

Dr inż. Jan Jaworski

Dr inż. Rafał Kluz

Katedra Technologii Maszyn i Inżynierii Produkcji
Politechnika Rzeszowska
Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów
E-mail: jkktmiop@prz.edu.pl, rkkktmiop@prz.edu.pl

Dr hab. inż. Tomasz Trzepieciński

Katedra Przeróbki Plastycznej
Politechnika Rzeszowska
Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów
E-mail: tomtrz@prz.edu.pl

Badania eksploatacyjne dynamiki zużycia wiertel z niskostopowej stali szybkotnącej HS2-5-1

Operational tests of wear dynamics of drills made of low-alloy high-speed HS2-5-1 steel

Słowa kluczowe: *dynamika zużycia, moment skrawania, stal szybkotnąca, wiercenie, zużycie*

Keywords: *wear dynamics, cutting torque, high-speed steel, drilling, wear*

Streszczenie: W celu określenia wpływu zużycia wiertel na wartość siły osiowej oraz momentu skrawania przeprowadzono serię badań trwałościowych wiertel o średnicy 10 mm wykonanych ze stali szybkotnącej HS2-5-1, przy stałych parametrach skrawania, w czasie jednego przyjętego okresu trwałości. Badania prowadzono podczas obróbki otworów na próbkach ze stali C45 oraz z żeliwa EN-GJS-500-7. Określono również dynamikę zużycia na wszystkich częściach skrawających wiertła. Wykazano, że podczas eksploatacji wiertel z różnymi parametrami skrawania, utrata ich skrawności następuje dla różnych wartości wskaźników zużycia. Podczas wiercenia z dużymi prędkościami skrawania i małymi posuwami, utrata skrawności wiertła następuje w obszarze przyspieszonego ich zużycia. Naniesienie powłoki TiN nie zmienia kontrolowanych miejsc zużycia a tylko zmniejsza intensywność zużycia na powierzchni przyłożenia, co powoduje wzrost trwałości wiertła.

Abstract:

To determine the effect of drill wear on the value of the axial force and cutting torque, a series of durability tests of drills with a diameter of 10 mm made of high-speed steel HS2-5-1 were carried out. The investigations were conducted during the durability period and at constant values of cutting parameters. The tests were carried out while drilling holes in samples made of C45 steel and EN-GJS-500-7 cast iron. The dynamics of wear on all parts of the drill was also determined. It has been shown that while drilling with different values of cutting parameters, there is a loss of machinability for different values of the wear indicators. While drilling with high cutting speeds and with small feeds, there is a loss of cutting ability in the area of accelerated wear. The application of TiN coating does not change the controlled wear locations. TiN coating only reduces the intensity of wear on the tool flank, which increases the durability of the drill.

1. Wprowadzenie

Narzędzie skrawające z określonymi parametrami stanu wyjściowego rozpoczyna pracę przy parametrach obróbki, dla których zostało zaprojektowane. W procesie skrawania z upływem czasu pod wpływem obciążeń termodynamicznych i mechanicznych parametry geometryczne ostrza zmieniają swoją wartość. Żywotność narzędzia jest scharakteryzowana całym okresem jego eksploatacji uwzględniającym konieczność jego ostrzenia w celu zapewnienia stanu gotowości do wykonywanej pracy [1, 7]. Wszystkie ilościowe wskaźniki trwałości narzędzia (m.in. prawdopodobieństwo niezawodnego działania narzędzia, trwałość, średnia trwałość, funkcja gęstości trwałości) mogą być określane tylko w wyniku przeprowadzonych eksperymentów na gotowym nowym narzędziu, posiadającym określone wskaźniki stanu wyjściowego, a także na podstawie statystycznych obserwacji narzędzia w procesie jego eksploatacji.

Procesy tribologiczne występujące w miejscach styku ostrza skrawającego z przedmiotem obrabianym prowadzą do zużycia, a następnie do nagłej lub stopniowej utraty skrawności narzędzia [18, 24, 26]. Do objawów zużycia ostrza należy zaliczyć [5, 11, 23, 29]: zmianę geometrii ostrza, zmiany właściwości fizykochemicznych wskutek przemian chemicznych w warstwie wierzchniej materiału, a także pęknięcia oraz ubytki materiału narzędzia skrawającego.

Zmiany stereometrii ostrza związane z jego zużyciem wpływają na przebieg procesu wiercenia otworu [14]. Wpływ zużycia wiertła na dokładność wiercenia głębokich otworów był badany przez Wieczorowskiego i Matuszaka [28]. Katastroficzne zużycie narzędzia ze stali szybko tnącej związane jest ze wzrostem temperatury w jego części skrawającej do wartości powodujących zmianę podstawowych właściwości narzędzia [5, 29]. Analiza wyników badań Meena i El Mansori [21] wykazała, że obróbka żeliwa z dużą wartością szybkości skrawania w połączeniu z niskimi wartościami posuwu zwiększa wartość sił skrawania oraz zwiększa energię właściwą skrawania. Dla wiertła przy ustalonej specyfice zużycia, temperatura może wzrastać tylko wskutek wzrostu mocy źródła ciepła na głównych powierzchniach przyłożenia. Od tych źródeł ciepła na etapie ustalonego zużycia nagrzewa się część skrawająca wiertła, w tym strefy pomocniczych powierzchni przyłożenia (łysinek) [4]. W warunkach produkcyjnych i laboratoryjnych za początek katastroficznego zużycia wiertła przyjmuje się charakterystyczny dźwięk „skrzypienia” [32]. Sygnał ten związany jest jedynie ze zmianami tribologicznymi w miejscu styku powierzchni skrawających wiertła z materiałem obrabianym. Początek tego procesu odzwierciedla zwiększenie amplitudy sygnału akustycznego i wzrost momentu tarcia powstającego na łysinkach wiertła [6]. Stopień zużycia ostrza jest oceniany za pomocą wielu kryteriów, które można podzielić na cztery grupy [27]: technologiczne, fizykalne, ekonomiczne oraz geometryczne.

Według Pancielejko [22] przy określaniu zużycia wiertel niepowlękanych, jak i z twardymi powłokami, wskazane jest stosowanie kilku wskaźników zużycia. Badania eksploatacyjne wiertel krętych wykonanych ze stali szybko tnącej HS6-5-2 bez powłoki oraz z powłokami węglikoazotku tytanu Ti(C, N) wykazały, że zastosowane wskaźniki charakteryzujące zużycie wiertel na narożach, łysince prowadzącej i krawędzi poprzecznej dobrze charakteryzują przebieg zużycia badanych wiertel. Badania Liu i in. [20] wykazały, że za najistotniejsze kryterium zużycia ostrza należy uznać zużycie w narożu wiertła.

Dla zapewnienia odpowiedniej trwałości wiertel konieczne jest zbadanie stanu narzędzia w konkretnych warunkach jego eksploatacji i określenie, który zmieniający się wskaźnik zużycia może służyć za kryterium jego oceny. W celu określenia wpływu zużycia wiertel podczas ich eksploatacji na wartość siły osiowej oraz momentu skrawania przeprowadzono serię badań trwałościowych wiertel podczas obróbki otworów na próbkach

ze stali C45 oraz z żeliwa EN-GJS-500-7. Ocenę dynamiki zużycia dokonywano według maksymalnych liniowych wartości zużycia na wszystkich częściach skrawających wiertła.

