

Dr inż. Jan JAWORSKI,  
dr inż. Rafał KLUZ (Politechnika Rzeszowska):

## WYKORZYSTANIE SYGNAŁU WIBROAKUSTYCZNEGO DO DIAGNOZOWANIA STANU WIERTEŁ ZE STALI HS 2-5-1 PRZY WIERCENIU STALI KONSTRUKCYJNYCH

### Streszczenie

Do diagnozowania wiertel w procesie skrawania konieczne jest zidentyfikowanie takich parametrów, które reagują na zmiany wartości zużycia zarówno głównej powierzchni przyłożenia, jak i łysinek. Pomimo ogólnej tendencji do wzrostu siły osiowej i momentu skrawania wraz z wpływem czasu pracy wiertła, żaden z tych parametrów nie może być wykorzystany do diagnozowania stanu narzędzia. W przypadku katastrofального zużycia wiertła obserwuje się intensywny wzrost momentu skrawania i znaczne (3÷5-krotne) zwiększenie amplitudy sygnału akustycznego, objawiające się tzw. skrzypieniem. W pracy wykazano, że jeżeli proces skrawania zostanie zatrzymany w momencie pojawienia się skrzypienia, wtedy katastrofalne zużycie wiertła nie następuje. Wraz ze wzrostem zużycia wiertła amplituda sygnału akustycznego wzrasta tym wcześniej, im większe jest zużycie wiertła. Potwierdzono też, że im większe zużycie wiertła, tym na mniejszej głębokości wiercenia rozpoczyna się wzrost amplitudy sygnału akustycznego.

*Słowa kluczowe: diagnostyka, zużycie, trwałość narzędzi*

## APPLICATION OF VIBROACOUSTIC SIGNAL TO WEAR DIAGNOSE DURING DRILLING STRUCTURAL STEEL BY DRILLS MADE OF HS2-5-1 STEEL

### Abstract

For the diagnosis of drills in the cutting process it is necessary to detect parameters which are react to changes in the wearing of both the primary tool flank and drill margins. Despite a general trend of increase in axial force  $F_f$  and the cutting torque  $M_c$  over the drill worktime none of these parameters can be used to diagnose the state of drill wear. With a catastrophic wear of the drill the rapid increase in cutting torque and significant increase (3-5 fold) in the amplitude of the acoustic signal manifested by the creaking are observed. It is showed that if the cutting process will be stopped at the moment of creaking the catastrophic wear of drill does not occur. With increasing wear of the drill the acoustic signal amplitude increases the earlier, the higher the drill wear. It has also shown that the greater the drill wear the increasing of amplitude begins on a smaller drilling depth.

*Keywords: diagnostics, wear, tool life*

# WYKORZYSTANIE SYGNAŁU WIBROAKUSTYCZNEGO DO DIAGNOZOWANIA STANU WIERTEŁ ZE STALI HS 2-5-1 PRZY WIERCENIU STALI KONSTRUKCYJNYCH

Jan JAWORSKI<sup>1</sup>, Rafał KLUZ<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Przy organizacji procesów skrawania w zautomatyzowanym systemie wytwarzania najbardziej złożone problemy pojawiają się przy ocenie wydajności i niezawodności obróbki. Wysokie wymagania odnośnie jakości obrabianych części determinują technologiczne uszkodzenia jako główny obiekt badań w teorii niezawodności systemu technologicznego [3, 4, 5]. Podczas eksploatacji, system technologiczny podlega oddziaływaniom mechanicznym i cieplnym, które powodują uszkodzenia i zmieniają wartości parametrów jego stanu wyjściowego. Funkcjonowanie wszystkich elementów systemu technologicznego zapewnia realizację procesu technologicznego, ale wskaźniki jakościowe obrabianych części określa w zasadzie oprzyrządowanie technologiczne, obrabiarka i narzędzie.

