

Prof. dr inż. hab. Wit GRZESIK,
dr inż. Krzysztof ŻAK (Politechnika Opolska):

BADANIE WPLYWU ZUŻYCIA OSTRZA NA ENERGIĘ WŁAŚCIWĄ W DOKŁADNYM TOCZENIU STALI 16MnCrS5 (AISI 5115)

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki pomiarów składowych sił skrawania i odpowiadających im wartości energii właściwej podczas toczenia stali 16MnCrS5 utwardzonej do 850 HV_{0,05} z użyciem ostrza z CBN. Przeanalizowano zmiany energii właściwej skrawania oraz energii „pasożytnej” w funkcji posuwu, głębokości skrawania i promienia zaokrąglenia naroża, a także zmiany objętościowe wydajności skrawania Q_v .

Słowa kluczowe: stal utwardzona, energia skrawania, wydajność Skrawania

A STUDY OF THE IMPACT OF BLADE WEAR ON SPECIFIC ENERGY IN PRECISE TURNING OF 16MnCrS5 STEEL (AISI 5115)

Abstract

The article presents the results of measurements of cutting force components and their correspondent specific energy values during turning of 16MnCrS5 steel hardened to 850 HV_{0,05} using a CBN insert. The changes of specific cutting energy and “parasitic” energy as a function of feed, cutting depth and corner curve radius, as well as volume changes in cutting efficiency Q_v , have been analyzed.

Keywords: hardened steel, cutting energy, cutting efficiency

BADANIE WPŁYWU ZUŻYCIA OSTRZA NA ENERGIĘ WŁAŚCIWĄ W DOKŁADNYM TOCZENIU STALI 16MnCrS5 (AISI 5115)

Wit GRZESIK¹, Krzysztof ŻAK¹

1. WPROWADZENIE

Skrawanie na twardo należy do nowoczesnych, wciąż niekonwencjonalnych technik skrawania różnych części maszyn, takich jak: wałki, koła zębate, elementy łożysk czy urządzeń hydraulicznych, wykonywanych z utwardzonych stali, które zastępują lub wspomaga operacje szlifowania [1,2]. Zasadniczo, naukowe i inżynierskie problemy obróbki na twardo dotyczą takich zagadnień jak mechanika procesu, zużycie ostrza, stan warstwy wierzchniej i dokładność wymiarowa [3,4,5]. Bilans energetyczny tego procesu nie jest zbadany dostatecznie, chociaż oddziaływanie ostrza na twardego materiału jest bardzo specyficzne. W dodatku, zużycie ostrza wpływa na zwiększenie tarcia o powierzchnię obrobioną co utrudnia wejście ostrza w materiał i oddzielanie się wióra [6]. Wiadomo jest, że w skrawaniu na twardo siła odporowa jest większa w porównaniu z obróbką konwencjonalną, gdy $F_p = (0,3-0,5) F_c$ [6,7]. Fakt ten przesądza o tym, że siła odporowa nie może być pomijana w opisie mechaniki i dynamiki procesu oraz technologicznego systemu obróbki. Większe wartości stosunku sił F_p i F_c występują gdy stosowane parametry skrawania wpływają na zmniejszenie średniej grubości warstwy skrawanej [7,8]. Zasada ta powinna także dotyczyć zużycia ostrza, szczególnie z dużym promieniem naroża $r_e = 800$ i $1200 \mu\text{m}$ [9]. W dodatku ostrza z CBN wykonane z dużym kątem pochylenia ścina pracują ze zwiększoną siłą odporową i intensywniejszym plastycznym oddziaływaniem na powierzchnię obrobioną, co przekłada się na wzrost tarcia i zużycia oraz zmniejszenie trwałości ostrza. Udowodniono [10], że promień naroża zmienia geometrię warstwy skrawanej i wpływa na wzrost sił pasożytniczych w toczeniu na twardo. W artykule