2. Uzasadnienie podjętych badań

W celu zwiększenia wydajności i niezawodności procesów obróbki skrawaniem możliwy jest taki dobór parametrów skrawania, dla których w warunkach normalnego zużycia narzędzia zapewnione jest wymagane prawdopodobieństwo spełnienia wszystkich wymagań jakościowych obrabianej części [25]. Niezawodność procesu skrawania uwarunkowana jest założonym okresem trwałości narzędzia, siłą skrawania, jakością i dokładnością obrabianych części [15, 30].

W procesie skrawania z upływem czasu pod wpływem termodynamicznych obciążeń parametry geometryczne ostrza zmieniają swoją wartość. Dla zapewnienia efektywnej obróbki skrawaniem i niezbędnej wydajności oraz dla obliczenia kosztów zużycia narzędzia, powinno się określić wskaźniki, które mogą służyć za kryterium oceny zużycia narzędzia. W związku z tym dla zapewnienia niezawodności diagnozowania konieczne jest przede wszystkim zbadanie stanu narzędzia w konkretnych warunkach jego eksploatacji [6, 9].

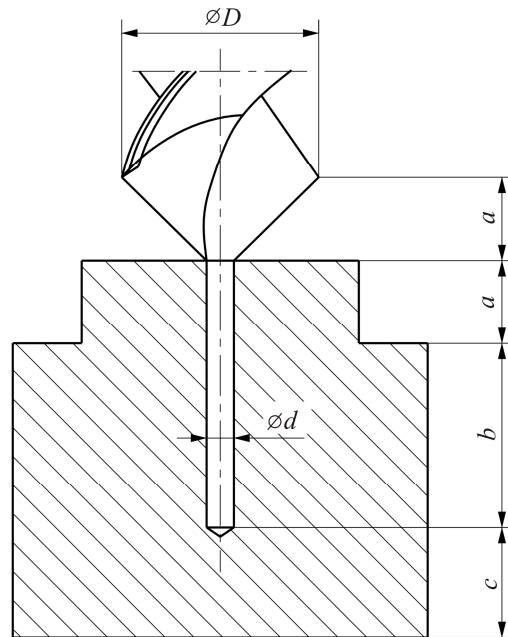
Dominującym czynnikiem określającym trwałość narzędzia w optymalnych warunkach eksploatacji są uszkodzenia spowodowane zużyciem powierzchni skrawających narzędzia [16, 17]. Jako kryterium wyjściowe służące do oceny stanu narzędzia powinien być wybrany taki wskaźnik zużycia, który będzie jednoznacznie przedstawiał zmiany geometrii i właściwości materiału narzędzia wynikające ze zużywania się ostrza, jednocześnie będzie monotonicznie wzrastał w strefie normalnego zużycia oraz umożliwiał realizację dokładnych pomiarów [3, 10, 25]. Podczas eksploatacji narzędzia bardzo trudno jest określić optymalny, ekonomicznie uzasadniony, moment wymiany narzędzia. Dopuszczalne wartości zużycia podawane przez producentów narzędzi w specyficznych warunkach obróbki mogą się zasadniczo różnić od wartości zużycia zapewniających pełne wykorzystanie jego możliwości skrawnych [11].

Monitorowanie i nadzór nad stanem ostrza może wykonywać człowiek-operator, lub zadania te mogą być realizowane automatycznie. W przypadku nadzorowania naturalnego zużycia ostrza przez człowieka, operator monitoruje zwykle jego stan na podstawie oceny jakości powierzchni przedmiotu uzyskanej po obróbce, zjawisk towarzyszących skrawaniu oraz obserwacji zmian geometrii ostrza, w czasie przerw w obróbce. Obecnie na rynku istnieją systemy monitorowania stanu ostrza narzędzi skrawających metodami pośrednimi i bezpośrednimi. Są one zróżnicowane i wykazują różną skuteczność [13]. System monitorowania założonego stanu zużycia narzędzia, uwzględniający możliwość dalszego jego rozwoju dla stworzenia zintegrowanego systemu sterowania adaptacyjnego procesem zapewniającego maksymalizację wydajności skrawania, zaproponowano w pracy [2].

3. Metodyka badań

3.1. Określenie siły i momentu skrawania

W celu określenia wpływu zużycia wiertel podczas ich eksploatacji na wartość siły osiowej i momentu skrawania przeprowadzono serię badań trwałościowych wiertel o średnicy $D = 10$ mm wykonanych ze stali szybko tnącej HS2-5-1, przy stałych parametrach skrawania, w czasie jednego przyjętego okresu trwałości. Badania prowadzono podczas obróbki otworów wstępnych o średnicy $d = 4$ mm na specjalnie przygotowanych próbkach (rys. 1) ze stali C45. Wartości siły osiowej i momentu skrawania mierzono przy pomocy dynamometru firmy Kistler 9123 CQ05. Dynamometr był ustawiony na wiertarce tak, aby oś wiertła przechodziła przez środek stołu.



Rys. 1. Próbkę do pomiarów oporów skrawania: a – odcinek skrawania głównymi krawędziami skrawającymi, b – odcinek skrawania głównymi krawędziami skrawającymi i łysinkami, c – odcinek skrawania wszystkimi krawędziami skrawającymi

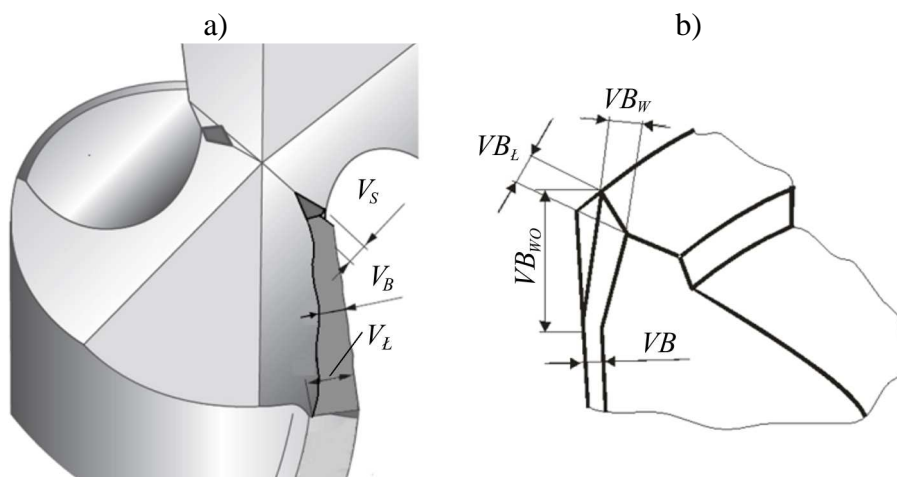
Fig. 1. Sample for the measurement of the machining resistances: a - section of the machine with main cutting edges, b - section of the machine with main cutting edges and the drill margins, c - section of the machine with all the cutting edges

Wartość momentu skrawania przypadającą na łysinki wiertła określono jako różnicę między wartością momentu zarejestrowaną na odcinku a i b (rys. 1). Na odcinku a (rys. 1) w skrawaniu bierze udział tylko główna krawędź skrawająca a na odcinku b (rys. 1) główna i pomocnicza krawędź skrawająca. Obserwacje zużycia prowadzono na wszystkich częściach skrawających wiertła. Ocenę stopnia zużycia dokonywano na podstawie maksymalnych liniowych wartości zużycia na rozpatrywanych powierzchniach.

