). Dosuw obciążania a_d wynosił 0,01mm/przejsięcie.

$$k_d = \frac{b_d}{f_d} \quad (13)$$

Podczas testów wykonywano pomiary:

- wielkości sił obciążających siłomierz w kierunkach Z i X. Wyniki tych pomiarów stanowiły podstawę do wyznaczenia składowych sił szlifowania. Wielkość obciążenia siłomierza wynikająca z procesu obróbki obliczano jako różnicę wskazań siłomierza, które zarejestrowano w końcowej części testu podczas stabilnego przebiegu szlifowania oraz w momencie, gdy nie występował styk ściernicy z przedmiotem (rys. 2a),
- przyrostu temperatury warstwy wierzchniej przedmiotu (rys. 2b),
- zużycia ściernicy po każdym z testów (rys. 2c),
- chropowatości próbek (do obliczeń przyjmowano średnią z 5 pomiarów wykonanych na obwodzie próbki).



Rys. 2. Wyniki pomiarów:

- a) siły P_z obciążenia siłomierza, b) temperatury powierzchni próbki, c) zużycia ściernicy

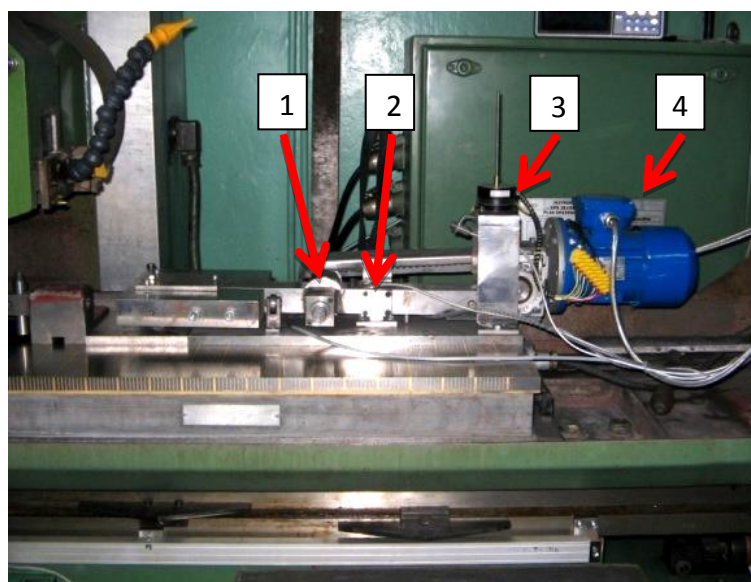
Zużycie ściernicy oceniano na podstawie profilogramu otrzymanego z odwzorowania kształtu rowka, który powstał na obwodzie ściernicy w wyniku procesów zużycia zachodzących podczas szlifowania próbki o mniejszej szerokości od tworzącej ściernicy. Pomiar wykonywano kształtografem firmy Hommelwerke. Przykładowy wynik profilografowania dwóch ściernic przedstawiono na rysunku 2c.

Badania reakcji wskaźników (9)-(11) w obszarze zmienności parametrów szlifowania przeprowadzono na opisanym w p.3 urządzeniu testowym – rys.3.

Testy wykonano według eksperymentu planowanego. Jako wielkości wejściowe badań przyjęto dosuw próbki a_e oraz prędkość obwodową próbki v_p . Badania przeprowadzono według planu 3^2 – trójwartościowego, dwuparametrowego, pełnego, który wygenerowano w module DOE programu Statistica. Wybrano losową opcję jego układu, by uniknąć błędów systematycznych w wynikach prowadzonych doświadczeń. Testy polegały na wykonywaniu 1-minutowych prób wgłębnego szlifowania próbek walcowych. Zastosowane w testach wartości parametrów szlifowania zestawiono w tabeli 1. W trakcie szlifowania nie stosowano cieczy chłodząco-smarującej.

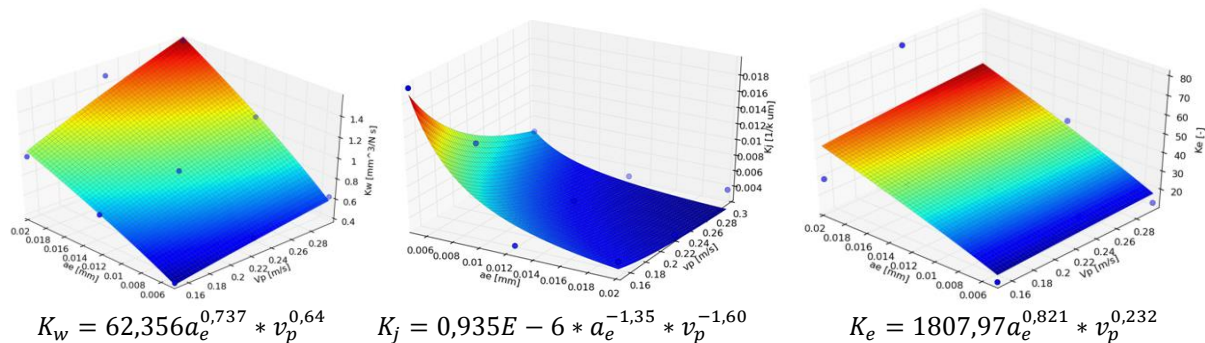
Tabela 1. Wartości parametrów wejściowych badań