Przy optymalnych warunkach eksploatacji narzędzia mającego wymagane parametry wyjściowe, dominującym czynnikiem są uszkodzenia spowodowane zużyciem powierzchni skrawających narzędzia. W tym przypadku jako kryterium wyjściowe do jego oceny powinien być wybrany taki parametr zużycia, który spełniał będzie następujące wymagania [8, 9]:

- jednoznacznie w każdej sytuacji przedstawiał zmianę geometrii i właściwości materiału narzędzia,
- monotonicznie wzrastał w strefie normalnego zużycia,
- umożliwiał realizację dokładnych pomiarów,
- być informacyjnie odzwierciedlonym poprzez parametry procesu skrawania przyjęte jako cechy diagnostyczne.

Podstawowym celem diagnostyki procesu skrawania jest określenie właściwego

---

<sup>1</sup> Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Rzeszowskiej, ul. W. Pola 2

stanu narzędzia lub czasu jego wyjścia z eksploatacji w celu jego wymiany a tym samym przywrócenia jego stanu zdadności w zautomatyzowanym systemie wytwarzania. Systemy diagnozowania powinny funkcjonować według następujących procedur [1, 2, 12, 13]:

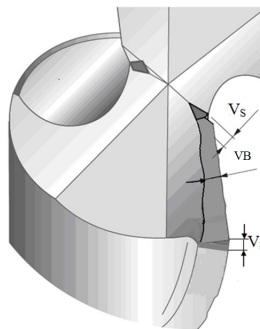
- pomiar parametrów cech diagnostycznych aktualnego stanu narzędzia i stanu jego niezdatności,
- rozpoznawanie aktualnego stanu narzędzia i jego ocena,
- podjęcie decyzji odnośnie wymiany narzędzia lub sterowania procesem technologicznym.

W systemach diagnostycznych rozpoznawanie stanu narzędzia następuje na podstawie sygnałów uzyskanych ze strefy skrawania i realizuje się przy pomocy komputerów, przy czym obróbka danych i podjęcie decyzji następuje w trakcie procesu skrawania. Wysoka częstotliwość próbkowania czujników pozwala na rejestrowanie zmiany cech diagnostycznych zarówno podczas używania się narzędzia jak i przy jego nieoczekiwanym wyjściu z eksploatacji wskutek zniszczenia czy wykruszenia.

## 2. CEL BADAŃ

Ogólne zależności zużycia wiertel przy obróbce otworów w próbkach ze stali konstrukcyjnej C45 wiertłami ze stali szybkotnącej HS 2-5-1 opisano w pracy [5]. Obserwacje zużycia prowadzono na wszystkich elementach części skrawającej wiertła. Kontrolowane miejsca zużycia pokazano na rys.1. Ocenę stopnia zużycia dokonywano według maksymalnych liniowych wielkości na rozpatrywanych powierzchniach. Wykazano, że podczas eksploatacji wiertel z różnymi parametrami skrawania, żadne z kontrolowanych miejsc zużycia nie może być przyjęte jako kryterium zużycia, ponieważ nie spełnia stawianych mu wymagań tzn.:

- nie przedstawia jednoznacznie zmiany geometrii i właściwości materiału narzędzia wynikłych ze używania się ostrza,
- nie wzrasta monotonicznie w strefie normalnego zużycia,
- nie pozwala na wykonanie dokładnych pomiarów.