3.2. Badania zużycia wiertel

W literaturze brak jest informacji dotyczącej takiego miejsca zużycia wiertła przy obróbce stali, które można przyjąć jako jednoznaczne kryterium jego zużycia. Dlatego celem badań było określenie, które z kontrolowanych miejsc zużycia wiertła ze stali HS2-5-1 może stanowić takie kryterium. Parametry zużycia, które były kontrolowane podczas obróbki próbek ze stali C45 oraz żeliwa EN-GJS-500-7 przedstawiono na rys. 2a i rys. 2b. Jak wykazały badania Pancielejko [22] proces zużywania się wiertła podczas obróbki żeliwa wykazuje odmienny charakter. Często stosowany jako jedyny, wskaźnik VB (charakteryzujący zużycie na powierzchni przyłożenia narzędzi) - przy obróbce żeliwa szarego nie odzwierciedla rzeczywistego stopnia zużycia wiertel i może prowadzić do nadmiernego zużycia ostrzy narzędzi w innych strefach [22]. Odmienny charakter zużycia narzędzi do wiercenia w stali i żeliwie jest powodem rozwijania wiertel, przeznaczonych tylko do wiercenia w żeliwie, o specjalnej geometrii zapewniającej zmniejszenie zużycia ostrza i wartości siły skrawania [31].

Podczas obróbki stali zużyciu głównie podlega powierzchnia przyłożenia ostrza, natomiast powodem katastroficznego zużycia jest zużywanie się łysinek. Przy obróbce żeliwa to właśnie zużycie powierzchni przyłożenia jest przyczyną wyłączenia wiertła z eksploatacji.



Rys. 2. Miejsca zużycia kontrolowane podczas badań trwałości wiertel przy obróbce stali C45 (a) oraz żeliwa EN-GJS-500-7 (b): V_S - zużycie poprzecznej krawędzi skrawającej; V_L - zużycie łysinki; V_B, V_B - zużycie powierzchni przyłożenia ostrza wiertła; V_{B_L} - zużycie powierzchni przyłożenia łysinki; V_{B_W} - zużycie wierzchołka; $V_{B_{WO}}$ - zużycie powierzchni przyłożenia wierzchołka [12]

Fig. 2. Areas of wear controlled during durability testing of drills while turning C45 steel (a) and EN-GJS-500-7 cast iron (b): V_S - wear of flank of chisel edge; V_L - wear of drill margin; V_B, V_B - wear of tool flank; V_{B_L} - wear of drill margin flank; V_{B_W} - wear of blade corner; $V_{B_{WO}}$ - wear of corner flank [12]

Badania zużycia ostrza wiertel podczas wiercenia w stali C45 przeprowadzono na wiertarce kolumnowej PK 203, przy następujących parametrach: prędkość skrawania $v_c = 40$ m/min, posuw $f = 0,06$ mm/obr oraz $v_c = 20$ m/min i $f = 0,2$ mm/obr, zapewniających trwałość ostrza $T_c \approx 20$ min. Badano zmianę wartości następujących parametrów zużycia ostrza: V_S - zużycie poprzecznej krawędzi skrawającej, V_L - zużycie łysinki, V_B - zużycie powierzchni przyłożenia ostrza wiertła.

Zużycie łysinki V_L mierzono poprzez pomiar średnicy wiertła na wierzchołkach. Podczas obróbki, z wymienionymi parametrami skrawania, badano po 10 wiertel, co pozwoliło uzyskać statystycznie istotne zależności wartości oczekiwanych dla badanych parametrów zużycia wiertel.

Badania trwałości wiertel podczas wiercenia w żeliwie EN-GJS-500-7 przeprowadzono przy prędkości skrawania $v_c = 20$ m/min i trzech wartościach posuwu $f = 0,1$ mm/obr, $f = 0,3$ mm/obr oraz $f = 0,4$ mm/obr, zapewniających trwałość ostrza $T_c = 15$ min, co odpowiadało obróbce 80-100 otworów. W badaniach trwałości wiertel podczas wiercenia w żeliwie analizowano zmianę wartości następujących parametrów zużycia ostrza: V_B - zużycie powierzchni przyłożenia ostrza wiertła, V_{B_L} - zużycie powierzchni przyłożenia łysinki, V_{B_W} - zużycie wierzchołka, $V_{B_{WO}}$ - zużycie powierzchni przyłożenia wierzchołka.

W badaniach stosowano wiertła z powłoką TiN oraz bez powłoki. W celu określenia wpływu naniesionej powłoki TiN na zużycie wiertła przeprowadzono dodatkowo serię badań trwałościowych na specjalnie przygotowanych wiertłach o średnicy $D = 10$ mm, na które naniesiono powłokę TiN o grubości 0,008 mm. Badania przeprowadzono przy $v_c = 20$ m/min, $f = 0,2$ mm/obr, zapewniających okres trwałości ostrza $T_c = 25$ min, co odpowiadało liczbie 100÷150 otworów.

Skład chemiczny oraz podstawowe właściwości mechaniczne badanych materiałów przedstawiono odpowiednio w tabeli 1 oraz 2.

Tabela 1. Skład chemiczny badanych materiałów [8, 19]

Table 1. Chemical composition of the tested materials [8, 19]

Materiał	Stężenie masowe pierwiastków, %									
	C	Mn	Si	Cr	Ni	S	Mg	P	Cu	Sn
C45	0,42-0,50	0,50-0,80	0,17-0,37	max. 0,30	max. 0,30	0,04	-	-	-	-
EN-GJS-500-7	3,78	0,32	2,5	0,03	-	0,065	0,05	0,038	0,01	0,004

Tabela 2. Podstawowe właściwości mechaniczne badanych materiałów [8]

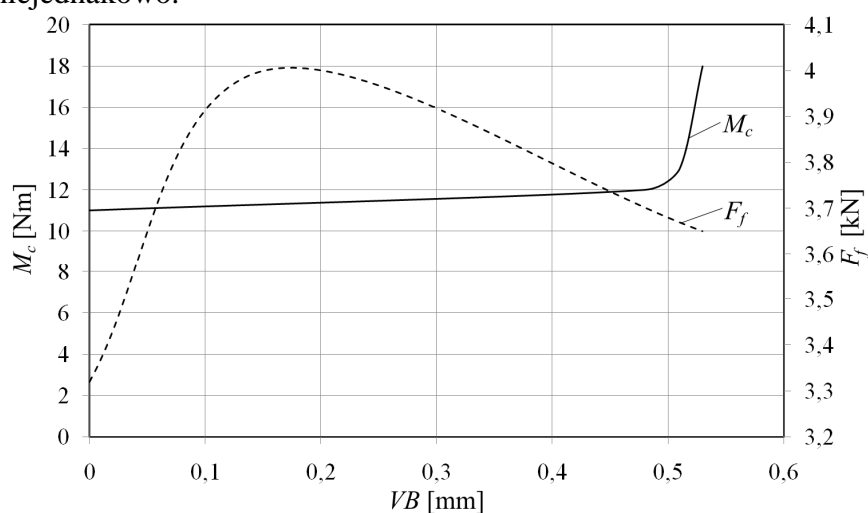
Table 2. Basic mechanical properties of the tested materials [8]

Materiał	Granica plastyczności R_e [MPa]	Wytrzymałość na rozciąganie R_m [MPa]	Wydłużenie A_5 [%]	Twardość HB
C45	420	670	16	241
EN-GJS-500-7	320	500	7	170-230