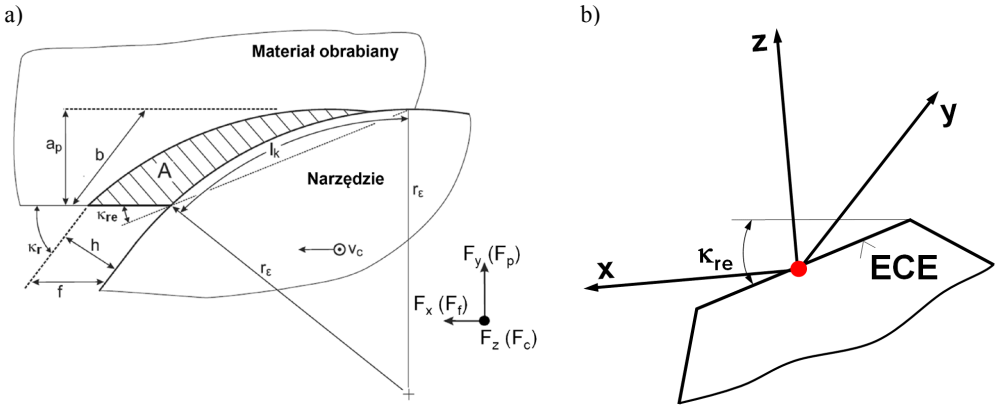
¹ Politechnika Opolska, Katedra Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji, 45-271 Opole, ul. Mikołajczyka 5

zużycie energii w toczeniu na twardo stali 16MnCrS5 (AISI 5115) w czasie zużycia ostrza z CBN oparto na wynikach pomiarów składowych sił skrawania F_c , F_f i F_p przeprowadzonych dla zmiennego posuwu, głębokości skrawania i promienia naroża [9]. Otrzymane serie wyników energii właściwej skrawania wykorzystano do opracowania map wyjaśniających jej zależność od grubości warstwy skrawanej podobnie jak w [6,11] dla obróbki konwencjonalnej.

2. MECHANIKA PROCESU

2.1. GEOMETRIA WARSTWY SKRAWANEJ

W dokładnym toczeniu na twardo głębokość skrawania (a_p) jest zasadniczo mniejsza od promienia naroża (r_ϵ), a przekrój warstwy skrawanej ma kształt przecinka, jak przedstawiono na rys. 1a. W rezultacie, stosunek wymiarów b/h jest większy od 1. Pole przekroju warstwy skrawanej jest w takim przypadku charakteryzowane za pomocą czynnej długości styku l_k i średniej grubości warstwy skrawanej h_m (wzory 1.2 i 1.3). Jeśli kołowy zarys naroża zastąpi się ekwiwalentną linią prostą (ECE na rys. 1b) to można wyznaczyć zastępczy kąt przystawienia κ_{re} (wzór 1.1).



Rys.1. Charakterystyka przekroju warstwy skrawanej (a) i zastępczej krawędzi skrawającej- (ECE - equivalent cutting edge) (b)

Wymienione wcześniej wielkości geometryczne (zastępczy kąt przystawienia κ_{re} , długość styku l_k , średnia grubość warstwy skrawanej h_m , pole przekroju warstwy skrawanej A_{nc}) są wyznaczone kolejno z następujących zależności:

$$\kappa_{re} = \frac{1}{2} \arccos \left(\frac{r_\epsilon - a_p}{r_\epsilon} \right) \quad (1.1)$$

$$l_k = 2\kappa_{re} r_e \varepsilon \quad (1.2)$$

$$h_m = a_p f / l_k \quad (1.3)$$

$$A_{nc} = l_k h_m \quad (1.4)$$

2.2. SKŁADOWE CAŁKOWITEJ SIŁY SKRAWANIA I ENERGII WŁAŚCIWEJ

Pomiary składowych sił skrawania przeprowadzono w układzie współrzędnych xyz pokazanym na rys. 1a. Energię właściwą skrawania e_c i ślizgowego oddziaływania krawędzi skrawającej bez oddzielenia wióra (w uproszczeniu tarcia ślizgowego) e_p wyznaczono z wzorów 2.1 i 2.2 zakładając, że długość zastępczej krawędzi skrawającej równa jest l_k , a pole przekroju warstwy skrawanej A_{nc} definiuje wzór 1.4.

