

ZDALNA I BEZDOTYKOWA OCENA TRWAŁOŚCI ŚCIERNIC DO PRZECINANIA RĘCZNEGO

Henryk BIEGALSKI¹

***Streszczenie:** Przedstawiono koncepcję zdalnej i bezdotykowej oceny właściwości użytkowych ściernic do przecinania ręcznego. Do oceny właściwości użytkowych ściernic użyto wyników numerycznej analizy obrazu produktów odpadowych. Na przykładzie oceny trwałości ściernic wykazano możliwość tej oceny ze średnim błędem względnym równym 3,05%.*

***Słowa kluczowe:** przecinanie ściernicowe ręczne, zdalna i bezdotykowa ocena, właściwości użytkowe ściernic do przecinania, numeryczna analiza obrazu*

***Summary:** Remote and non-contact assessment of hand operated cutting wheels performance was shown. To assess the performance of cutting wheels, the results of numerical analysis from the image of waste products were used. On the example of the evaluation of durability of the cutting wheel the possibility of assessing the average relative error equal to 3.05% was shown.*

***Key words:** manual abrasive cutting, remote and non-contact evaluation, performance of abrasive cut-off wheels, numerical analysis of the image*

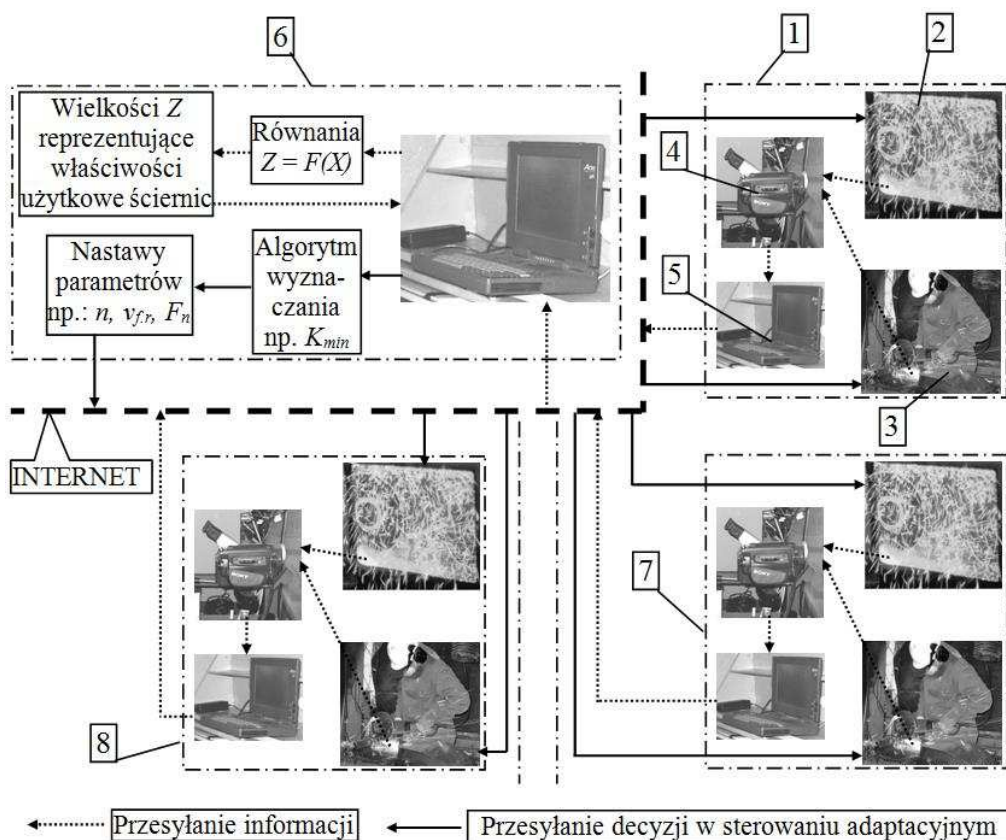
1. WPROWADZENIE

Stosowane obecnie metody oceny właściwości użytkowych ściernic do przecinania wymagają użycia rozbudowanych stanowisk badawczych z aparaturą pomiarowo-rejestrującą w bezpośrednim otoczeniu procesu przecinania ściernicowego [3, 4, 6]. Rozwiązanie to ma kilka wad. Pierwszą jest konieczność stosowania właściwych środków ochronnych aparatury i jej obsługi ze względu na zagrożenie środowiska pracy toksycznymi pyłami, dymami i hałasem towarzyszącymi tej obróbce. Drugą wadą jest mała mobilność tego systemu oceny właściwości ściernic przez danego ich producenta, co utrudnia jej dokonanie jednocześnie u wielu użytkowników. Trzecią wadą zaś, jest konieczność budowy do każdego stanowiska roboczego indywidualnego układu pomiarowo-analizującego, w celu zastosowania układu sterowania adaptacyjnego parametrami obróbki dla osiągnięcia pożądanych wartości właściwości użytkowanych ściernic [7].