4. Wyniki oraz ich analiza

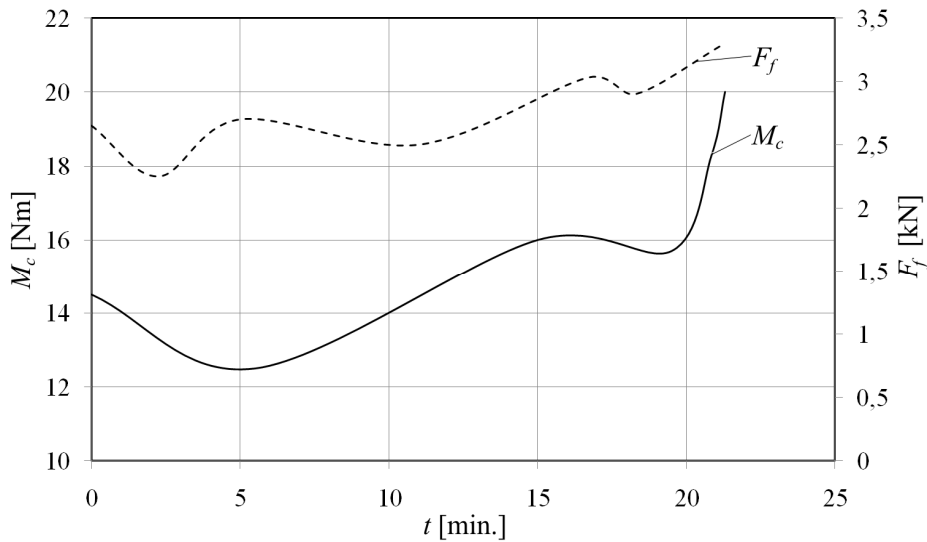
4.1. Wpływ zużycia wiertel ze stali HS2-5-1 na siłę osiową i moment skrawania

Zmiany wartości siły osiowej F_f i momentu skrawania M_c w zależności od wartości zużycia na głównej powierzchni przyłożenia przedstawiono na rys. 3. Należy zauważyć, że chociaż na osi rzędnej zaznaczono jedynie wartość zużycia głównej powierzchni przyłożenia wiertła jako determinujących jego stan aktualny, to wartość siły osiowej i momentu skrawania przedstawiają sumaryczny wpływ wszystkich miejsc zużycia. Przy katastroficznym zużyciu wiertła obserwuje się intensywny wzrost momentu skrawania (rys. 3, 4), a więc parametr ten można wykorzystać dla określenia czasu, w którym następuje katastroficzne zużycie wiertła. Pomimo zaobserwowanej ogólnej tendencji do wzrostu wartości siły osiowej F_f i momentu skrawania M_c wraz z upływem czasu pracy wiertła, to do chwili wystąpienia katastroficznego zużycia ostrza wartość siły osiowej i momentu skrawania zmieniają się niejednakowo.



Rys. 3. Zależność siły osiowej F_f i momentu skrawania M_c od wartości zużycia na głównej powierzchni przyłożenia ostrza VB podczas obróbki stali C45 wszystkimi częściami wiertła przy $v_c = 20$ m/min i $f = 0,2$ mm/obr

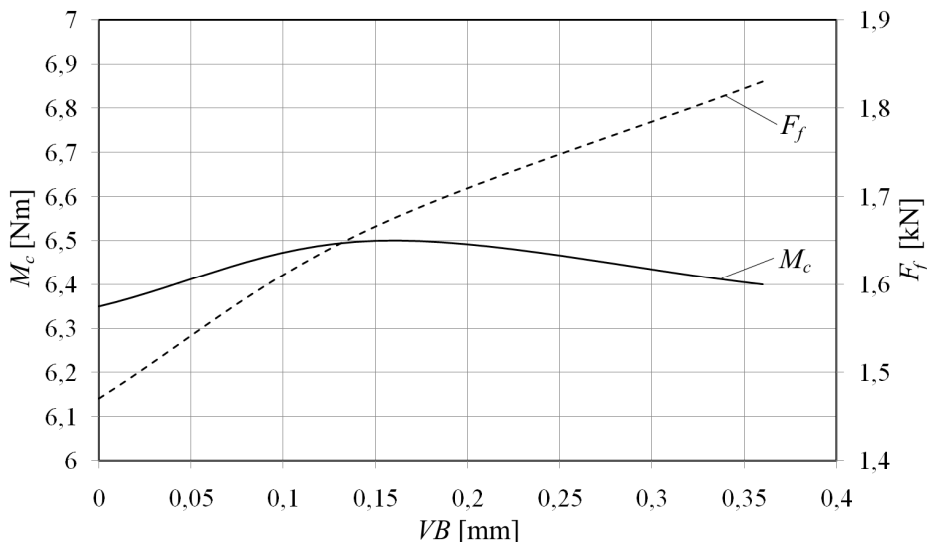
Fig. 3. Dependence of the axial force F_f and the cutting torque M_c vs. size of wear on the main tool flank VB while turning C45 steel with all parts of the drill at $v_c = 20$ m/min and $f = 0.2$ mm/rev



Rys. 4. Wpływ czasu obróbki t na wartość siły osiowej F_f i momentu skrawania M_c podczas obróbki stali C45 przy $v_c = 20$ m/min i $f = 0,2$ mm/obr

Fig. 4. Effect of machining time t on the value of the axial force F_f , the cutting torque M_c while turning C45 steel at $v_c = 20$ m/min and $f = 0.2$ mm/rev

Brak jednoznacznej zależności między wartością zużycia wiertła na głównych powierzchniach przyłożenia VB oraz siłą osiową i momentem skrawania można uzasadnić tym, że wiertło zużywa się nie tylko na głównych powierzchniach przyłożenia, ale również na przejściowej krawędzi skrawającej, powierzchniach przylegających do przejściowej krawędzi skrawającej (ścina) i na łysince. Wyniki zmian siły osiowej F_f i momentu skrawania M_c w funkcji zużycia głównej powierzchni przyłożenia przy skrawaniu tylko głównymi krawędziami skrawającymi przedstawiono na rys. 5.



Rys. 5. Zależność zmiany siły osiowej F_f i momentu skrawania M_c w funkcji zużycia głównej powierzchni przyłożenia przy skrawaniu tylko głównymi krawędziami skrawającymi; parametry skrawania: $v_c = 20$ m/min i $f = 0.2$ mm/obr

Fig. 5. Dependence of the axial force F_f and the cutting torque M_c vs wear of the main tool flank VB while turning with main cutting edges; cutting parameters: $v_c = 20$ m/min and $f = 0.2$ mm/rev