Parametr	Wartość
a_e [mm/obr]	0,005; 0,0125; 0,02
v_p [m/s]	0,15; 0,225; 0,3
v_s [m/s]	26



Rys. 3. Urządzenie do badania właściwości eksploatacyjnych ściernic ustawione na stole szlifierki SPG 30x80
1 – szlifowana próbka, 2 – pirometr, 3 – aktuator, 4 – silnik trójfazowy

Na rysunku 4 przedstawiono wykresy oraz równania funkcji aproksymujących wartości wskaźników K_w , K_j , K_e , których parametrami są dosuw a_e i prędkość v_p . Aproksymacji wyników badań dokonano za pomocą funkcji potęgowych, często stosowanych w modelowaniu zjawisk z obszaru obróbki ścierniej. Funkcje te dobrze oddają główne tendencje w relacjach pomiędzy zmiennymi wejściowymi i wynikami procesu oraz nie są podatne na przypadkowe odchylenia wielkości mierzonych. Do wygenerowania postaci funkcji oraz ich graficznych prezentacji wykorzystano program CurveExpert Professional v.1.5.



Rys. 4. Zależność wskaźników właściwości eksploatacyjnych ściernic od parametrów szlifowania (materiał szlifowany 145Cr6, ściernica 99A46J7VE01)

Zaprezentowane wykresy pokazują, że wskaźniki obliczone według zaproponowanych formuł właściwie reagują na zmianę parametrów nastawnych procesu szlifowania.

We wskaźniku wydajności procesu szlifowania K_w (9), wartość właściwej stycznej siły szlifowania nie wprowadza zaburzenia w spodziewanym jego wzroście wynikającym z zastosowania bardziej intensywnych warunków obróbki. Oznacza to, że dla określonych nastaw procesu szlifowania większe wartości wskaźnika będą wykazywały te pary materiał/ściernica, w których łatwiej usuwany jest naddatek obróbkowy.

Podobnie zachowuje się wskaźnik jakości szlifowania K_j (10), który dla najbardziej łagodnych (lekkich) warunków obróbki, przewidujących otrzymanie najmniejszych naprężeń oraz chropowatości warstwy wierzchniej, reaguje najwyższymi wartościami.

W przypadku wskaźnika K_e (G -ratio) potwierdziło się znane z literatury zwiększanie się jego wartości jako reakcji na bardziej intensywną obróbkę z wysokimi wartościami parametrów skrawania.

Bazą do określenia, jak reagują wskaźniki przy stosowaniu różnych odmian szlifowania, tj. podczas obróbki powierzchni walcowych i płaszczyzn, były wyniki testów przeprowadzone na zaprojektowanym urządzeniu oraz bezpośrednio na szlifierce do płaszczyzn, którą wyposażono w siłomierz firmy Kistler (model 9275) oraz ten sam typ pirometru jak w urządzeniu testowym. W obu przypadkach zastosowano takie same wartości parametrów nastawczych procesu szlifowania (tab. 1). W badaniach szlifowania płaszczyzn użyto prostopadłościennych próbek, w których powierzchnia obrabiana miała wymiary 10x250 mm. Próby szlifowania wykonano bez użycia cieczy chłodząco-smarującej.

Na rysunku 5 przedstawiono wykresy obrazujące uzyskane wyniki badań. Wielkości nastawne procesu szlifowania, tj. a_e , v_p , v_s zastąpiono jednym parametrem h_{eq} (równoważnej grubości wiórów (14), który charakteryzuje jego intensywność.

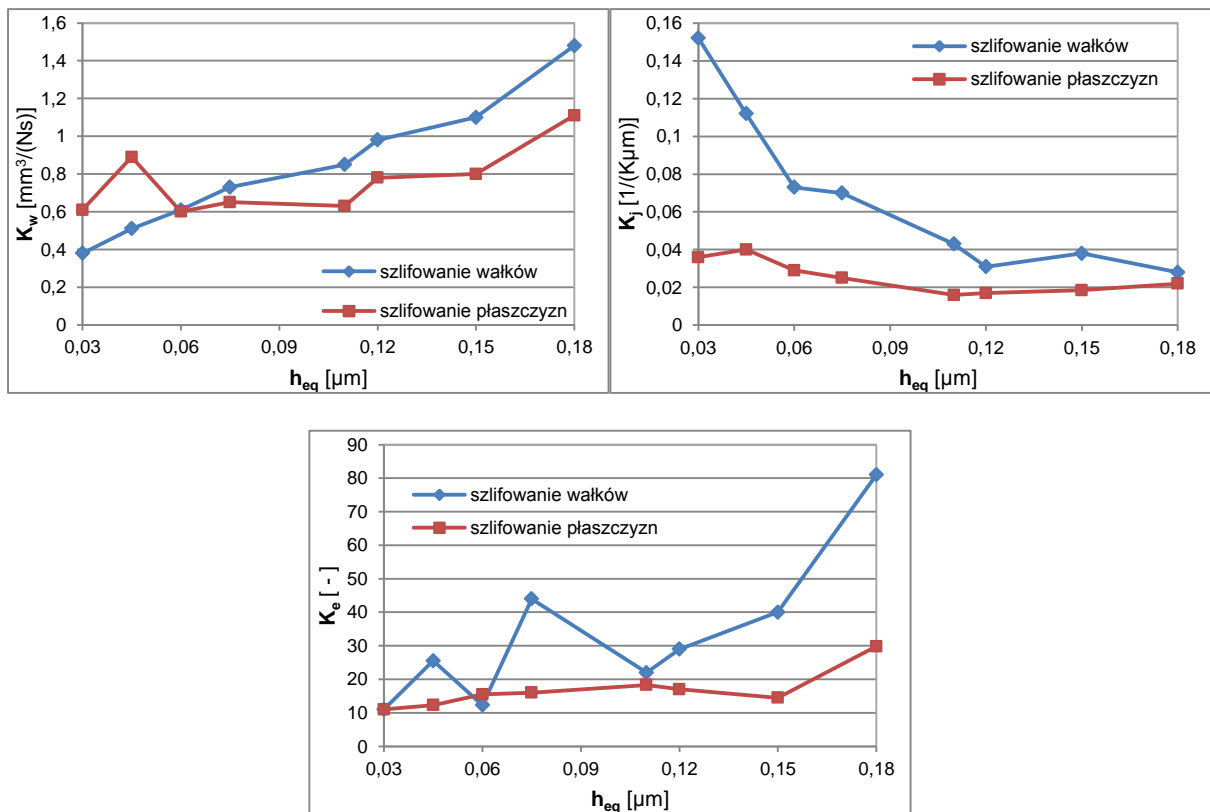
$$h_{eq} = \frac{a_e \cdot v_p}{v_s} [mm] \quad (14)$$