$$e_c = F_c / A_{nc} \quad (2.1)$$

$$e_p = F_p / A_{nc} \quad (2.2)$$

3. WARUNKI BADAŃ

Badania doświadczalne wykorzystane do analizy energetycznej procesu przeprowadzono dla toczenia wzdłużnego stali 16MnCrS5 (AISI 5115) zahartowanej do 850-880 HV0.05 na tokarce CNC CTX 520 linear firmy Gildemeister [9]. Stosowano noże z CBN gatunku WBN 560 o symbolu CNGA 120412 firmy CeramTec, z 56% zawartością CBN i średnią wielkością ziarna 3 μm . Roboczy kąt natarcia $\gamma_{ne} = -30^\circ$, kąt pochylenia ścina $\gamma_{ie} = -24^\circ$, kąt przyłożenia $\alpha_n = 6^\circ$, a kąt pochylenia krawędzi skrawającej $\lambda_s = -6^\circ$. Próby toczenia prowadzono ze stałą prędkością skrawania 150 m/min, zmiennym posuwem $f = 10, 100$ i $200 \mu\text{m}$, zmienną głębokością skrawania $a_p = 10, 100$ i $200 \mu\text{m}$ oraz zmiennym promieniem zaokrąglenia naroża $r_e = 100, 400, 800$ i $1200 \mu\text{m}$.

W rezultacie dla dziewięciu zbiorów parametrów zmiennych uzyskano zmianę kąta przystawienia $\kappa_{re} = 5 \div 45^\circ$ (wzór 1.1) i średniej grubości warstwy skrawanej $h_m = 2,5 \div 63,7 \mu\text{m}$ (wzór 1.3), co wykorzystano do oceny energochłonności procesu i porównania ze skutkami szlifowania. Wszystkie wyniki zestawiono w tabl. 1.

Badane ostrze podczas prób nie przekroczyło obszaru dopuszczalnego zużycia, maksymalny pasmo zużycia naroża VB_C dla wszystkich prób wyniósł około 0,25 mm.

Składowe siły skrawania mierzono w sposób ciągły za pomocą trójskładowego siłomierza piezoelektrycznego Kistler – model 9121. Mierzone sygnały były przetwarzane z częstotliwością próbkowania $f=1$ kHz i filtrowane filtrem dolnoprzepustowym z częstotliwością cut-off $f_c=300$ Hz [9].

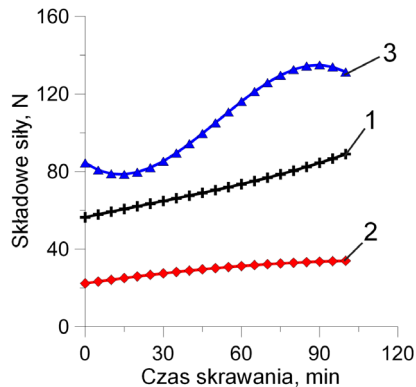
Tabela 1. Zestawienie wartości kąta κ_{re} i średniej grubości warstwy skrawanej h_m

Promień naroża r_e , μm	Posuw f , μm	Głębokość skrawania a_p , μm	Prędkość skrawania v_c , m/min	Zastępczy kąt przystawienia κ_{re} , deg	Średnia grubość warstwy skrawanej h_m , μm
100	100	100	150	45	63,7
400				21	34,6
800				14	24,7
1200				12	20,3
800	100	10	150	5	7,9
		100		14	24,7
		200		21	34,6
800	10	100	150	14	2,5
	100				24,7
	200				49,5