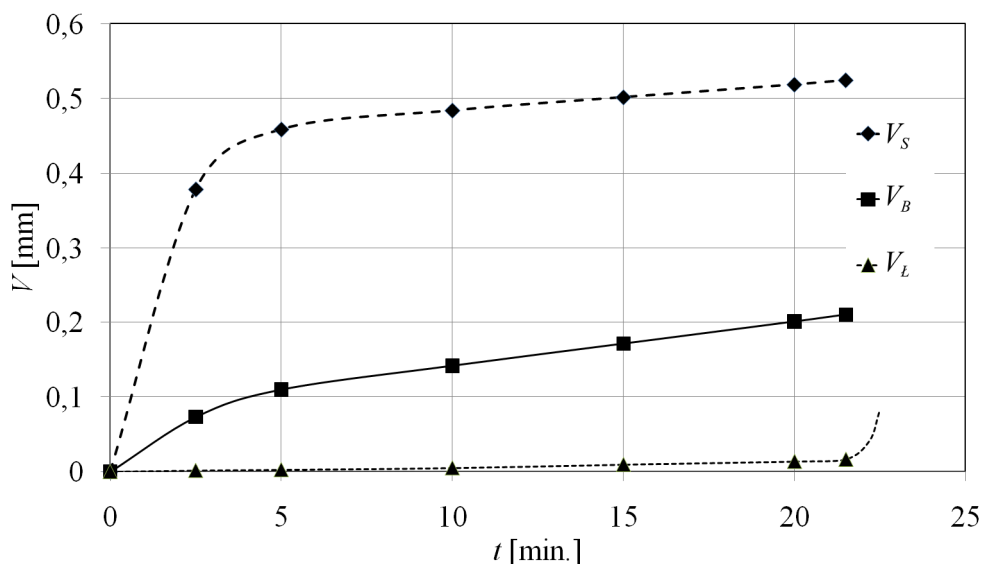
Zwiększenie zużycia na głównych powierzchniach przyłożenia V_B prowadzi w przybliżeniu do liniowego wzrostu siły osiowej F_f przypadającej na główne krawędzie skrawające. Po osiągnięciu określonej wartości zużycia na przejściowej krawędzi skrawającej i na powierzchniach przylegających do ściana następuje zmiana kształtu przejściowej krawędzi skrawającej. W związku z tym nie udało się ustalić zależności pomiędzy siłą osiową przypadającą na przejściową krawędź skrawającą a zużyciem powierzchni przylegających do ściana.

Mimo, że wartość zużycia łysinki zwiększa się nieznacznie w trakcie eksploatacji wiertła, to obserwuje się znaczny wzrost wartości momentu skrawania przypadającego na główne powierzchnie przyłożenia. W miarę zużycia wiertła wzrasta ilość ciepła wydzielającego się w strefie skrawania i wywołanych tym zjawiskiem deformacji cieplnych obrabianej części. Ze wzrostem zużycia ostrza wiertła, wiercone otwory deformują się w ten sposób, że ich średnica zmniejsza się [11]. Po upływie czasu kiedy deformacja przewyższy luz powstający w rezultacie odwrotnej stożkowatości wiertła obrabiana powierzchnia otworu będzie powodować zmianę powierzchni styku na łysinkach, ich zużycie i powstanie katastroficznego zużycia wiertła.

Zaobserwowane wartości zużycia łysinki wiertła są nieznaczne, a więc przejściowa krawędź skrawająca w procesie skrawania nie uczestniczy. Można przyjąć, że wzrost momentu skrawania przypadający na łysinki jest spowodowany zużyciem na głównych powierzchniach przyłożenia.

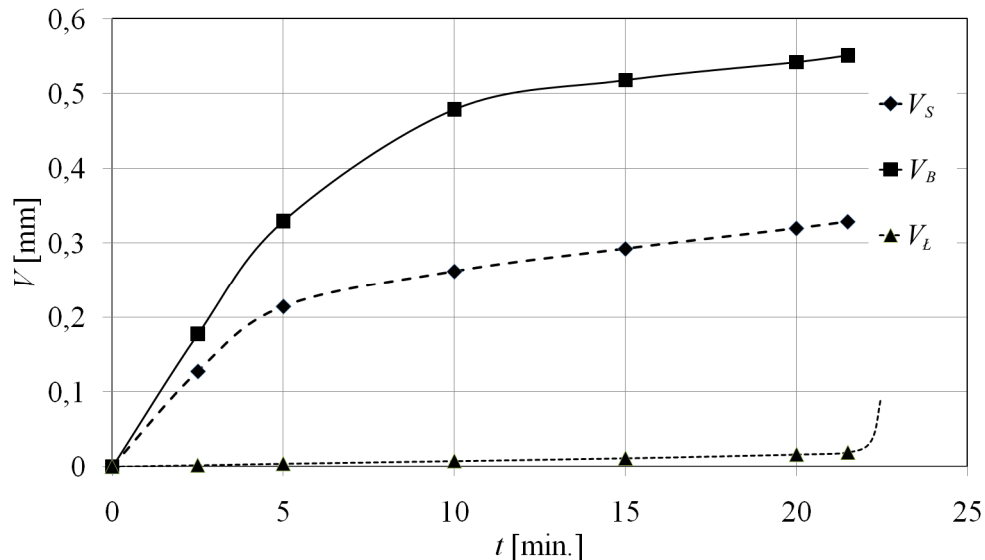
4.2. Zużycie ostrza wiertła podczas obróbki stali C45

Zmiany wartości wskaźników zużycia wiertel ze stali HS2-5-1 bez powłoki w kontrolowanych miejscach, przy obróbce stali C45 przedstawiono na rys. 6 i 7. Zużycie na powierzchni przyłożenia V_B występuje przy obydwu zastosowanych parametrach skrawania. W okresie dotarcia wiertel intensywnie zużywa się przejściowa krawędź skrawająca, a zużycie łysinki jest prawie niezauważalne, aż do momentu wystąpienia katastroficznego zużycia wiertła.



Rys. 6. Dynamika zmian wartości parametrów zużycia przy obróbce stali C45 przy $v_c = 40$ m/min i $f = 0.06$ mm/obr

Fig. 6. Dynamics of the variation of the wear parameters while drilling C45 steel at $v_c = 40$ m/min and $f = 0.06$ mm/rev



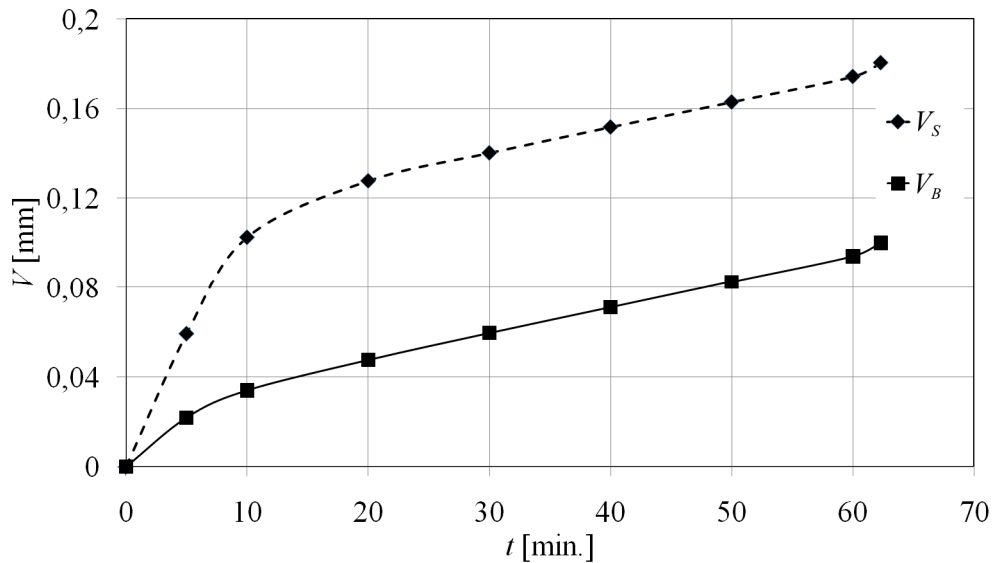
Rys. 7. Dynamika zmian wartości parametrów zużycia przy obróbce stali C45 przy $v_c = 20$ m/min i $f = 0,2$ mm/obr

Fig. 7. Dynamics of the variation of the wear parameters while drilling C45 steel at $v_c = 20$ m/min and $f = 0.2$ mm/rev

Zużycie zarówno na powierzchni przyłożenia V_B jak i na przejściowej krawędzi skrawającej V_S , monotonicznie wzrasta w okresie normalnego zużycia. Żaden z tych parametrów nie odzwierciedla momentu wystąpienia katastroficznego zużycia wiertła. Wartości parametrów V_B i V_S w momencie wystąpienia zużycia katastroficznego zależą od wartości parametrów skrawania. Zużycie na powierzchni przyłożenia V_B w momencie wystąpienia katastroficznego zużycia ostrza przy $v_c = 40$ m/min i $f = 0,6$ mm/obr wynosi 0,2 mm (rys. 6) natomiast przy $v_c = 20$ m/min i $f = 0,2$ mm/obr wynosi około 0,55 mm (rys. 7).