gdzie:

a_e – dosuw na obrót próbki [mm],

v_p – prędkość obwodowa próbki [m/s],

v_s – prędkość obwodowa ściernicy [m/s].



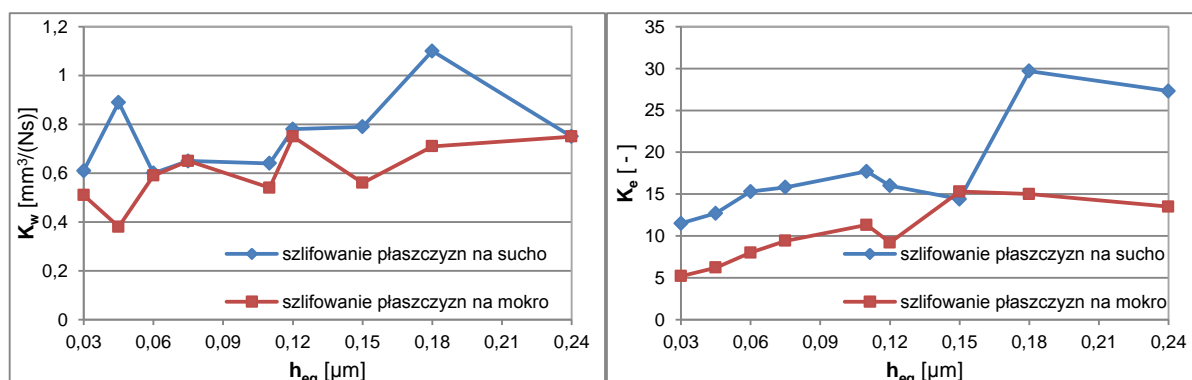
Rys.5. Zależność wartości wskaźników eksploatacyjnych właściwości ściernic K_w , K_j i K_e od parametrów szlifowania podczas szlifowania wałków i płaszczyzn

Wyniki przeprowadzonych badań wykazują istotną różnicę wartości wskaźników opisujących właściwości eksploatacyjne ściernicy użytej do szlifowania węgłnego wałków i płaszczyzn (rysunek 5). Zróżnicowanie to wynika z odmiennych warunków pracy ściernicy w obu przypadkach. Ciepło generowane podczas szlifowania wałka znacznie szybciej podnosi temperaturę próbki, gdyż ściernica pozostaje w ciągłym kontakcie z powierzchnią obrabianą. W przypadku szlifowania płaszczyzn podczas wybiegów i nawrotów ściernica nie wykonuje szlifowania, więc ciepło zakumulowane przez próbkę i ściernicę ulega rozproszeniu. Natomiast większa długość strefy kontaktu ściernicy z przedmiotem obrabianym oraz przerywany proces skrawania podczas szlifowania płaszczyzn, wywołuje intensywniejsze zużycie ściernicy. Przyczyniają się do tego większe obciążenia jakich doznają ziarna ściernic w strefie tworzenia wióra oraz podczas uderzania ściernicy o krawędź próbki po nawrocie. Powyższe procesy mają swoje odbicie w wartościach wyznaczanych wskaźników. Wzrost temperatury próbki walcowej w coraz intensywniejszych warunkach szlifowania nie jest rekompensowany przez niższą wartość siły szlifowania, przez co wskaźnik jakości szlifowania K_j ma coraz niższą wartość i zbliża się do wartości osiągniętej podczas szlifowania płaszczyzn. Zaskakujący jest natomiast niewielki wzrost tego wskaźnika podczas szlifowania płaszczyzn przy stosowaniu największych wartości parametrów nastawnych. Jak wynika ze wzoru (10), musiał mieć w tym przypadku miejsce nieproporcjonalnie większy wzrost siły normalnej szlifowania w stosunku do pozostałych wielkości zastosowanych we wskaźniku. Można przypuszczać, że było to następstwem braku zdolności skrawania takiej grubości wiórów, czego dalszą konsekwencją było zwiększenie tarcia i wzrost zużycia ściernicy. Wskaźnik efektywności ekonomicznej procesu K_e potwierdza to przypuszczenie, przyjmując mniejszą wartość dla tych warunków szlifowania.