Dla wyeliminowania powyższych wad dotychczasowego systemu oceny właściwości użytkowych ściernic pojawiła się propozycja metody, która pozwalałaby na zdalną i bezdotykową ocenę właściwości użytkowych ściernic do przecinania. Uzyskane dane, zapisywane w formie obrazu produktów odpadowych procesu obróbki, umożliwiałyby ich przesyłanie w czasie rzeczywistym na dowolne odległości, pozwalając na szybkie reagowanie producenta w system wytwarzania ściernic w celu utrzymania i podnoszenia ich jakości. Ponadto dane te mogłyby zostać

¹ Politechnika Gdańska, Wydział Mechaniczny, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji. Adres: ul. Gabriela Narutowicza 11/12, 80-233 GDAŃSK; e-mail: hbiegals@pg.gda.pl

wykorzystane do sterowania adaptacyjnego wieloma stanowiskami roboczymi z



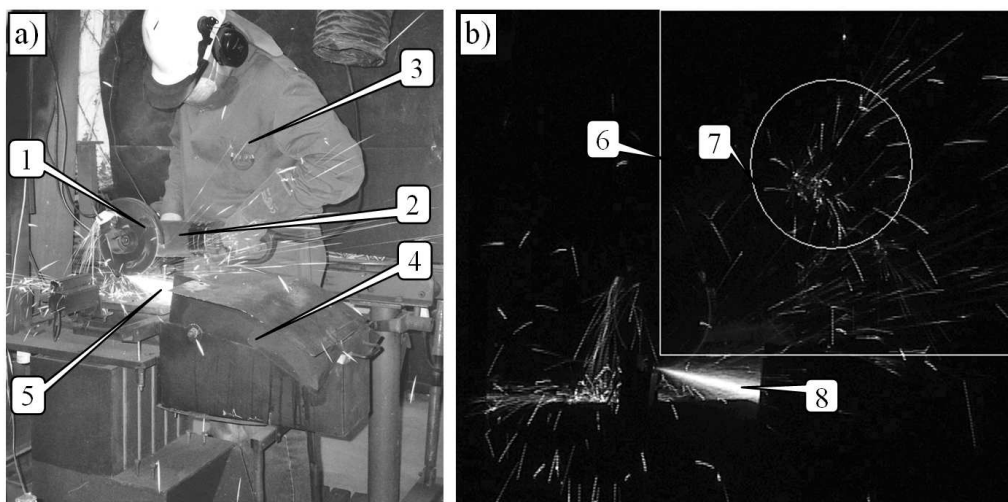
Rys. 1. Możliwości wykorzystania metody zdalnej i bezdotykowej oceny właściwości użytkowych ściernic: 1 – stanowisko robocze nr 1, 2 – przecinarka stacjonarna, 3 – stanowisko przecinania ręcznego, 4 – kamera cyfrowa, 5 – komputer, 6 – centralne stanowisko analityczno-sterujące, 7 – stanowisko robocze nr 2, 8 – stanowisko robocze nr n

Źródło: opracowanie własne

jednego centrum sterowania (rys. 1). Kluczowe znaczenie dla rozwiązania przedstawionego wyżej problemu ma udowodnienie hipotezy o możliwości oceny wielkości Z , reprezentujących właściwości użytkowe ściernic, na podstawie wartości parametrów uzyskanych z numerycznej analizy obrazu produktów odpadowych procesu obróbki.