Z badań wiertel z naniesioną powłoką TiN (rys. 8) wynika, że ich zużycie przebiega podobnie jak wiertel bez pokrycia, jednak intensywność zużycia kontrolowanych obszarów jest mniejsza, co powoduje wzrost trwałości ostrza. Naniesienie powłoki TiN nie zmienia zatem miejsc zużycia lecz tylko powoduje zmniejszenie intensywności zużycia.

Specyfika zużycia wiertel ze stali HS2-5-1 przy obróbce stali polega przede wszystkim na zużywaniu się powierzchni przyłożenia, a utrata ich skrawności (katastroficzne zużycie) następuje nieoczekiwanie na powierzchni łysinki V_L . Aby zapobiec takiemu nieoczekiwanemu zużyciu konieczne jest poznanie, na podstawie przeprowadzonych badań, wartości dopuszczalnego zużycia na powierzchni przyłożenia wiertła. Wartości nacisków w trakcie wiercenia są tego samego rzędu, jak w przypadku zgrzewania tarcowego i prowadzą do katastroficznego zużycia łysinki. Wiadomo powszechnie [10, 25], że dopuszczalna wartość zużycia na powierzchni przyłożenia, od której rozpoczyna się utrata skrawności wiertła zależy od warunków skrawania, a przede wszystkim od parametrów skrawania. Określenie dopuszczalnej wartości zużycia V_B , przy której rozpoczyna się katastroficzne zużycie łysinki nie jest jednak możliwe. Można to wyjaśnić tym, że wartość deformacji wierconych otworów pod wpływem temperatury, prowadząca do katastroficznego zużycia ostrza wiertła zależy od bardzo wielu parametrów, często ze sobą skorelowanych [12].



Rys. 8. Dynamika zmian wartości parametrów zużycia przy obróbce stali C45 wiertłem z powłoką TiN przy $v_c = 20$ m/min i $f = 0,2$ mm/obr

Fig. 8. Dynamics of the variation of the wear parameters while drilling C45 steel using TiN coated drill at $v_c = 20$ m/min and $f = 0.2$ mm/rev

4.3. Zużycie ostrza wiertła podczas obróbki żeliwa EN-GJS-500-7

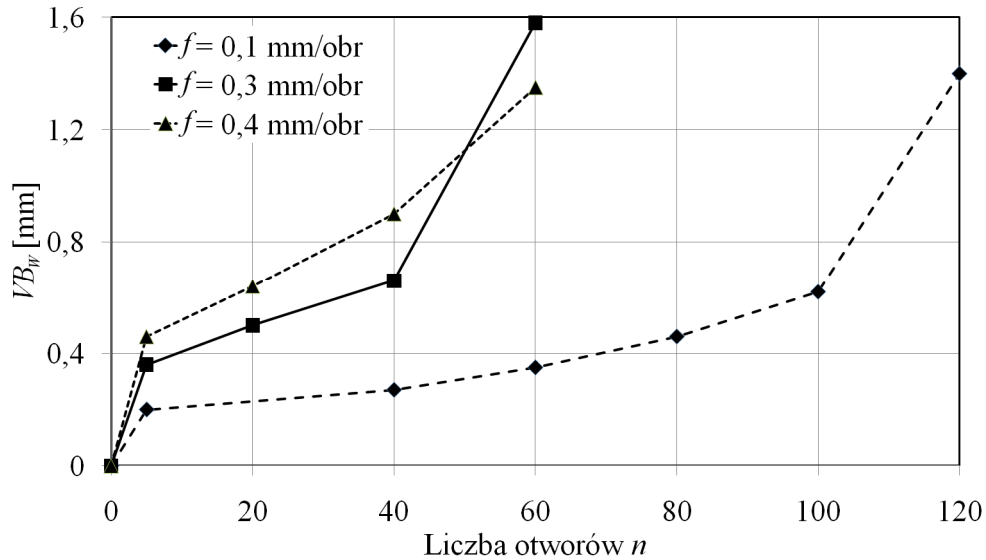
Zwiększenie wartości posuwu od wartości $f = 0,1$ mm/obr do $f = 0,4$ mm/obr powoduje około dwukrotne zwiększenie wartości parametrów VB_{WO} , VB_W oraz VB_L , przy których rozpoczyna się okres normalnego zużycia wiertła (rys. 9-11). Uwzględniając wszystkie stosowane wartości posuwu strefa normalnego zużycia rozpoczyna się w zakresie wartości parametrów: $VB = 0,07-0,1$ mm, $VB_L = 0,15-0,3$ mm, $VB_W = 0,2-0,46$ mm, $VB_{WO} = 0,3-0,54$ mm. W okresie normalnego zużycia w kontrolowanych miejscach ostrza następuje monotoniczny wzrost wartości wszystkich badanych parametrów (rys. 9-12). Wartość posuwu istotnie wpływa na moment rozpoczęcia szybkiego wzrostu wartości zużycia na powierzchni przyłożenia wierzchołka VB_{WO} . Gwałtowny wzrost wartości parametru VB_{WO} podczas wiercenia z posuwem $f = 0,1$ mm/obr następuje po wykonaniu około $n = 100$ otworów. Po trzykrotnym zwiększeniu wartości posuwu gwałtowny wzrost zużycia na powierzchni przyłożenia wierzchołka następuje przy wartości parametru $VB_{WO} = 0,7$ mm po wykonaniu około 40 otworów. Prowadzi to do „przerwania łysinki” uniemożliwiając dalszą kontrolę zużycia ostrza na powierzchni przyłożenia wierzchołka.

Intensyfikacja procesu zużycia sprawia, że po upływie pewnego czasu zużycie VB_W obejmuje całą szerokość łysinki. W tych warunkach, po zerwaniu bazy pomiarowej, pomiar zużycia powierzchni przyłożenia łysinki VB_L jest niemożliwy (rys. 11). Szybkie zwiększenie zużycia wierzchołka ostrza VB_W nie wywołuje istotnego wpływu na zmianę wartości pozostałych parametrów zużycia, których wartość wzrasta monotonicznie. Jedynie wartość parametru VB uzyskanego podczas wiercenia z posuwem $f = 0,1$ mm/obr w całym okresie normalnego zużycia utrzymuje się na stałym poziomie (rys. 12). Oznacza to, że utrata skrawności ostrza nie następuje, a szybki rozwój zużycia wierzchołka wiertła nie może być uważany za początek jego przyspieszonego zużycia.