Rys.1. Miejsca zużycia kontrolowane podczas prowadzonych badań

Przeprowadzone badania w pracy [5, 6] wykazały ponadto że aktualny stan wiertła ze stali HS 2-5-1 przy wierceniu stali konstrukcyjnej można określić według zużycia na głównych powierzchniach przyłożenia a katastrofalne zużycie następuje na pomocniczych powierzchniach przyłożenia (łysinkach). Z przeglądu istniejących metod diagnostycznych wynika, że zalecaną metodą jest ciągła diagnostyka narzędzia w procesie skrawania. Dla diagnozowania wiertel konieczne jest więc określić takie parametry, które reagują na zmiany wielkości miejsc zużycia na głównej powierzchni przyłożenia oraz na łysinkach. Wiadomo [11, 15, 16] że siłowe parametry procesu skrawania zależą od zużycia narzędzia dlatego siłę osiową i moment skrawania badano w celu możliwości ich wykorzystania jako cech diagnostycznych. W procesie badania rozwoju miejsc zużycia wiertel przy wierceniu stali konstrukcyjnych razem z pomiarami miejsc zużycia prowadzono również pomiar siły osiowej i momentu skrawania [7]. W rezultacie przeprowadzonych badań ustalono, że przy katastrofalnym zużyciu wiertła obserwuje się intensywny wzrost momentu skrawania z czego wynika, że moment skrawania można wykorzystać jako kryterium diagnostyczne dla określenia czasu, w którym następuje początek jego katastrofalnego zużycia (wiertło jeszcze nie ulega zniszczeniu). Pomimo ogólnej tendencji do wzrostu siły osiowej  $F_f$  i momentu skrawania  $M_c$  z upływem czasu pracy wiertła, to do czasu wystąpienia katastrofalnego zużycia siła osiowa i moment skrawania zmieniają się niejednakowo. Utrata skrawności wiertel ze stali szybko tnących jest związana ze wzrostem temperatury w części skrawającej, powodującej utratę jej twardości. Ze wzrostem zużycia wzrasta również cieplna deformacja obrabianego otworu. Kiedy wielkość deformacji otworu przekroczy wartość luzu powstającego w rezultacie odwrotnej stożkowatości wiertła, powierzchnia obrabianego otworu może wywołać na łysinki naciski wzrastające ze wzrostem ich zużycia. Spowoduje to niepożądaną zmianę w procesie styku ostrza wiertła na łysinkach i obrabianego otworu i w konsekwencji katastrofalne zużycie wiertła. W warunkach produkcyjnych i laboratoryjnych przyjmuje się jako oznakę zużycia tzw. skrzywienie wiertła, czyli pojawienie się sygnałów akustycznych o określonej częstotliwości [1, 2, 10, 11]. Jednym z dźwiękowych parametrów drgań o słyszalnej częstotliwości jest amplituda sygnału wibroakustycznego. Dlatego celem pracy było badanie zmiany wielkości amplitudy sygnału akustycznego dla ustalenia kryterium dopuszczalnego zużycia wiertła.

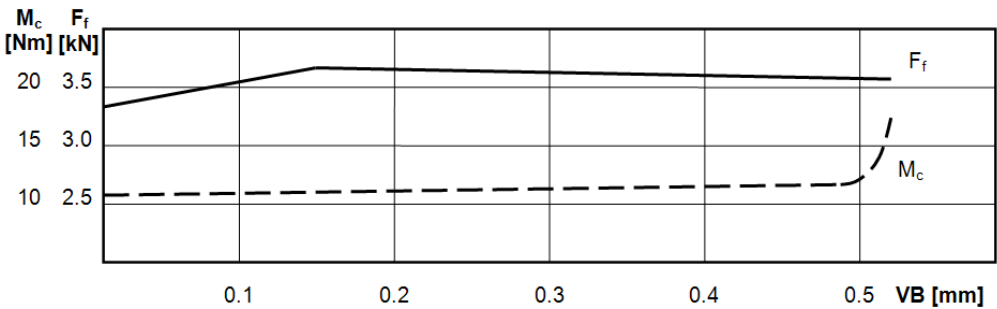
### 3. METODYKA BADAŃ

W celu określenia zużycia wiertel podczas ich eksploatacji przeprowadzono serię badań trwałościowych wiertel  $\Phi 10$  wykonanych ze stali szybko tnącej HS 2-5-1, przy stałych parametrach skrawania, w czasie jednego przyjętego okresu trwałości. Badania prowadzono podczas obróbki otworów na próbkach ze stali C45 o  $R_m = 600$  MPa. Badania trwałości przeprowadzono na wiertarce kolumnowej PK 203, przy następujących parametrach:  $v_c = 40$  m/min i  $f = 0,06$  mm/obr oraz  $v_c = 20$  m/min i  $f = 0,2$