Jak można zauważyć, większą dynamiką zmian charakteryzują się wykresy wskaźników oceny właściwości ściernic otrzymane w badaniach szlifowania powierzchni walcowych.

Oznacza to, że wskaźniki charakteryzują się większą czułością na zmiany warunków obróbki i że w opracowanej metodzie zastosowano właściwą odmianę szlifowania.

Badania ewaluacyjne wskaźników w zakresie szlifowania na sucho i z użyciem cieczy chłodząco-smarującej (CCS) wykonano w warunkach szlifowania płaszczyzn. Ze względu na brak możliwości wykonywania pomiarów pirometrem podczas szlifowania z zastosowaniem CCS, nie wyznaczano wskaźnika jakościowego K_j , w którego formule występuje czynnik ΔT_p określający przyrost temperatury powierzchni próbki. Do dalszych analiz wyznaczono wskaźniki K_w i K_e a zależność ich wartości od parametrów nastawnych szlifowania przedstawiono na rysunku 6.



Rys.6. Zależność wartości wskaźników eksploatacyjnych właściwości ściernic K_w i K_e od parametrów szlifowania podczas szlifowania płaszczyzn na sucho i z użyciem CCS

Wyższe, korzystniejsze wartości z uwagi na właściwości eksploatacyjne ściernicy, przyjmowały oba wskaźniki w operacjach szlifowania przeprowadzanych bez użycia CCS. Zastosowanie cieczy chłodząco-smarującej wpływa na zmniejszenie tarcia pomiędzy ściernicą a przedmiotem obrabianym utrudniając proces tworzenia wióra. Obniżenie sił tarcia między ostrzem a materiałem obrabianym, wywołuje zmniejszenie naprężeń stycznych τ , jakie powstają w strefie tworzenia wióra a tym samym wzrasta wymagana głębokość wcięcia ostrza w materiał, niezbędna do uformowania wióra (15) [32].

$$h_{\mu} = \rho_k \left\{ 1 - (\cos\eta) \sqrt{0,5 \left(1 + \frac{\tau}{k} \right)} + (\sin\eta) \sqrt{0,5 \left(1 - \frac{\tau}{k} \right)} \right\} \quad (15)$$

gdzie:

- h_{μ} – progowa głębokość wcięcia [µm],
- ρ_k – promień kuli opisanej na ziarnie ściernym [µm],
- η – kąt wcinania [°],
- k – granica plastyczności materiału przy ścinaniu [MPa],
- τ – naprężenia styczne [MPa].

Z uwagi na przestrzenny rozkład ostrzy na czynnej powierzchni ściernicy, liczba tych, które będą zdolne wciąć się na wymaganą głębokość maleje. Stąd wskaźniki wydajności K_w oraz efektywności wykorzystania narzędzia K_e przy szlifowaniu na sucho przyjmują korzystniejsze, większe wartości. Wyższa wartość K_e przy szlifowaniu na sucho dowodzi także, że ograniczenie ściernego zużycia ściernicy na skutek zastosowania CCS, nie rekompensuje większej wydajności szlifowania, jaka osiągnięta jest podczas szlifowania na sucho.

Omówione wyżej badania wykazały, że niezależnie od przyjętych warunków szlifowania zaproponowany zestaw wskaźników oraz sposób ich wyznaczania poprawnie wartościują przebieg procesu szlifowania w trzech, istotnych z punktu widzenia użytkowego

aspektach i są przydatne do oceny właściwości eksploatacyjnych ściernic. W związku z powyższym należy uznać, że przedstawione formuły wskaźników są skutecznym narzędziem oceny przebiegu i wyników szlifowania dla określonej pary ściernica/materiał w badanym zakresie wartości nastawnych procesu szlifowania, tj. dosuwu na obrót próbki do ściernicy a_e oraz prędkości obwodowej próbki v_p .

5. Badania porównawcze właściwości eksploatacyjnych ściernic podczas szlifowania stali

Weryfikację możliwości aplikacyjnych omówionej metody przeprowadzono w zakresie wyboru ściernic do zadania obróbkowego. Badania polegały na sprawdzeniu reakcji wskaźników K_w , K_j , K_e przy zmianie rodzaju ściernicy zastosowanej do obróbki określonego typu materiału. Ocenie poddano przebieg i wyniki procesu szlifowania realizowanego dwiema ściernicami dobranymi według zaleceń zawartych w katalogu producenta [13]. Są to ściernice z elektrokorundu szlachetnego i monokorundu o zróżnicowanej ziarnistości, twardości i strukturze. Badania przeprowadzono dla grupy czterech materiałów, które standardowo stosuje się na części poddawane utwardzaniu cieplnemu i szlifowaniu.

W tabeli 2 zestawiono użyte w badaniach materiały próbek i charakterystyki ściernic zalecanych katalogowo do ich szlifowania. Obok charakterystyki ściernicy podano w nawiasie oznaczenie, które jest stosowane w dalszej części tekstu artykułu. Testy wykonano na zaprojektowanym urządzeniu, stosując takie same warunki prowadzenia eksperymentu oraz warunki szlifowania jak we wcześniej opisanej ewaluacji wskaźników.