Podczas eksploatacji wiertła szybki wzrost zużycia VB_W nie powoduje utraty skrawności ostrza. Następuje zwiększenie intensywności zużycia wierzchołka ostrza, a tym samym przejście zużycia wiertła z pierwszej do drugiej fazy normalnego zużycia. Utrata skrawności następuje w wyniku intensyfikacji zużycia powierzchni przyłożenia wierzchołka. Moment

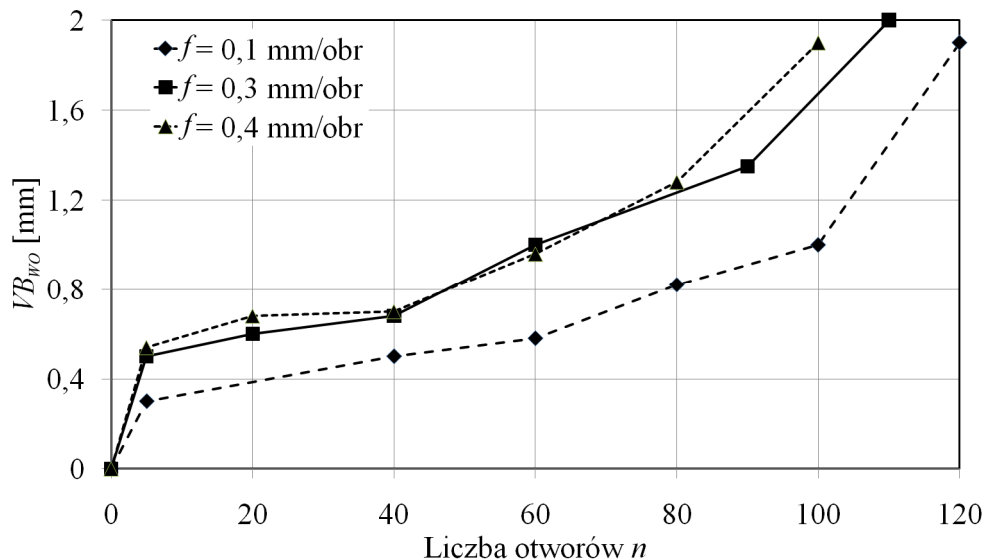
utruty skrawności zależy od wartości posuwu i następuje po wykonaniu około 80-100 otworów (rys. 10).

Charakter zmian zużycia powierzchni przyłożenia wierzchołka VB_{WO} w pierwszej (do 40 otworów) i drugiej (po wykonaniu 40 otworów) fazie normalnego zużycia zmienia się nieznacznie (rys. 10). Strefa przyspieszonego zużycia przy obróbce z posuwami $f = 0,3$ mm/obr oraz $f = 0,4$ mm/obr rozpoczyna się po wykonaniu około 80 otworów przy wartości VB_{WO} równej około 1,25 mm. Przy posuwie 0,1 mm/obr wartość ta wynosi około 1 mm. W zakresie obróbki 40-80 otworów wartość zużycia wierzchołka ostrza i zużycia powierzchni przyłożenia tyśinki zmienia się nieznacznie (rys. 9 i 11).



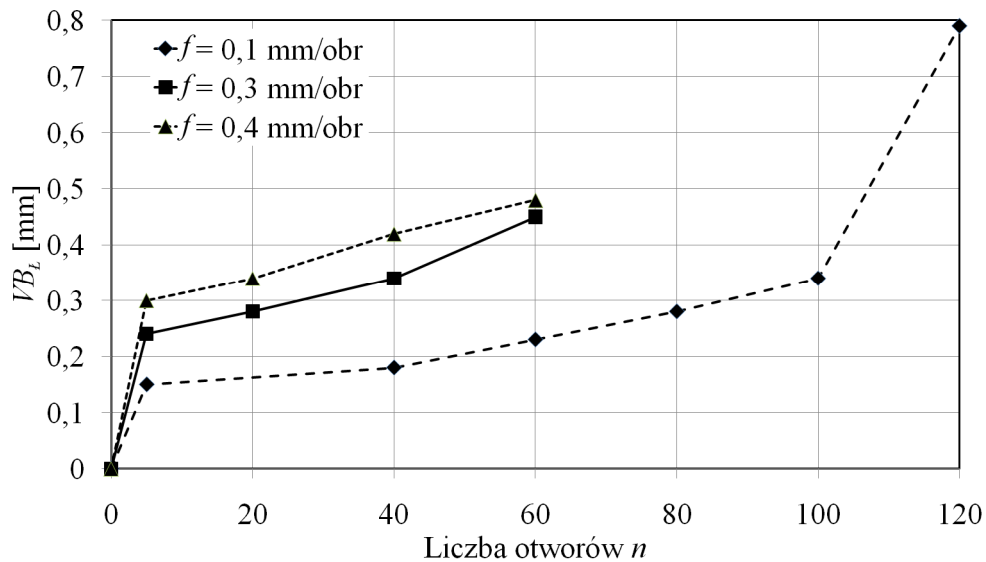
Rys. 9. Dynamika zużycia wierzchołka ostrza VB_W ; $v_c = 20$ m/min.

Fig. 9. Dynamics of the wear of the blade corner VB_W at $v_c = 20$ m/min

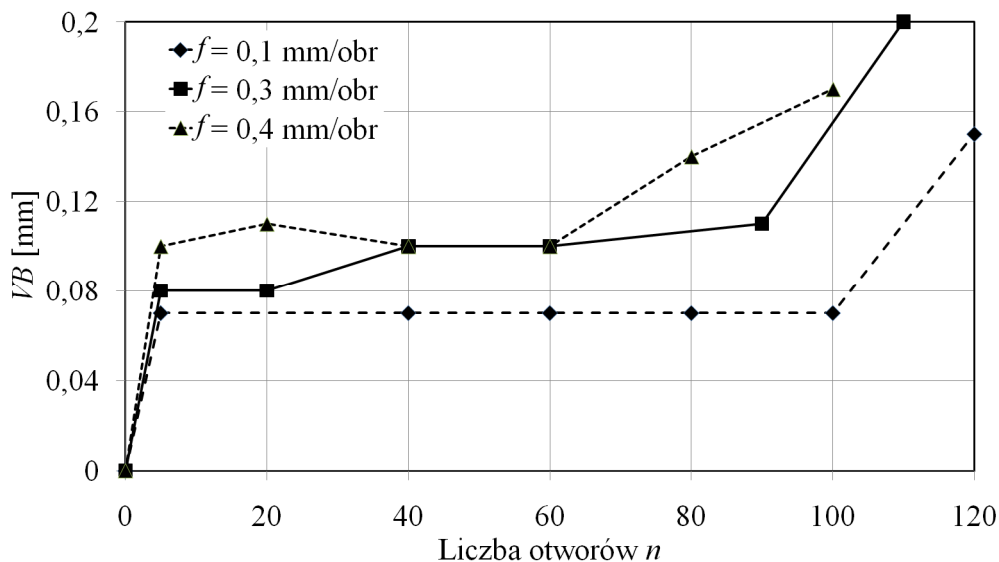


Rys. 10. Dynamika zużycia powierzchni przyłożenia wierzchołka ostrza VB_{WO} ; $v_c = 20$ m/min.

Fig. 10. Dynamics of the wear of the corner flank VB_{WO} at $v_c = 20$ m/min



Rys. 11. Dynamika zużycia powierzchni przyłożenia łysinki VB_L ; $v_c = 20$ m/min.
 Fig. 11. Dynamics of the wear of drill margin flank VB_L at $v_c = 20$ m/min



Rys. 12. Dynamika zużycia powierzchni przyłożenia ostrza wiertła VB ; $v_c = 20$ m/min.
 Fig. 12. Dynamics of the wear of the tool flank VB at $v_c = 20$ m/min

5. Wnioski

Przy katastroficznym zużyciu wiertel obserwuje się intensywny wzrost momentu skrawania, a więc moment skrawania można wykorzystać jako kryterium diagnostyczne dla określenia chwili czasu, w której następuje jego katastroficzne zużycie.