4. WYNIKI BADAŃ I DYSKUSJA

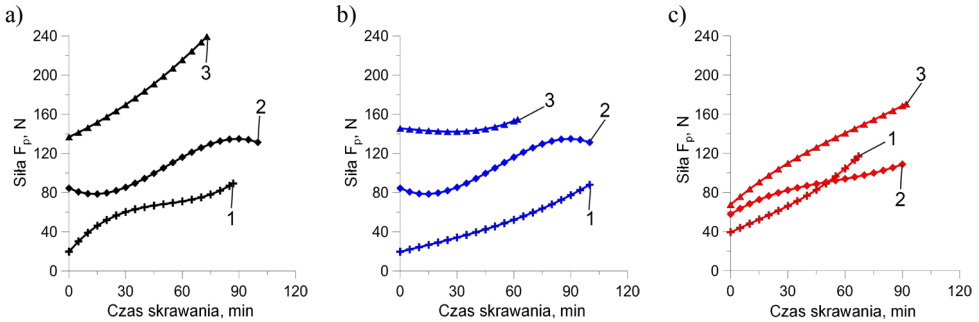
4.1. ZMIANY SIŁ SKŁADOWYCH W CZASIE ZUŻYWANIA SIĘ OSTRZA

Rys. 2 przedstawia przykład zmiany wartości sił składowych spowodowane zużyciem się ostrza dla centralnych wartości parametrów zmiennych - posuwu $f=100 \mu\text{m}$, głębokości skrawania $a_p=100 \mu\text{m}$ i promienia naroża $r_e=800 \mu\text{m}$. Można zauważyć, że nie tylko wartość siły odporowej F_p , ale jej przyrost w czasie próby zużycia są największe. W analizowanym przypadku siła F_p wzrasta od 80 N na początku próby do 130 N, gdy zużycie osiągnęło wartość kryterialną. Na rys. 2 widać również większy przyrost w czasie siły skrawania F_c niż posuwowej F_f .



Rys. 2. Zmiany składowych sił skrawania w czasie próby zużycia ostrza. Parametry skrawania: $f=100 \mu\text{m}$, $a_p=100 \mu\text{m}$, $r_e=800 \mu\text{m}$. 1- F_c ; 2- F_f ; 3- F_p

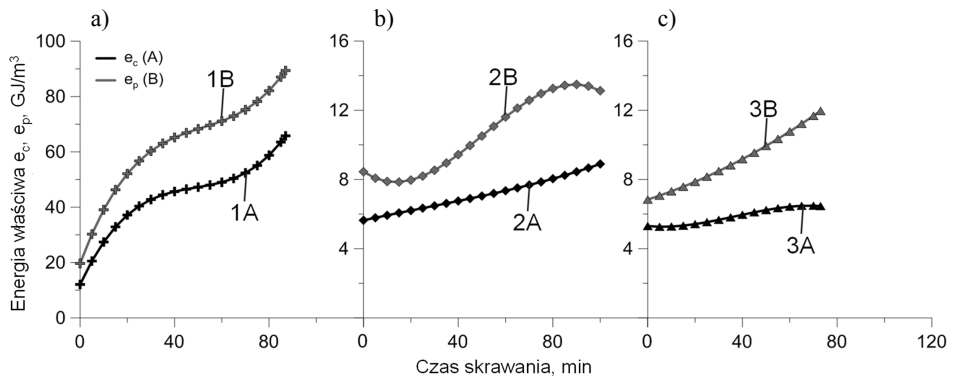
Jeśli prześledzi się zmiany sił składowych dla różnych skojarzeń parametrów zmiennych (rys. 3) to można stwierdzić, że największe przyrosty siły odporowej F_p mają miejsce dla największego posuwu $200 \mu\text{m}$ (#3 na rys. 3a), najmniejszej głębokości skrawania $10 \mu\text{m}$ (#1 na rys. 3b) i największego promienia naroża $1200 \mu\text{m}$ (#3 na rys. 3c). Z kolei największe przyrosty pozostałych sił składowych F_c i F_f zaobserwowano dla najmniejszego promienia naroża $100 \mu\text{m}$ [9].



Rys. 3. Zmiany siły odporowej F_p dla: (a) zmiennego posuwu: 1-10 μm , 2-100 μm , 3-200 μm ; (b) zmiennej głębokości skrawania: 1-10 μm , 2-100 μm , 3-200 μm ; (c) zmiennego promienia naroża: 1-100 μm , 2-400 μm , 3-1200 μm