Tabela 2. Charakterystyka próbek i ściernic użytych w badaniach

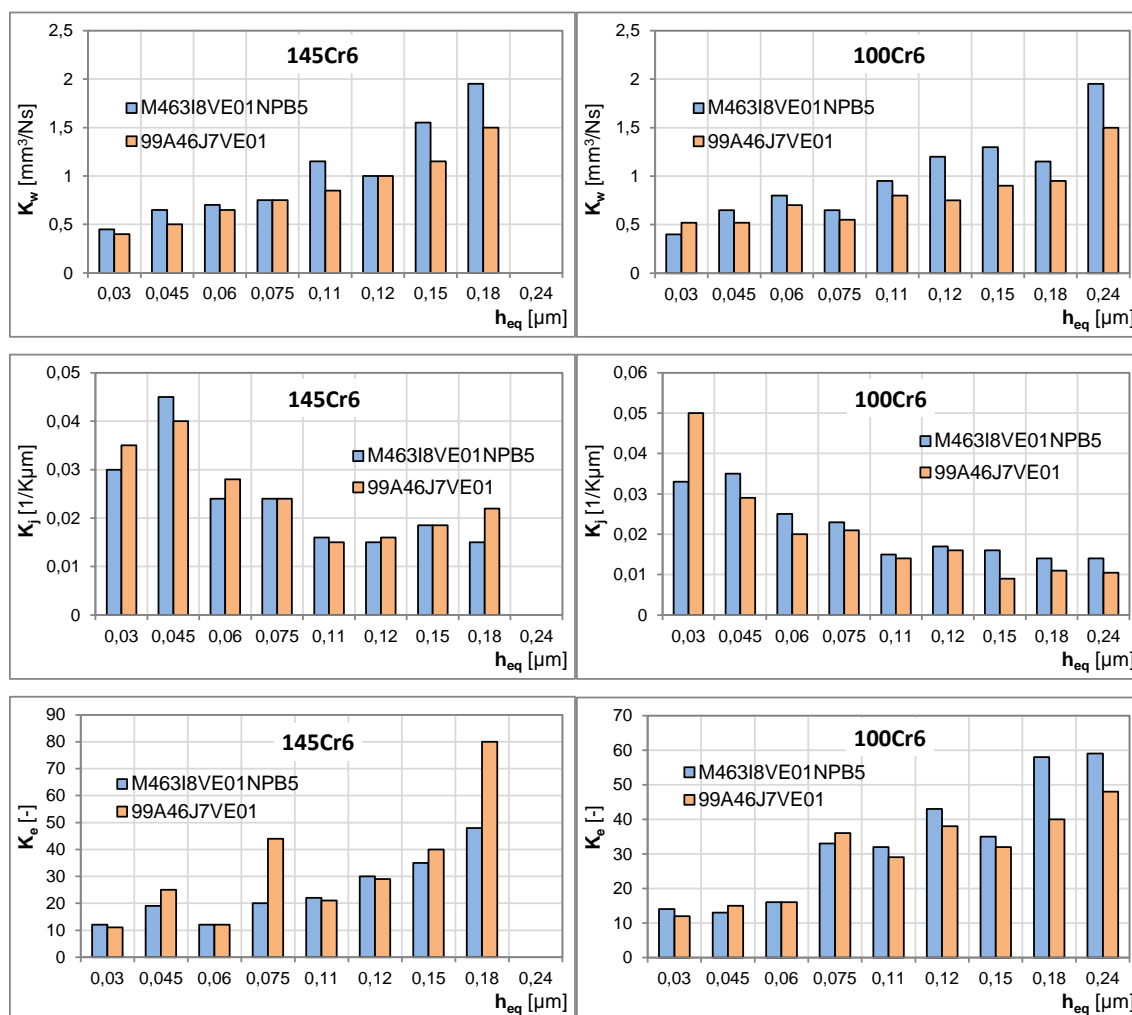
Material próbki	Twardość próbki	Ściernica / oznaczenie
100Cr6	55 HRC	1-350x20x127-M463I8VE01NPB5-35 (46I8)
		1-350x20x127-99A46J7VE01-35 (46J7)
145Cr6	65 HRC	1-350x20x127-M463I8VE01NPB5-35 (46I8)
		1-350x20x127-99A46J7VE01-35 (46J7)
C45	40 HRC	1-350x20x127-99A46L7VE01-35 (46L)
		1-350x20x127-99A60K7VE01-35 (60K)
42CrMo4	20 HRC	1-350x20x127-99A46L7VE01-35 (46L)
		1-350x20x127-99A60K7VE01-35 (60K)

5.1. Analiza wyników badań porównawczych

Na rysunkach 7 i 8 przedstawiono wykresy wartości wskaźników K_w , K_j , K_e , które obliczono na podstawie wartości pomiarowych otrzymanych w testach. W legendzie wykresów zastosowano uproszczoną symbolikę charakterystyki ściernic podając tylko ich ziarnistość, twardość i strukturę. W tytule wykresu zawarto rodzaj szlifowanego materiału.