Naniesienie powłoki TiN nie zmienia miejsc, w których następuje zużycie wiertła a tylko zmniejsza jego intensywność na powierzchni przyłożenia, co powoduje wzrost trwałości wiertła.

W przypadku obróbki stali C45 brak jest takiego miejsca zużycia, którego pomiar mógłby być przyjęty jako kryterium zużycia wiertła, aż do utraty jego skrawności (zużycie katastroficzne). W okresie dotarcia wiertel intensywnie zużywa się przejściowa krawędź skrawająca, a zużycie łysinki jest prawie niezauważalne, aż do momentu wystąpienia katastroficznego zużycia wiertła.

Zwiększenie wartości posuwu od wartości $f = 0,1$ mm/obr do $f = 0,4$ mm/obr powoduje około dwukrotne zwiększenie wartości parametrów VB_{WO} , VB_W oraz VB_L , przy których rozpoczyna się okres normalnego zużycia wiertła. W okresie normalnego zużycia w kontrolowanych miejscach ostrza następuje monotoniczny wzrost wartości wszystkich badanych parametrów.

Przy wierceniu otworów w próbkach z żeliwa EN-GJS-500-7 szybkie zwiększenie zużycia wierzchołka ostrza VB_W nie wywołuje istotnego wpływu na zmianę wartości pozostałych parametrów zużycia, których wartość wzrasta monotonicznie. Oznacza to, że utrata skrawności ostrza nie następuje, a szybki rozwój zużycia wierzchołka wiertła nie należy uważać za początek jego przyspieszonego zużycia. Podczas eksploatacji wiertel szybki wzrost zużycia VB_W nie powoduje utraty skrawności ostrza. Następuje zwiększenie intensywności zużycia wierzchołka ostrza, a tym samym następuje przejście zużycia wiertła do drugiej strefy normalnego zużycia.

References

1. Cichosz P. Narzędzia skrawające. Warszawa: WNT, 2006.
2. Baldan A, Cuppini D, D'errico G, Rutelli G. Tool wear monitoring based on cutting power measurement. *Wear* 1990; 139: 303-311.
3. Czechowski K, Profeska-Filip I, Fedaczyński A. PVD coatings on ceramic materials cutting inserted. *Surface Engineering* 2005; 2: 19-24.
4. Dolinšek S. Work-hardening in the drilling of austenitic stainless steels. *Journal of Materials Processing Technology* 2003; 133: 63-70.
5. Gawlik J. Prognozowanie stanu zużycia ostrzy narzędzi w procesie skrawania. Kraków: Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 1988.
6. Gómez M P, Hey A M, Ruzzante J E, D'Attellis C E. Tool wear evaluation in drilling by acoustic emission. *Physics Procedia* 2010; 3: 819-825.
7. Grzesik W, Podstawy skrawania materiałów metalowych. Warszawa: WNT, 1998.
8. Grzesik W, Żak K. Investigations of surface textures produced by oblique machining of different workpiece materials. *Archives of Materials Science and Engineering* 2011; 52:46-53.
9. Huang B W, Kuang J H, Yu P P. Effect of crack on drilling vibration. *Journal of Sound and Vibration* 2009; 322: 1100-1116.
10. Jaworski J. Development tendency of cutting tool materials. *Przegląd Mechaniczny* 2005; 11: 33-36.
11. Jaworski J, Trzepieciński T. Możliwości zapewnienia jakościowego wykonania narzędzi z oszczędnościowej stali szybko tnącej. Rzeszów: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, 2014.

12. Jaworski J, Kluz R, Trzepieciński T. Wpływ parametrów obróbki na miejsce powstawania zużycia i intensywność procesu zużywania wiertel. *Tribologia* 2014; 45: 81-90.
13. Jemielniak K. Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawaniem. Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2002.
14. Jurko J, Berdis A., Gecák J, Nemcova J. Study of changes the tool wear of the cutting tool part of a cast iron GTW 35-04 while drilling. *Applied Mechanics and Materials* 2013; 404: 82-85.
15. Kilickap E. Optimization of cutting parameters on delamination based on Taguchi method while drilling of GFRP composite, *Expert Systems with Applications* 2010; 37: 6116-6122
16. Królczyk G M, Niesłonny P, Legutko S. Determination of tool life and research wear while duplex stainless steel turning. *Archives of Civil and Mechanical Engineering* 2015; 15: 347-354.
17. Królczyk G, Gajek M, Legutko S. Predicting the tool life in the dry machining of duplex stainless steel. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2013; 15: 62-65.
18. Kuczmaszewski J, Pieško P. Wear of milling cutters resulting from high silicon aluminium alloy cast AlSi21CuNi machining. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2014; 16: 37-41.
19. Leppert T, Peng R L. Surface residual stresses in dry turning of 0.45% C steel. *International Centre for Diffraction Data* 2009, 2009: 304-311.
20. Liu H S, Lee B Y, Tarng Y S. In-process prediction of corner wear in drilling operations. *Journal of Materials Processing Technology* 2000; 101: 152-158.
21. Meena A, El Mansori M. Drilling performance of green austempered ductile iron (ADI) grade produced by novel manufacturing technology. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2012; 59: 9-19.
22. Pancielejko M. Analiza mechanizmów zużycia wiertel ze stali HS6-5-2 z powłokami Ti(C, N) wytworzonymi metodą PVD, po badaniach eksploatacyjnych. *Inżynieria Materiałowa* 2010; 31: 1147-1152.
23. Przestacki D, Jankowiak M. Surface roughness analysis after laser assisted machining of hard to cut materials. *Journal of Physics: Conference Series* 2014; 483: 012019.
24. Semotiuk L. An analysis of the operational characteristics of innovative tool structures used in high speed rough milling processes. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2009; 11: 46-53.
25. Sinopalnikov W A, Grigoriev S N. Reliability and diagnosis of technological systems. Moscow: MGU Stankin, 2003.

26. Twardowski P, Legutko S, Krolczyk G M, Hloch S. Investigation of wear and tool life of coated carbide and cubic boron nitride cutting tools in high speed milling. *Advances in Mechanical Engineering* 2015; 7: 1-9.
27. Wartacz A, Świć A, Zubrzycki J. Zużycie ostrza narzędzia, a zmiana parametrów toczenia w kolejnych zabiegach. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2004; 4: 58-61.
28. Wieczorowski K, Matuszak A. Wpływ zużycia wiertła na dokładność wiercenia głębokich otworów. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatykacji* 1997; 17: 67-71.
29. Yan J, Murakami Y, Davim J P. Tool design, tool wear and tool life, [in:] K. Cheng (ed.), *Machining dynamics. Fundamentals, applications and practices*. London: Springer-Verlag, 2009, pp. 117-149.
30. Zabel A, Heilmann M. Deep hole drilling using tools with small diameters process analysis and process design, *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 2012; 61: 111-114.
31. Zheng X, Zhang H, Xue K, Chen M, Zhang Y, Optimization of twist drill's geometry for cast iron. *Key Engineering Materials* 2010; 431-432: 555-558.
32. Zoriktuev V T, Nikitin Y A, Sidorov A S. Monitoring and prediction of cutting-tool wear. *Russian Engineering Research* 2008; 28: 88-91.