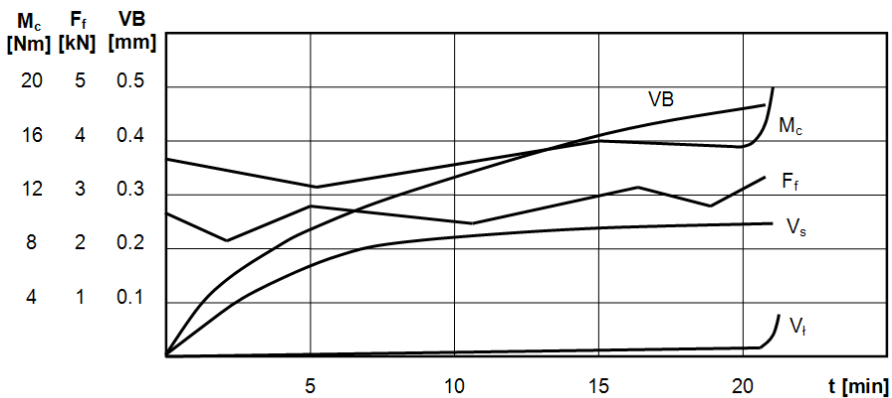
mm/obr, zapewniających trwałość ostrza  $T_c \approx 20$  min. Podczas obróbki, z wymienionymi parametrami skrawania mierzono amplitudę sygnału wibroakustycznego czujnikiem HS 100-ST umieszczonym na wrzecionie wiertarki.

#### 4. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Zmianę siły osiowej  $F_f$  i momentu skrawania  $M_c$  w zależności od wielkości zużycia przedstawiono na rys. 2. Należy zauważyć, że pomimo iż na osi odciętej zaznaczono jedynie wielość zużycia głównych powierzchni przyłożenia wiertła  $VB$  jako determinujących jego stan aktualny, to siła osiowa i moment skrawania przedstawiają sumaryczny wpływ wszystkich miejsc zużycia. Na rysunku 3 pokazano ponadto zależność siły osiowej i momentu skrawania w funkcji zużycia głównych powierzchni przyłożenia. Dla przejrzystości porównano te przebiegi z wielkością i dynamiką zużycia wiertła.



Rys. 2. Zależność siły osiowej  $F_f$  i momentu skrawania  $M_c$  od wielkości zużycia na głównej powierzchni przyłożenia  $VB$

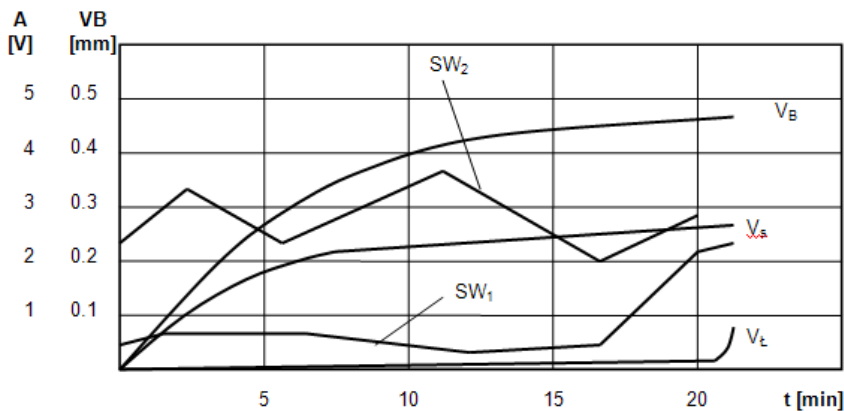


Rys. 3. Zależność siły osiowej  $F_f$ , momentu skrawania  $M_c$  i miejsc zużycia przy obróbce stali C45