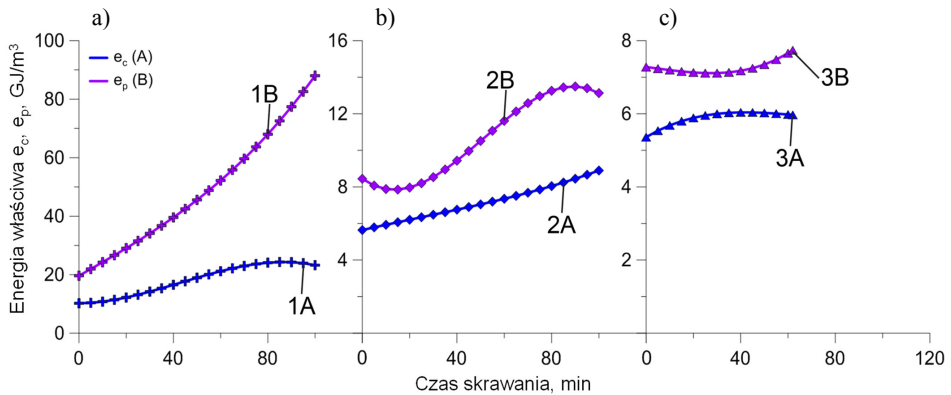
4.2. ZMIANY ENERGII WŁAŚCIWEJ WYWOŁANE ZUŻYCIEM OSTRZA

W przeprowadzonych badaniach dokonano oceny zużycia ostrza z CBN w kontekście wymagań energetycznych na podstawie wartości energii właściwej skrawania (e_c) i tarcia ślizgowego (e_p).

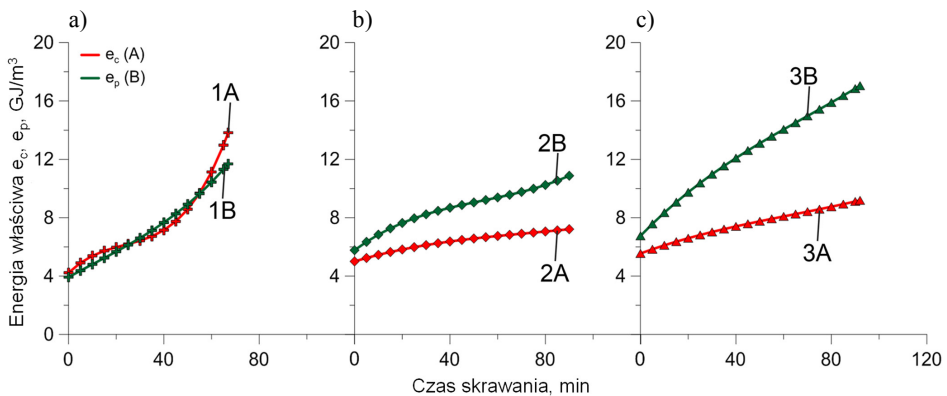


Rys. 4. Wpływ parametrów skrawania na wartości energii właściwych e_c i e_p dla zmiennego posuwu. 1-10 μm , 2-100 μm , 3-200 μm . Parametry stałe: $a_p=100 \mu\text{m}$, $r_e=800 \mu\text{m}$

Energia właściwa skrawania określa wydatek energii wymagany do usunięcia jednostki objętości materiału w zależności od wartości siły skrawania F_c , natomiast energia właściwa tarcia ślizgowego krawędzi skrawającej definiuje stratę energii w związku z działaniem siły odporowej F_p . Rys. 4÷6 przedstawiają różnice w bilansie energetycznym w czasie zużywania się ostrza odpowiednio dla zmiennego posuwu, zmiennej głębokości skrawania i zmiennego promienia naroża płytki skrawającej z CBN. Można zauważyć na rys. 4a i 5a, że największe straty energii $e_p \approx 90 \text{ GJ/m}^3$ występują na końcu próby zużycia dla najmniejszego posuwu $f=10 \text{ }\mu\text{m}$ i najmniejszej głębokości skrawania $a_p=10 \text{ }\mu\text{m}$. Są to przypadki skrawania z bardzo małą grubością warstwy skrawanej, odpowiednio $2,5 \text{ }\mu\text{m}$ i $7,9 \text{ }\mu\text{m}$.



Rys. 5. Wpływ parametrów skrawania na wartości energii właściwych e_c i e_p dla zmiennej głębokości skrawania. 1-10 μm , 2-100 μm , 3-200 μm . Parametry stałe: $f=100 \text{ }\mu\text{m}$, $r_e=800 \text{ }\mu\text{m}$



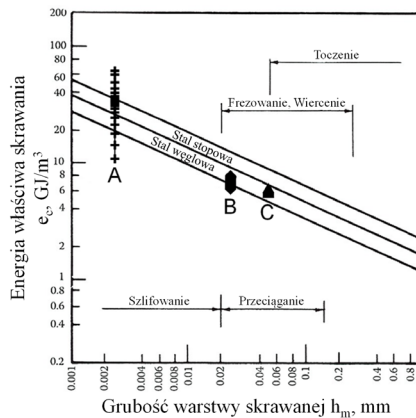
Rys. 6. Wpływ parametrów skrawania na wartości energii właściwych e_c i e_p dla zmiennego promienia zaokrąglenia naroża. 1-100 μm , 2-400 μm , 3-1200 μm . Parametry stałe: $f=100 \text{ }\mu\text{m}$, $a_p=100 \text{ }\mu\text{m}$