Wykresy przedstawione na rysunku 7, obrazujące wyniki wielokryterialnej oceny dwóch rodzajów ściernic zastosowanych do szlifowania stali 145Cr6, wskazują że w większości przedziałów stosowanych parametrów skrawania jakość warstwy wierzchniej próbki K_j jest nieco wyższa po szlifowaniu ściernicą 46J7. Ściernica ta jako twardsza wykazała także mniejsze zużycie względne K_e , z kolei bardziej miękka 46I8 łatwiej i wydajniej usuwała materiał K_w , czego prawdopodobnym powodem była intensywniejsze jej samoostrzenie oraz bardziej otwarta struktura. O końcowym wyborze ściernicy i warunków szlifowania stali 145Cr6 może zdecydować użytkownik, mając na uwadze, ważniejszą dla

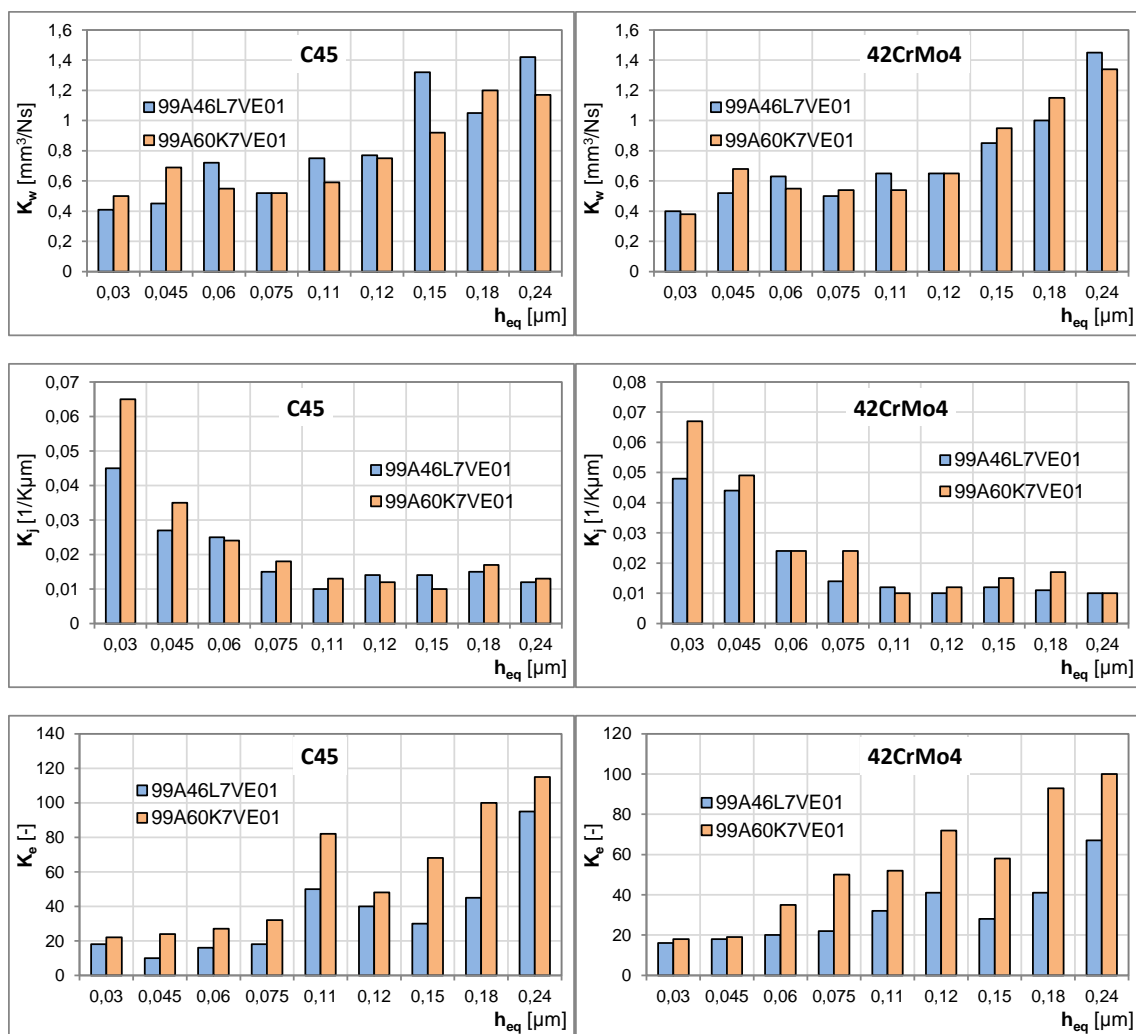
jego potrzeb właściwość eksploatacyjną: jakość, którą zapewnią ściernica 46J, czy też wydajność zapewnioną przez ściernicę 46I8.



Rys. 7. Wskaźniki eksploatacyjne oceny ściernic M463I8VE01NPB5 oraz 99A46J7VE01 zastosowanych do szlifowania stali 145Cr6 oraz 100Cr6

Testy szlifowania ściernicami 46I8 oraz 46J7 stali 100Cr6 jednoznacznie wskazują na przewagę ściernicy 46I8 z monokorundu o bardziej otwartej strukturze. W przeważającym zakresie parametrów obróbki wszystkie wskaźniki mają wyższe wartości w stosunku do ściernicy 46J7. Tylko szlifowanie z najniższymi wartościami dosuwu i prędkości obrotowej próbki daje przewagę ściernicy 46J7 w zakresie wydajności K_w i jakości prowadzonej obróbki K_j .