2. KONCEPCJA METODY ZDALNEJ I BEZDOTYKOWEJ OCENY WŁAŚCIWOŚCI UŻYTKOWYCH ŚCIERNIC DO PRZECINANIA

Koncepcja metody powstała podczas analizy klatek z filmu video obejmujących pole 6 operatora przecinarki ręcznej zagrożonego iskrami 7 (rys. 2b) [3]. Dla



Rys. 2. Widok: a – strefy obróbki przecinania ściernicowego ręcznego, b – klatki z filmu video pola operatora w trakcie przecinania ręcznego: 1 – ściernica, 2 – przecinarka ręczna, 3 – operator, 4 – pochłaniacz zanieczyszczeń, 5 – główny strumień zanieczyszczeń, 6 – obszar poddawany analizie numerycznej w celu wyznaczenia obszaru operatora zagrożonego iskrami, 7 – pole kolizji iskier z operatorem, 8 – obraz głównego strumienia produktów odpadowych 5 procesu jako źródło danych o właściwościach użytkowych ściernic [3]

lepszej oceny tego zagrożenia, obróbka była prowadzona w ciemności. W trakcie analizy prawie sześciu tysięcy zdjęć zauważono, że w zależności od asortymentu ściernicy zmieniał się stopień zapełnienia iskrami całego obszaru, zarejestrowanego przez kamerę jak i wielkość pola oraz kolor głównego strumienia 5 produktów odpadowych procesu przecinania ściernicowego. Zmiany te zaobserwowano również w odniesieniu do różnych przecięć tą samą ściernicą, a także nawet w różnych fazach tego samego przecięcia. Koncepcję zdalnej i bezdotykowej metody oceny właściwości użytkowych ściernic do przecinania oparto na wynikach numerycznej analizy obrazu obszaru przecinania ściernicowego ręcznego, w której wyznaczane są [5]:

- 1- udział względny pola całkowitego zajętego iskrami $A_{iskr,c}$,
- 2- poziom jasności PJ barw podstawowych tworzących tzw. przestrzeń barw RGB w barwie strumienia produktów odpadowych procesu. Do barw podstawowych w tym modelu zalicza się: czerwień (R – red), zieleń (G – green) i niebieską (B – blue).

Wielkości te, stanowiąc zmienne niezależne X , będą podstawą do wyznaczenia zmiennych zależnych Z – wielkości reprezentujących właściwości użytkowe ściernic



do przecinania. W zbiorze wielkości niezależnych uwzględniono również tzw. numer koloru NK , obliczany ze wzoru:

$$NK = PJ_R \cdot 256^2 + PJ_G \cdot 256 + PJ_B \quad (1)$$

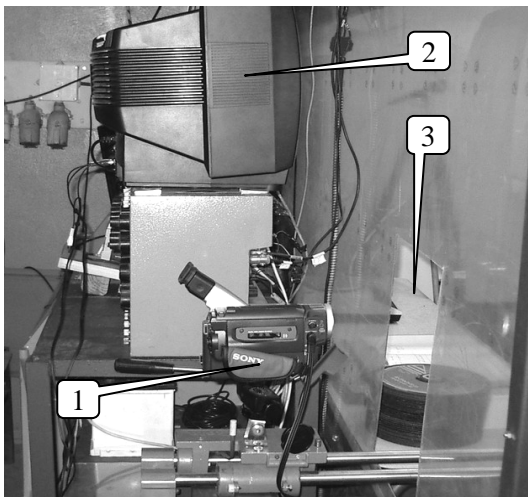
gdzie: PJ_R , PJ_G , PJ_B – poziom jasności barwy podstawowej, odpowiednio: R – czerwonej, G – zielonej i B – niebieskiej w barwie strumienia produktów odpadowych procesu.

2. METODYKA I PROGRAM BADAŃ OCENY TRWAŁOŚCI ŚCIERNIC DO PRZECINANIA

Przedmiotem badań było 21 ściernic przeznaczonych do przecinania ręcznego, wykonanych przez firmę ANDRE z Koła, każda w innej odmianie technologicznej lecz o wspólnej charakterystyce 42 – 230x3x22,23 95A24 R BF (tab. 1) [3]. Każdą ściernicą zaplanowano wykonanie po 50 przecięć pręta ze stali S235J0 o średnicy 20 mm. Do prób użyto stanowiska badawczego przedstawionego na rysunku 2a, z w pełni ręcznym prowadzeniem ściernicy w przedmiocie przecinanym. Do określania trwałości ściernicy przyjęto wskaźnik wydajności względnej G_A , wyznaczany ze wzoru:

$$G_A = \frac{A_{PO}}{A_{\acute{s}c}} \quad \text{mm}^2/\text{mm}^2 \quad (2)$$

gdzie: A_{PO} – pole powierzchni przecięcia przedmiotu obrabianego, mm^2 ,
 $A_{\acute{s}c}$ – pole powierzchni czołowej zużytej ściernicy w celu uzyskania pola powierzchni przecięcia A_{PO} , mm^2 .