Z przytoczonych przykładów wynika jednoznacznie, że zużycie ostrza zmienia bilans energetyczny procesu skrawania utwardzonej stali, ale w zależności od warunków technologicznych i geometrii warstwy skrawanej. Wcześniejsze badania wykazały, że pojawiają się punkty ekstremalne dla tego samego zużycia VB_C i przypadków największego przyrostu siły F_p , na przykład dla głębokości skrawania $100\ \mu\text{m}$.

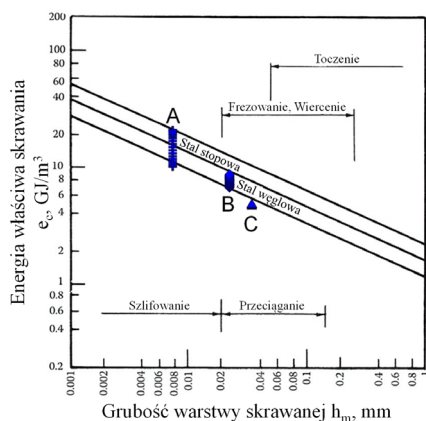
Podstawowa obserwacja dotycząca skrawania utwardzonej stali ostrzem z CBN świadczy o przewadze wydatku energii traconej na tarcie ślizgowe krawędzi skrawającej/ odkształcenia sprężysto-plastyczne. Wskaźnik e_c/e_p jest mniejszy od 1, a w większości badanych przypadków jest w zakresie $0,5\div 0,8$. Zwracają uwagę dwa przypadki skrajne – pierwszy, gdy $e_c/e_p \approx 1$ dla najmniejszego promienia zaokrąglenia naroża $100\ \mu\text{m}$ (rys. 6a) i drugi, gdy $e_c/e_p \approx 0,26$ dla najmniejszej grubości warstwy skrawanej $10\ \mu\text{m}$ (rys. 5a). W tym drugim przypadku straty energii na tarcie przewyższają czterokrotnie energię zużywaną na skrawanie ($88\ \text{GJ/m}^3$ vs. $23,3\ \text{GJ/m}^3$). Należy dodać, że dla najmniejszego promienia zaokrąglenia naroża $100\ \mu\text{m}$ występuje największa grubość warstwy skrawanej $h_m = 63,7\ \mu\text{m}$, a dla grubości warstwy skrawanej $10\ \mu\text{m}$ - $h_m = 7,9\ \mu\text{m}$.

4.3. PORÓWNANIE ENERGII WŁAŚCIWEJ SKRAWANIA DLA OBRÓBKI NA TWARDO I KONWENCJONALNEJ

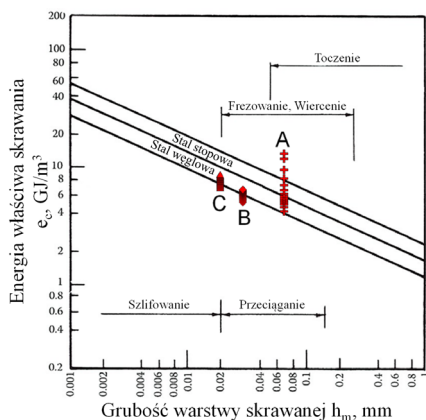
Rys. 7÷9 przedstawiają trzy mapy, które porównują wartości energii właściwej skrawania dla toczenia na twardo ostrzem z CBN z jednej strony oraz różnych operacji obróbki wiórowej i szlifowania.