Grupa wykresów na rysunku 8 dotyczy wyników testów szlifowania stali C45 oraz 42CrMo4 ściernicami 46L oraz 60K. Analiza tych wykresów pokazuje, że w szlifowaniu stali C45 w zakresie małych wartości parametrów skrawania lepiej sprawdza się ściernica 60K – wszystkie wskaźniki posiadają wyższe wartości. W bardziej intensywnym szlifowaniu lepiej radzi sobie ściernica 46L, dając zbliżoną jakość warstwy wierzchniej K_j oraz mniejsze zużycie względne K_e . Analiza wyników testów szlifowania stali 42CrMo4 o niskiej twardości skłania do rekomendowania ściernicy 60K, jako bardziej przydatnego narzędzia do zadań obróbkowych w całym zakresie badanych parametrów szlifowania. Wskaźniki oceny eksploatacyjnej dla tej ściernicy tylko w pojedynczych przypadkach mają niższe wartości od uzyskanych dla narzędzia konkurencyjnego.



Rys. 8. Wskaźniki eksploatacyjne oceny ściernic 99A46L7VE01 oraz 99A60K7VE01 zastosowanych do szlifowania stali C45 oraz 42CrMo4

Podsumowując należy stwierdzić, że w wielu przypadkach wskaźniki właściwości eksploatacyjnych ściernic mają zbliżone wartości, co świadczy o podobnej przydatności testowanych narzędzi do zadań obróbczych. Różnice w wartościach wskaźników w określonym zakresie nastaw procesu szlifowania dają możliwość wyboru lepszego wariantu warunków obróbki określonego materiału.

6. Podsumowanie

Obecne wyzwania stawiane procesom produkcyjnym, wynikające z rosnących wymagań dotyczących jakości produktów, minimalizacji kosztów oraz zapewnienia możliwości wykonania, powodują konieczność ich ciągłego usprawniania i unowocześniania. Operacje technologiczne wchodzące w skład procesów produkcyjnych należy przekształcać w kierunku poprawy efektywności i wydajności. Drogą do osiągnięcia tych celów jest wielokryterialna optymalizacja, która w przypadku procesu szlifowania może polegać na ocenie właściwości eksploatacyjnych ściernic, charakteryzujących interakcje zachodzące pomiędzy wszystkimi czynnikami procesu. Zaprezentowana w artykule metoda pokazuje, że za pomocą krótkich testów można uzyskać wiedzę na temat zależności występujących w rozpatrywanym procesie szlifowania, co daje możliwość poprawy przynajmniej jednej z

charakterystyk procesu dotyczących wydajności, kosztów i jakości. Przeprowadzone badania wykazały, że:

- zakres przyjętych wskaźników i ich formuły poprawnie charakteryzują właściwości eksploatacyjne ściernic odnosząc je do wydajności i kosztu procesu oraz jakości warstwy wierzchniej obrabianej powierzchni,
- zastosowana w urządzeniu testowym odmiana szlifowania (szlifowanie walców) zapewnia dużą czułość wskaźników na zmiany warunków szlifowania przez co umożliwia bardziej jednoznaczną ocenę właściwości eksploatacyjnych badanej ściernicy,
- przeprowadzanie testów poprzez szlifowanie powierzchni walcowych w warunkach szlifowania na sucho pozwala na wnioskowanie o właściwościach ściernicy użytkowanej w innych odmianach szlifowania oraz z zastosowaniem cieczy chłodząco-smarującej,
- uwagi na zróżnicowaną reakcję właściwości eksploatacyjnych ściernic na zmianę wielkości nastawnych procesu szlifowania, wybór ściernicy do określonego zadania szlifierskiego winien być dokonywany na podstawie wartości wszystkich przedstawionych wskaźników, by ostateczna decyzja uwzględniała istotne dla użytkownika kryteria optymalizacji operacji szlifierskiej.

7. Literatura

1. Adibi H, Rezaei Ahmed S M, Sarhan A D. Analytical modeling of grinding wheel loading phenomena. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2013; 68:473–485
2. Axinte D, Butler-Smith P, Akgun C, Kolluru K. On the influence of single grit microgeometry on grinding behavior of ductile and brittle materials. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2013; 74: 12–18.
3. Brinksmeier E, Heinzl C, Wittmann M. Friction, Cooling and Lubrication in Grinding *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 1999; 48: 581-598.
4. Burakowski T, Wierzchoń T. *Surface Engineering of Metals: Principles, Equipment, Technologies*. CRC Press, Boca Raton, 1999.
5. Dębowski R. Analiza komputerowa obrazu mikroskopowego w zastosowaniu do oceny zużycia czynnej powierzchni ściernicy. *Materiały XXIII Naukowej Szkoły Obróbki Ściernej*, Rzeszów, 2000.
6. Gołąbczak A, Koziarski T. Assessment method of cutting ability of CBN grinding wheels. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 2005; 45: 1256-1260.
7. Guo C, Chand R H. Grindability and Mechanical Property of Ceramics. *Proceedings of the 20th Annual Conference on Composites, Advanced Ceramics, Materials, and Structures—A: Ceramic Engineering and Science Proceedings*, 2008: 214-219.
8. Hahn RS. On the mechanics of the grinding process under plunge cut conditions. *Journal of Engineering for Industry* 1966; 1: 72–79.
9. Herzenstiel P, Aurich J C. CBN-grinding wheel with a defined grain pattern –extensive numerical and experimental studies, *Machining Science and Technology* 2010; 14: 301–322.
10. Jackson MJ, Mills B. Microscale wear of vitrified abrasive materials. *Journal of Materials Science* 2004; 39: 2131–2143.
11. Kacalak W, Lipiński D, Rypina Ł, Szafraniec F, Tandecka K, Bałasz B. Performance evaluation of the grinding wheel with aggregates of grains in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2018; 94: 301-314.