Naprzeciwko stanowiska umieszczono kabinę aparaturową (rys. 3), w której zainstalowano kamerę cyfrową video firmy SONY (poz. 1 na rys. 3). Kamerą tą dokonano rejestracji obrazów przez okno 3 pola operatora zagrożonego iskrami (rys. 2b) w zaciemnionym pomieszczeniu i przy jej identycznych nastawach.

Rys. 3. Widok wnętrza kabiny aparaturowej [3]:
1 – kamera video SONY typ DCR-TR8100E, 2 – monitor do podglądu obrazu z kamery, 3 – okno

MECHANIK NR 8-9/2013
XXXVI NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ

Metodykę wyznaczania wartości zmiennych niezależnych X , niezbędnych do oceny właściwości użytkowych ściernic opisano w [5], a uzyskane wartości zmiennych niezależnych X i zmiennej zależnej Z dla potrzeb niniejszej pracy przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki badań zmiennych niezależnych X uzyskanych w efekcie numerycznej analizy obrazu video procesu przecinania oraz zmiennej niezależnej Z pomierzonej w badaniach eksploatacyjnych ściernic do przecinania

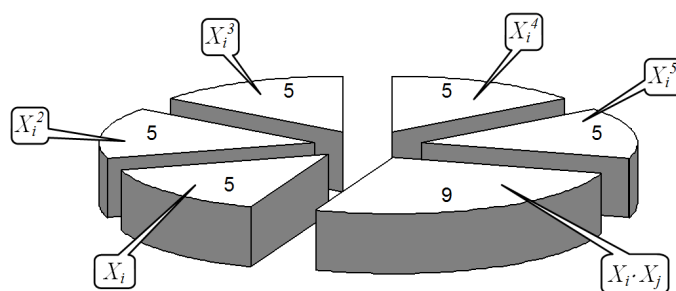
| Lp. | Lp. Wg daty produkcji | Symbol odmiany (wg firmy ANDRE) | Zmienna niezależna X | | | | | Zmienna zależna Z |
|-----|-----------------------|---------------------------------|------------------------|--------|--------|--------|---------------|---------------------|
| | | | A_{iskrc} | PJ_R | PJ_G | PJ_B | NK | G_A |
| | | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 1 | 7 | U/III/A | 1,03 | 205,85 | 158,15 | 129,27 | 13 531 201,27 | 1,13 |
| 2 | 10 | U/V/A | 1,33 | 224,07 | 177,08 | 142,91 | 14 730 126,91 | 1,16 |
| 3 | 13 | S/I/A | 1,19 | 222,39 | 177,37 | 148,25 | 14 620 106,01 | 1,32 |
| 4 | 15 | S/II/A | 0,95 | 196,42 | 150,13 | 122,83 | 12 911 137,23 | 1,22 |
| 5 | 26 | B226b | 1,27 | 221,54 | 175,51 | 141,86 | 14 563 917,86 | 1,03 |
| 6 | 30 | B229b | 0,91 | 179,84 | 129,84 | 102,05 | 11 819 335,33 | 0,77 |
| 7 | 31 | B235a | 0,8 | 156,54 | 107,05 | 76,58 | 10 286 486,82 | 0,51 |
| 8 | 33 | B236a | 0,95 | 160,07 | 113,60 | 86,66 | 10 519 515,78 | 0,52 |
| 9 | 38 | W6/251b | 1,11 | 182,61 | 129,32 | 96,36 | 12 000 731,24 | 0,96 |
| 10 | 47 | W6/256a | 1,42 | 211,03 | 154,57 | 112,46 | 13 869 744,46 | 0,87 |
| 11 | 50 | 259/Ub | 1,81 | 229,02 | 178,65 | 135,51 | 15 055 924,63 | 1,16 |
| 12 | 52 | 262/Ub | 1,56 | 218,19 | 169,93 | 133,49 | 14 342 935,41 | 1,14 |
| 13 | 54 | B-279b | 1,61 | 199,77 | 149,44 | 116,22 | 13 130 499,58 | 0,90 |
| 14 | 57 | B281BISa | 1,33 | 202,31 | 148,66 | 113,71 | 13 296 758,83 | 0,89 |
| 15 | 72 | FR(S)EXTRAc | 1,24 | 210,44 | 157,74 | 124,47 | 13 831 901,75 | 1,13 |
| 16 | 77 | ADSSTANDA RDb | 1,37 | 222,97 | 176,18 | 134,38 | 14 657 798,38 | 1,05 |
| 17 | 81 | KKWSOFTb | 1,36 | 226,72 | 185,78 | 151,62 | 14 906 033,22 | 0,97 |
| 18 | 65 | ADSEXTRAb | 1,18 | 239,48 | 196,52 | 160,44 | 15 745 030,84 | 1,30 |
| 19 | 67 | PEREXTRAb | 1,29 | 214,46 | 163,96 | 122,74 | 14 096 947,06 | 1,04 |
| 20 | 69 | REFEXTRAb | 1,125 | 214,14 | 161,97 | 115,10 | 14 075 458,46 | 1,13 |
| 21 | 85 | PORSOFTb | 1,42 | 239,66 | 200,37 | 161,71 | 15 757 814,19 | 1,01 |