Zastosowanie systemu diagnostycznego opartego na pomiarze siły i momentu skrawania do określenia stanu dopuszczalnego zużycia wiertła umożliwiłoby niewątpliwie zwiększenie niezawodności procesu, jednak przeprowadzone badania zmian siły i momentu wiercenia wykazały, że zarówno siła jak i moment skrawania nie mogą stanowić kryterium diagnostycznego [7]. Ustalono jedynie że na podstawie siły osiowej można określić wielkość miejsca zużycia na głównej powierzchni przyłożenia a na podstawie momentu skrawania można określić katastrofalne zużycie.

W produkcyjnych i laboratoryjnych warunkach szerokie zastosowanie jako kryterium zużycia ma tzw. „skrzywienie” będące charakterystycznym sygnałem dźwiękowym pojawiającym się na początku katastrofального zużycia wiertła. Sygnał ten może być związany tylko ze zmianą procesów zachodzących na powierzchniach styku narzędzia z materiałem obrabianym, dlatego przeprowadzono badania eksperymentalne mające na celu zbadanie wpływu zużycia wiertła na wielkość amplitudy sygnału wibroakustycznego i ustalenie czy można na jej podstawie określić dopuszczalne zużycie narzędzia.

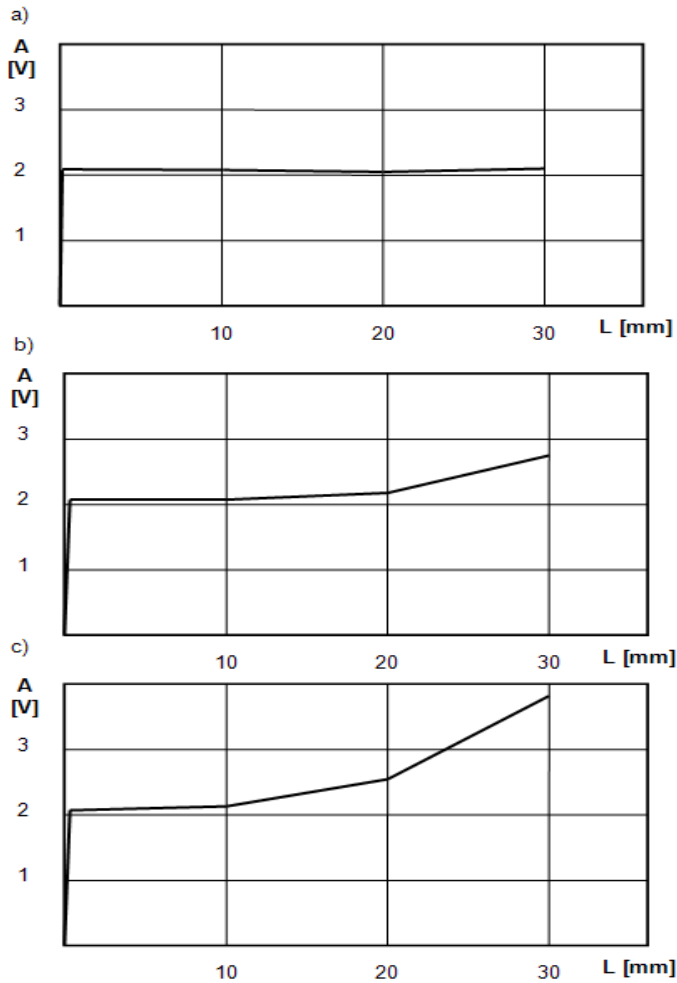
W trakcie przeprowadzonych badań ustalono że wielkość amplitudy  $A$  sygnału akustycznego mierzona na małej głębokości wiercenia  $L$  ( $L=d$ ) ulega nieznacznemu wzrostowi ( $SW_1$ , rys.5) a na głębokości  $L=5d$  jest już kilkukrotnie większa ( $SW_2$ , rys. 5).