12. Karpuschewski B, Wehmeier M, Inasaki I. Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors. *Annals of the CIRP* 2000; 49: 235–240.
13. Katalog materiałów ściernych. Koło: Andre Abrasives, 2017.
14. Kato T, Fuji H. Temperature measurement of workpieces in conventional surface grinding. *Journal of Manufacturing Science and Engineering* 2000; 122: 297-303.
15. Klocke F, Brinksmeier E, Weinert K. Capability Profile of Hard Cutting and Grinding Processes. *CIRP Annals* 2005; 54: 22-45.
16. König W, Messer J. Influence of the Composition and Structure of Steels on Grinding Process. *Annals of the CIRP* 1981; 30: 547–552.
17. Koziarski A, Golabczak A. The Assessment of the Grinding Wheel Cutting Surface Condition after Dressing with Single Point Diamond Dresser. *International Journal of Machine Tools Design and Research* 1985; 25: 313-325.
18. Lipiński D, Kacalak W, Tomkowski R. Methodology of Evaluation of Abrasive Tool Wear with the Use of Laser Scanning Microscopy. *Scanning* 2014; 36: 53-63.
19. Malkin S, Cook NH. The wear of grinding wheels. Part 1: attritious wear. *Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry* 1971; 93:1120–1128.
20. Malkin S, Guo C. Thermal analysis in grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 2007; 56, 760-782.
21. Malkin S, Guo C. Thermal analysis of grinding. *Annals of the CIRP* 2007; 56: 760 – 782.
22. Malkin S. The wear of grinding wheels. Part 2: fracture wear. *Transactions of ASME, Journal of Engineering for Industry* 1971; 93: 1129–1133.
23. Marinescu I D, Hitchiner M, Uhlmann E, Rowe W B. Inasaki I.. *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. CRC Press, Boca Raton, 2007.
24. Marinescu I D, Rowe W B, Dimitrov B, Inasaki I. *Tribology of abrasive machining processes*. William Andrew, Inc., Norwich, 2004.
25. Maslov E N.: *Teorija šlifovanija materialov*, Moskva: Mašinostroenie, 1974.
26. Mofdi M, Lingchi M, Zhang T. Applied mechanics in grinding. Part 7: residual stresses induced by the full coupling of mechanical deformation, thermal deformation and phase transformation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 1999; 39: 1285-1298.
27. Nadolny K. Wear phenomena of grinding wheels with sol–gel alumina abrasive grains and glass–ceramic vitrified bond during internal cylindrical traverse grinding of 100Cr6 steel. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2015; 77: 83–98.
28. Rasim M, Mattfeld P, Klocke F. Analysis of the grain shape influence on the chip formation in grinding. *Journal of Materials Processing Technology* 2015; 226: 60–68.
29. Rowe W B. *Principles of modern grinding technology*. Elsevier, 2009.
30. Setti D, Ghosh S, Rao P V: A method for prediction of active grits count in surface grinding. *Wear* 2017; 382–383: 71–77.
31. Sieniawski J, Nadolny K. The effect upon grinding fluid demand and workpiece quality when an innovative zonal centrifugal provision method is implemented in the surface grinding of steel CrV12. *Journal of Cleaner Production* 2016; 113: 960-972.
32. Steffens K. Beschreibung eines Gleitlinienfelds für die Deutung der Spanbildung beim Schleifen. *Industrie-Anzeiger* 1979; 19.
33. Stephenson D J. Three Dimensional Finite Element Simulation of Transient Heat Transfer in High Efficiency Deep Grinding. *Annals of the CIRP* 2004; 53: 259-262.

34. Tönshoff K H, Friemuth T, Becker J C. Process monitoring in grinding. *Annals of the CIRP*, 2002; 51: 551-571.
35. Uhlmann E, Lypovka P, Hochschild L, Schröer N. Influence of rail grinding process parameters on rail surface roughness and surface layer hardness. *Wear* 2016; 366-367:287–293.
36. Urbaniak M, Leonarcik R, Szajder M. Stanowisko do oceny szlifowalności materiałów. Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej, Gdańsk, 2011.
37. Urbaniak M, Skowron M, Leonarcik R. Patent nr 213086 na wynalazek pt.: Urządzenie pomiarowe, 2013.
38. Urbaniak M. System oceny użytkowych właściwości ściernic. Łódź: Zeszyty Naukowe P.Ł., 2002.
39. Wegener K, Hoffmeister W, Karpuschewski B, Kuster F, Hahmann W C, Rabiéy M. Conditioning and monitoring of grinding wheels. *CIRP Annals* 2011; 60: 757-777.
40. Yu H, Lu Y, Wang J. Study on wear of the grinding wheel with an abrasive phyllotactic pattern. *Wear* 2016; 358-359: 89–96.