Źródło: opracowanie własne

3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

W celu wyznaczenia zależności w formie funkcji regresji, pomiędzy wskaźnikiem wydajności względnej G_A a parametrami RGB obrazu strumienia produktów odpadowych (tab. 1), posłużono się metodą najmniejszych kwadratów [8, 9]. Zaadaptowano do tego celu narzędzie analizy Regresja w programie Excel, wykorzystując je do obliczania parametrów funkcji krzywoliniowej po odpowiedniej adaptacji danych wyjściowych [10]. Jako podstawowy model matematyczny do opisu tej zależności przyjęto wielomian algebraiczny maksymalnie piątego stopnia z interakcjami podwójnymi [1, 9, 10, 11]. Dla potrzeb oceny trwałości ściernicy przy stopniu wielomianu algebraicznego $m = 5$ i liczbie $K = 5$ zmiennych niezależnych wielomian ten miał postać przedstawioną wzorem (3) (rys. 5).

W poszukiwaniu najkorzystniejszego układu zmiennych niezależnych X , ze względu na maksymalną wartość współczynnika korelacji wielowymiarowej R , należało wziąć pod uwagę łącznie 34 tych wielkości (rys. 4).



Rys. 4. Rodzaje i liczby zmiennych niezależnych X użytych do oceny trwałości ściernicy do przecinania
Źródło: opracowanie własne

Wobec ograniczenia programu do możliwości jednoczesnego analizowania maksymalnie szesnastu zmiennych niezależnych X , przyjęto zasadę metody postępowania tzw. dołączania i odrzucania [12]. Ze względu natomiast na stosunkowo małą liczbę ściernic użytych w badaniach (21 sztuk), ograniczono liczbę jednocześnie analizowanych zmiennych X do czternastu. W poszukiwaniu najkorzystniejszego układu zmiennych niezależnych X (tab. 1, rys. 4), zastosowano następującą procedurę postępowania [2]:

- 1- po otrzymaniu danej funkcji regresji (wzór 3) analizowano wartości statystyki obliczeniowej t Studenta odnośnie do współczynników tej funkcji,
- 2- odrzucano tą zmienną X , dla której wartość t Studenta współczynnika była najmniejsza,
- 3- wstawiano wartości następnej z kolei zmiennej X do tablicy danych,
- 4- powtarzano cykl obróbki danych z kolejną zmienną niezależną X ,

- 5- wyznaczanie funkcji regresji prowadzono, dopóki w analizowanej funkcji jednocześnie nie osiągnięto [9, 10, 11]:
- istotności współczynnika korelacji wielowymiarowej R oraz prawdziwości współczynników funkcji regresji z użyciem testu F -Snedecora dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$,
 - adekwatności modelu matematycznego do badanego obiektu rzeczywistego z zastosowaniem tego samego testu jak w p. 5a,
 - istotności większości współczynników funkcji regresji na podstawie statystyki t Studenta w porównaniu do wartości krytycznej dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$.