Rys. 5. Zależność siły osiowej  $F_B$ , momentu skrawania  $M_c$ , miejsc zużycia i amplitudy sygnału wibroakustycznego przy obróbce stali C45 ( $v_c = 20$  m/min i  $f = 0,2$  mm/obr)

W trakcie badań ustalono, że już przed początkiem katastrofального zużycia wiertła następuje znaczny wzrost amplitudy drgań. Jednakże jeśli w tym momencie zostanie przerwany proces wiercenia i wiertło zostanie wycofane z otworu to nie dochodzi do nowych jakościowych zmian na powierzchni styku wiertła. Wiertło pozostaje zdolne

do pracy (w stanie zdadności) przy wierceniu następnego otworu i do określonej głębokości otworu wartość amplitudy sygnału pozostaje stała, praktycznie nie zależy od wielkości zużycia VB.



Rys. 6. Przebieg zmian średniej wartości amplitudy sygnału wibroakustycznego w zależności od głębokości wiercenia przy  $v_c = 20$  m/min i  $f = 0,2$  mm/obr, a)  $V_B = 0$  mm, b)  $V_B = 0.2$  mm, c)  $V_B = 0.4$  mm

Na rysunku 6 przedstawiono zmianę wartości amplitudy w zależności od wielkości zużycia  $V_B$  i głębokości wiercenia. Jak widać z rysunku po osiągnięciu pewnej głębokości wiercenia wzrasta amplituda, przy czym jej wzrost rozpoczyna się tym wcześniej, im większe jest zużycie  $V_B$ . Oznacza to, że z jednej strony miejsce zużycia na

powierzchni przyłożenia nie jest podstawowym (zasadniczym) źródłem sygnału akustycznego, ale z drugiej strony przy rozwoju tego miejsca do pewnego rozmiaru VB powstają warunki do zwiększenia amplitudy sygnału wibroakustycznej.

Powstające przy wierceniu w strefie skrawania ciepło rozdziela się pomiędzy środowiska uczestniczące w procesie. Jak wiadomo z teorii skrawania powyżej 50% całego ciepła przekazywana jest materiałowi obrabianemu, przy czym ilościowo ciepło wzrasta wraz ze wzrostem miejsca zużycia jako źródła ciepła. Przy wierceniu stali takim narastającym w czasie źródłem ciepła jest zużycie na powierzchni przyłożenia VB ponieważ jego moc zwiększa się ze wzrostem zużycia. Ze wzrostem VB wzrasta również cieplna deformacja obrabianej części, przy czym w częściach typu korpus wiercone otwory deformują się w ten sposób, że ich średnica ulega zmniejszeniu. Po pewnym czasie kiedy deformacja przewyższy luz powstający w rezultacie odwrotnej stożkowatości wiertła obrabiana powierzchnia otworu będzie powodować zmianę powierzchni styku na łysinkach, ich zużycie i w rezultacie katastrofalne zużycie wiertła.

## 5. PODSUMOWANIE

Zastosowanie systemu diagnozowania opartego na pomiarze i analizie siły i momentu skrawania pozwala zwiększyć niezawodność procesu wiercenia jednak nie daje możliwości określenia dopuszczalnego zużycia narzędzi. Najbardziej rozpowszechnionym sposobem ustalenia kryterium katastrofalnego zużycia wiertła przy wierceniu stali konstrukcyjnej jest tzw. „skrzypienie” czyli pojawienie się drgań o określonej częstotliwości. W rezultacie przeprowadzonych badań nad rozwojem miejsc zużycia wiertła ustalono że jeżeli proces skrawania zostanie przerwany w początkowym momencie skrzypienia to katastrofalne zużycie wiertła nie nastąpi. Jeżeli jednak proces wiercenia będzie kontynuowany to łysinki wiertła ulegną zniszczeniu. Wynika z tego że dopuszczalny stan wiertła określa początek zmian w strefie kontaktu na łysinkach, co prowadzi do powstawania drgań w słyszalnym zakresie częstotliwości.