Rys. 7. Wpływ grubości warstwy skrawanej na energię właściwą skrawania dla zmiennego posuwu: A-10 μm , B-100 μm , C-200 μm



Rys. 8. Wpływ grubości warstwy skrawanej na energię właściwą skrawania dla zmiennej głębokości skrawania: A-10 μm , B-100 μm , C-200 μm



Rys. 9. Wpływ grubości warstwy skrawanej na energię właściwą skrawania dla zmiennego promienia naroża: A-100 μm , B-400 μm , C-1200 μm

Jak wspomniano w rozdz. 4.2 z powodu bardzo małej grubości warstwy skrawanej rzędu kilku mikrometrów wartości energii właściwej skrawania w skrawaniu na twardo z najmniejszym posuwem $f=10 \mu\text{m}$ (rys. 4) i najmniejszą głębokością skrawania $a_p=10 \mu\text{m}$ (rys. 5) są charakterystyczne dla szlifowania stali stopowych, co dokumentują rys. 7 i 8. W tym przypadku wykorzystano diagramy e_c - h zamieszczone w [6] i [11]. Należy przypomnieć, że w takich warunkach ostrze z CBN skrawa z bardzo małą grubością warstwy skrawanej, odpowiednio 2,5 μm i 7,9 μm . Podobny efekt, ale nie tak wyraźny, można dostrzec na rys. 9 (przypadek C), gdy naroże ostrza ma największy promień $r_e=1200 \mu\text{m}$ (wtedy $h_m \approx 20 \mu\text{m}$).

5. WNIOSKI

- W skrawaniu na twardo ostrzem z CBN energia właściwa rozpraszana w wyniku tarcia krawędzi skrawającej o materiał jest zasadniczo większa od energii właściwej skrawania. W badaniach wytypowano tylko jeden przypadek gdy $e_c/e_p \approx 1$, który dotyczy pracy ostrza z bardzo małym promieniem zaokrąglenia naroża $r_\epsilon = 100 \mu\text{m}$.
- Energia właściwa skrawania wyznaczona dla toczenia z bardzo małym posuwem i bardzo małą głębokością skrawania jest porównywalna ze szlifowaniem, gdy średnia grubość warstwy skrawanej jest około $2 \mu\text{m}$.
- Energia właściwa skrawania dla toczenia z większym posuwem i głębokością skrawania odpowiada przeciąganiu lub frezowaniu stali stopowych, gdy $h_m > 20 \mu\text{m}$.
- Relacje pomiędzy wartościami energii właściwych (e_c/e_p) można wykorzystać do doboru warunków obróbki z uwzględnieniem kryterium energetycznego.
- Względę energetyczne sugerują, aby w skrawaniu utwardzonych stali unikać doboru bardzo małych posuwów i głębokości skrawania i nie stosować ostrzy z dużym promieniem naroża.

LITERATURA

- [1] DAVIM J.P., *Machining of Hard Materials*, London, Springer, 2011.
- [2] BYRNE G., DORNFELD D., DENKENA D., Advancing cutting technology, *Annals of the CIRP*, 52/2, 2003, 483-507.
- [3] TÖNSHOFF H.K., ARENDT C., BEN AMOR R., Cutting of hardened steel, *Annals of the CIRP*, 49/2, 2000, 547-566.
- [4] DAVIES M.A., CHOU Y., EVANS C.J., On chip morphology, tool wear and cutting mechanics, *Annals of the CIRP* 45/1, 1996, 77-82.
- [5] CHINCHANIKAR S., CHOUDHURY S.K., *Machining of hardened steel-Experimental investigations, performance modelling and cooling techniques: A review*, *International Journal of Machine Tool and Manufacture*, 89, 2015, 95-109.
- [6] GRZESIK W., *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*, Warszawa, WNT, 2010.
- [7] KAWALEC M., *Skrawanie hartowanych stali i żeliwa narzędziami o określonej geometrii ostrza*, *Rozprawy nr 234*, Politechnika Poznańska, Poznań, 1990.
- [8] MIKO E., *Konstituowanie mikronierówności powierzchni metalowych obrobionych narzędziami o zdefiniowanej stereometrii ostrzy*, *Monografie, Studia, Rozprawy*, 46, Kielce, Politechnika Świętokrzyska, 2004.
- [9] MAYER R., KÖHLER J., DENKENA B., *Influence of the tool corner radius on the tool wear and process forces during hard turning*, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 58, 2012, 933-940.
- [10] CHOU Y.K., SONG H., *Tool nose radius effect on finish hard turning*, *Journal of Materials Processing Technology*, 148, 2014, 259-268.
- [11] BOOTHROYD G., KNIGHT W.A., *Fundamentals of Machining and Machine Tools*, New York, Taylor & Francis, 2005.