Procedura ta, doprowadziła do równania (wzór 4) (rys. 5), umożliwiającego ocenę wielkości Z – wskaźnika wydajności względnej G_A , reprezentującego trwałość ściernicy. Równanie to było sformułowane po wyznaczeniu najkorzystniejszego układu zmiennych niezależnych X wielomianu algebraicznego (wzór 3) i następowało według schematu przedstawionego na rysunku 5.

$$\bar{Z} = b_0 + \sum_{i=1}^{K=5} b_i \bar{x}_i + \sum_{i=1}^{K=5} b_{i,i} \bar{x}_i^2 + \sum_{\substack{i,j=1 \\ i < j}}^{K=5} b_{i,j} \bar{x}_i \bar{x}_j + \dots + \sum_{i=1}^{K=5} b_{i,i,i} \bar{x}_i^m = \quad (3)$$

$$\bar{Z} = b_0 + \left\{ \begin{array}{l} b_1 \bar{x}_1 + \dots + b_5 \bar{x}_5 + b_{1,1} \bar{x}_1^2 + \dots + b_{5,5} \bar{x}_5^2 + b_{1,2} \bar{x}_1 \bar{x}_2 + \dots + b_{4,5} \bar{x}_4 \bar{x}_5 + \\ \dots + b_{1,1,1} \bar{x}_1^3 + \dots + b_{5,5,5} \bar{x}_5^3 + b_{1,1,1,1} \bar{x}_1^4 + \dots + b_{5,5,5,5} \bar{x}_5^4 + b_{1,1,1,1,1} \bar{x}_1^5 + \\ \dots + b_{5,5,5,5,5} \bar{x}_5^5 \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\bar{Z} = b_0 + \sum_{p=1}^{p=16} b_p x'_p = b_0 + \underbrace{b'_1 x'_1 + b'_2 x'_2 + \dots + b'_{13} x'_{13} + b'_{14} x'_{14}} \quad (4)$$

gdzie: i, j – numer kolejny zmiennej niezależnej X ,
 $K = 5$ – liczba zmiennych niezależnych X danego stopnia,
 $m = 5$ – stopień wielomianu – największy wykładnik potęgi zmiennej niezależnej występującej w równaniu,
 b_0 – stała równania,
 b_p' – współczynnik zmiennej niezależnej istotnej statystycznie x'_p o pozycji p w równaniu,
 x'_p – zmienna niezależna o pozycji p w równaniu.

Rys. 5. Schemat formułowania równania (wzór 4) wykorzystywanego do oceny wielkości Z na podstawie funkcji regresji (wzór 3)

Źródło: opracowanie własne

MECHANIK NR 8-9/2013
XXXVI NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ

W tabeli 2 przedstawiono zestawienie współczynników i wyrazów wyznaczonej funkcji regresji (wzór 3), zastosowanej w równaniu (wzór 4) i przyjętej do oceny wskaźnika wydajności względnej G_A . Funkcja ta, będąc wielomianem 4. stopnia z 13 zmiennymi niezależnymi X , została wyłoniona spośród 18 innych. Optymalny zestaw zmiennych niezależnych X pozwala na uzyskanie wysokich wartości współczynników: korelacji wielowymiarowej $R = 0,98$ i determinacji $R^2 \cdot 100\% = 96\%$. Jednocześnie uzyskano adekwatność zarówno równania regresji jak i współczynnika korelacji R . Dla funkcji tej na 14 współczynników tylko 2 były nieistotne (tab. 2).

Tabela 2. Zestawienie współczynników i wyrazów wyznaczonej funkcji regresji (wzór 3) zastosowanych w równaniu (wzór 4) do zdalnej i bezdotykowej oceny trwałości ściernicy, reprezentowanej przez wskaźnik wydajności względnej G_A