Utrata skrawności wiertel ze stali szybko tnących jest związana ze wzrostem temperatury w części skrawającej, powodującej utratę jej twardości. Ze wzrostem zużycia wzrasta również cieplna deformacja obrabianego otworu, przy czym wykonywane otwory ulegają deformacji w taki sposób, że ich średnica zmniejsza się. Kiedy wielkość deformacji otworu przekroczy wartość luzu powstającego w rezultacie odwrotnej stożkowatości wiertła, powierzchnia obrabianego otworu może wywołać na łysinki naciski wzrastające ze wzrostem ich zużycia. Spowoduje to niepożądaną zmianę w procesie styku ostrza wiertła na łysinkach i obrabianego otworu i w konsekwencji katastrofalne zużycie wiertła.



## LITERATURA

- [1] GÓMEZ M. P., HEY A. M., RUZZANTE J. E., D'ATELLIS C. E.: *Tool wear evaluation in drilling by acoustic emission*, Physics Procedia, vol. 3, Issue 1, 2010, pp. 819-825
- [2] HUANG B.W., KUANG J.H., YU P.P. *Effect of crack on drilling vibration*, Journal of Sound and Vibration, vol.322, Issues 4–5, 2009, pp. 1100-1116
- [3] JAWORSKI J., *Application possibility of tools made of low- alloy high- speed steels in the planned housing*, Archives of Foundry vol.6, No.19, 2006 413-424 (in Polish).
- [4] JAWORSKI J., *Development tendency of cutting tool materials*, Przegląd Mechaniczny , nr 11, 2005 (In Polish).
- [5] JAWORSKI J., KLUZ R., *Badanie zużycia wiertel ze stali HS 2-5-1 przy wierceniu stali konstrukcyjnych*, Mechanik, nr 8-9, 2013.
- [6] JAWORSKI J., KLUZ R.: *Badanie zużycia wiertel z niskostopowej stali szybkotnącej HS 2-5-1 w zautomatyzowanym systemie wytwarzania*. Mechanik, nr 8-9, 2012
- [7] Jaworski J., Kluz R.: *Badanie wpływu zużycia wiertel ze stali HS 2-5-1 na siłę poosiową i moment skrawania przy wierceniu stali konstrukcyjnej*. MECHANIK, nr 8-9, 2014
- [8] JAWORSKI J., *Management quality of tools in the planned housing casting*. Archives of Foundry vol.6, No.19, 2006, 413-424 (in Polish).
- [9] JAWORSKI J., *Tendencje rozwoju materiałów narzędzi skrawających*, Przegląd Mechaniczny, nr 11 2005.
- [10] JEMIELNIAK K., *Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawania*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
- [11] MILLER S.F., BLAU P.J., SHIH A.J.: *Tool wear in friction drilling*. International Journal of Machine Tools and Manufacture, vol. 47, 2007, pp. 1636-1645
- [12] SINOPALNIKOW W.A., GRIGORIEW S.N., *Reliability and diagnosis of technological systems*, MGU STANKIN, Moskwa, 2003.
- [13] STARKOW W.K. *Machining stability and quality controlling in automatized company*. Moskwa Maszynostrojenie , 1989 (in Russia).
- [14] STARKOW W.K.. *Machining. Controlling of stability and quality systems in automatized company*, Moskwa, Maszynostrojenie, 1989.
- [15] YAN J., MURAKAMI Y., DAVIM J.P.: *Tool design, tool wear and tool life* [in:] K. Cheng (ed.), *Machining dynamics. Fundamentals, applications and practices*, Springer-verlag, London 2009, pp. 117-149.
- [16] ZORIKTUEV V.T, NIKITIN Y.A., SIDOROV A.S.: *Monitoring and prediction of cutting-tool wear*, Russian Engineering Research, vol. 28, 2008, pp. 88-91