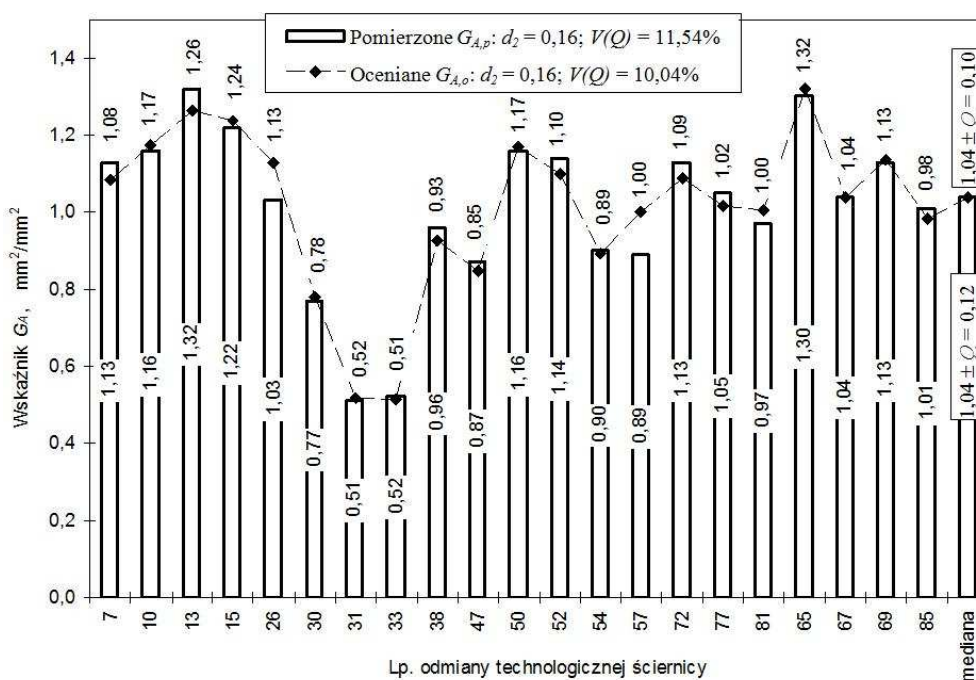
| Oceniana wielkość zależna Z | Współczynnik wielkości niezależnej X | | Wielkość niezależna X | Wartość obliczeniowa statystyki t Studenta | Wartość krytyczna statystyki t Studenta dla $\alpha = 0,05$ i $\nu_2 = 7$ | Diagnoza odnośnie do istotności danego współczynnika |
|-----------------------------|--------------------------------------|--------------|-----------------------|--|---|--|
| | Oznaczenie | Wartość | | | | |
| $G_A =$ | $b'_0 =$ | -168,0965161 | | -4,430 | 2,365 | istotny |
| | $b'_1 =$ | -310,6779445 | PJ_R | -2,841 | | istotny |
| | $b'_2 =$ | -0,741063282 | PJ_B | -3,909 | | istotny |
| | $b'_3 =$ | 0,00477515 | NK | 2,853 | | istotny |
| | $b'_4 =$ | -0,081697658 | PJ_G^2 | -2,689 | | istotny |
| | $b'_5 =$ | 0,00275279 | PJ_B^2 | 3,284 | | istotny |
| | $b'_6 =$ | -2,89175E-12 | NK^2 | -5,047 | | istotny |
| | $b'_7 =$ | 11,97716966 | $A_{iskr,c} PJ_R$ | 2,179 | | nieistotny |
| | $b'_8 =$ | 0,126284491 | $A_{iskr,c} PJ_B$ | 2,867 | | istotny |
| | $b'_9 =$ | -0,000183376 | $A_{iskr,c} NK$ | -2,187 | | nieistotny |
| | $b'_{10} =$ | -20,53363679 | $PJ_R PJ_G$ | -2,649 | | istotny |
| | $b'_{11} =$ | 0,000313266 | $PJ_G NK$ | 2,649 | | istotny |
| | $b'_{12} =$ | 9,54549E-20 | NK^3 | 4,064 | | istotny |
| | $b'_{13} =$ | -1,92336E-08 | PJ_B^4 | -2,368 | | istotny |

Źródło: opracowanie własne

Z przedstawionego na rysunku 6 porównania wartości ocenianej $G_{A,o}$ z pomierzoną $G_{A,p}$ wynika duża zgodność pomiędzy rozkładami tych wartości, o czym świadczy również mała wartość średniego błędu względnego oceny wskaźnika G_A wynosząca 3,05%.

Odnośnie do analizowanych rozkładów wartości pomierzonych i ocenianych wskaźnika G_A przeprowadzono analizę statystyczną z której wyniknęło, że po użyciu testu:

- serii wykazano, że obydwa rozkłady są losowe dla $\alpha = 0,025$ i $\alpha = 0,975$,
- Shapiro-Wilka stwierdzono, że obydwa rozkłady nie są zgodne z rozkładem normalnym dla $\alpha = 0,1$,
- rangowanych znaków Wilcozona uznano, że rozkłady są ze sobą zgodne dla $\alpha = 0,05$,
- istotności t Studenta współczynnika korelacji r_s Spearmana = 0,953 przyjęto hipotezę, że wartości obydwu rozkładów są ze sobą istotnie skorelowane dla $\alpha = 0,001$.



Rys. 6. Porównanie wartości pomierzonych i ocenianych wskaźnika powierzchniowej wydajności względnej G_A ; d_2 – odchylenie przeciętne od mediany, $V(Q)$ – współczynnik zmienności (dla odchylenia ćwiartkowego Q), Q – odchylenie ćwiartkowe

Źródło: opracowanie własne

4. PODSUMOWANIE

Uzyskane zadowalające wyniki badań potwierdzają możliwość zdalnej i bezdotykowej oceny trwałości ściernicy, reprezentowanej przez wskaźnik wydajności względnej G_A , z wykorzystaniem parametrów uzyskanych w wyniku analizy obrazu strumienia produktów odpadowych procesu obróbki. Można sądzić, że zwiększenie



liczby badanych ściernic pozwoli na lepsze dopasowanie modelu matematycznego do obiektu rzeczywistego, dzięki czemu będzie możliwe zmniejszenie liczby koniecznych do oceny zmiennych niezależnych X i stopnia wielomianu. Pozytywne wyniki oceny zaproponowaną metodą wskaźnika wydajności względnej G_A , reprezentującego trwałość ściernicy, roszą zachęcająco od podjęcia podobnych prób w odniesieniu do innych właściwości użytkowych ściernic.

LITERATURA

- [1] BIEGALSKI H., *Metodyka prognozowania właściwości użytkowych ściernic do przecinania*. Sprawozdanie z badań własnych. Polit. Gdańska, Kat. Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji. Gdańsk 2006 (maszynopis).
- [2] BIEGALSKI H., *Metodyka prognozowania jakości ściernic elektrokorundowych do przecinania*. Sprawozdanie z badań własnych. Polit. Gdańska, Kat. Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji. Gdańsk 2007 (maszynopis).
- [3] BIEGALSKI H., *Metoda prognozowania właściwości użytkowych i jakości ściernic do przecinania*. Gdańsk: Wydawnictwo Polit. Gdańskiej 2010, [Monografia nr 103], s. 243.
- [4] BIEGALSKI H., *Rozprzestrzenianie się pyłu metalowego w otoczeniu przecinania ściernicowego w pomieszczeniach zamkniętych*. W: *Obróbka ścierna. Współczesne problemy*. (Red. Barylski A.). Gdańsk. Polit. Gdańska, Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji 2011, s. 227–232, 8 rys., bibliogr. 7 poz.
- [5] BIEGALSKI H., *Analiza możliwości zdalnej i bezdotykowej oceny właściwości użytkowych ściernic do przecinania*. W: *Problemy i tendencje rozwoju obróbki ściernic*. (Red. Cichosz P.). Wrocław. Polit. Wrocławska, Instytut Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji 2012, s. 351–358, 4 rys., bibliogr. 7 poz.
- [6] FELD M., BIEGALSKI H., KAPCIA J., *Określenie zależności pomiędzy cechami charakterystycznymi ściernic a właściwościami użytkowymi procesu przecinania ściernicowego ze względu na stan warstwy wierzchniej przedmiotu i zagrożenia ekologiczne*. Sprawozdanie końcowe z projektu badawczego nr 481/T07/96/10. Polit. Gdańska, Kat. Techn. Masz. i Autom. Prod. Gdańsk 1999, s. 177, 38 rys., 19 tab., bibliogr. 16 poz. (maszynopis).
- [7] GALL D.A., *Adaptive control of abrasive cut-off operation*. C.I.R.P. – Annuals 17 (3), s. 395–399.
- [8] KACALAK W., *Autokorelacja składników losowych i jej wpływ na estymację modeli procesów szlifowania*. W: (Materiały) XX Jubileuszowa Naukowa Szkoła Obróbki Ściernic. Poznań–Błażejewko, 15–17 września 1997. Poznań: PAN, Polit. Poznańska, Inst. Technologii Mechanicznej, OBR Obrabiarek i Urzędzeń Specjalnych 1997, s. 73–76.
- [9] KUKIEŁKA L., *Podstawy badań inżynierskich*. Warszawa: PWN 2002, s. 411
- [10] MAKAC W., URBANEK D., *Metody opisu statystycznego*. Gdańsk: Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego 2000, 254 s.
- [11] POLAŃSKI Z., *Metody optymalizacji w technologii maszyn*. Warszawa PWN, 322 s.
- [12] PRZYBYLSKI W., *Jakość powierzchni przedmiotów po szlifowaniu ściernicami modyfikowanymi*. W: (Materiały) XXII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernic. Gdańsk–Jurata, 8–10 września 1999. Gdańsk: PAN, Polit. Gdańska, Kat. Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, 1999, s. 245–250.

