

Zwiększanie produktywności obróbki skrawaniem

Increasing the productivity of machining

KAZIMIERZ CZECHOWSKI*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2019.7.45>

Prezentowano wybrane zagadnienia związane ze zwiększaniem produktywności obróbki skrawaniem. Podano przykłady wydłużania trwałości narzędzi poprzez osadzanie na ostrzach nanostrukturalnych powłok PVD. Omówiono podnoszenie produktywności poprzez dobór parametrów skrawania na podstawie badań obrabialności materiałów i możliwości Instytutu Zaawansowanych Technologii Wytwarzania w tym zakresie. Zaprezentowano niektóre aspekty oceny skrawalności materiałów i skrawności ostrzy narzędzi oraz wpływu cieczy obróbkowych na te właściwości.

SŁOWA KLUCZOWE: produktywność, narzędzia, trwałość narzędzia, powłoki, skrawalność materiałów, skrawność ostrzy narzędzi

Selected issues related to increasing the productivity of machining were presented. Examples of increasing the tool life by depositing nanostructured PVD coatings on blades are presented. The increase of productivity through selection of machining parameters based on material machinability tests was discussed. The possibilities of The Institute of Advanced Manufacturing Technology in this regards are presented. Some aspects of materials machinability evaluation and cutting abilities of tool edges, as well as effects of metal cutting fluids on these properties are discussed.

KEYWORDS: productivity, tools, tool life, coatings, materials machinability, cutting abilities of tool edges

Jednym z kryteriów oceny funkcjonowania systemów produkcyjnych, umożliwiającym porównanie poziomu technologicznego wytwarzania globalnie lub częściowo, jest wskaźnik produktywności (produktywność), stanowiący iloraz wielkości wyjściowej z systemu (efektów) i wielkości wejściowej do systemu (nakładów). Wielkości wejściowe i wyjściowe mogą być mierzone i wyrażane w różnych jednostkach, np. godzinach, sztukach, tonach, kwotach pieniężnych oraz za pomocą bardziej złożonych mierników naturalnych lub umownych. Wskaźnik produktywności określany jest często jako iloraz całkowitego efektu ekonomicznego produkcji (przychodów netto) i czasu pracy zużytego na produkcję przez wszystkie grupy zatrudnionych w firmie (także nieprodukcyjne).

Produktywność procesu technologicznego obróbki skrawaniem zależy od kombinacji wielu czynników, powodujących m.in. podnoszenie wydajności i jakości procesu wytwarzania oraz trwałości i niezawodności narzędzi i obrabiarek, jak również wpływających na zmniejszenie energochłonności procesu, ilości zużywanych płynów i odpadów, liczby wymian narzędzi oraz czasochłonności projektowania technologii obróbki i czynności pomocniczych [1].

Zwiększenie produktywności obróbki skrawaniem można osiągnąć m.in. poprzez:

- stosowanie narzędzi produktywnych, czyli dających dobre wyniki i charakteryzujących się właściwościami zwiększającymi ich użyteczność, a zatem dużą trwałością ostrzy, możliwością stosowania w obróbce wysokowydajnej oraz pozwalających na uzyskanie wysokiej jakości powierzchni obrobionej,
- dobór warunków obróbki i parametrów skrawania, m.in. na podstawie wyników badań skrawalności materiałów i skrawności ostrzy narzędzi oraz wpływu cieczy obróbkowych na te właściwości (w przypadkach gdy stosowanie tych cieczy jest niezbędne),
- wykorzystywanie nowoczesnych, precyzyjnych obrabiarek sterowanych numerycznie, o dużej sztywności i wysokiej wydajności, posiadających układy sterowania procesem technologicznym i jego kontroli o bardzo dużym stopniu zautomatyzowania,
- stosowanie systemów komputerowego wspomaganie projektowania technologii, w coraz większym stopniu dostosowanych do układów sterowania obrabiarek, a nie rzadko z nimi zintegrowanych.

Zwiększanie produktywności obróbki skrawaniem poprzez nanoszenie wielowarstwowych powłok nanostrukturalnych

W ostatnich kilkudziesięciu latach nastąpił intensywny rozwój narzędzi skrawających, w tym przeznaczonych do obróbki z wysokimi prędkościami skrawania (HSC, HSM) i wysoką wydajnością (HPC), także do obróbki „na twardo” (pozwalającej na przeprowadzanie obróbki cieplnej przed obróbką wiórową kształtującą oraz stanowiącej alternatywę dla szlifowania) i do korzystnej ze względów ekologicznych obróbki na sucho lub z minimalną ilością cieczy obróbkowej (MQL).

Wiele firm narzędziowych wprowadziło narzędzia charakteryzujące się innowacyjnymi rozwiązaniami w zakresie materiałów narzędziowych, stereometrii i mikrogeometrii ostrzy skrawających, sposobów mocowania wymiennych płytek wieloostrzowych itd. Nastąpił także intensywny rozwój materiałów narzędziowych (zwłaszcza spiekanych), w tym różnego rodzaju powłok (głównie przeciwzużyciowych) przeznaczonych do konkretnych zastosowań produkcyjnych [2–4]. To stworzyło szerokie możliwości w aspekcie zwiększania produktywności obróbki skrawaniem.

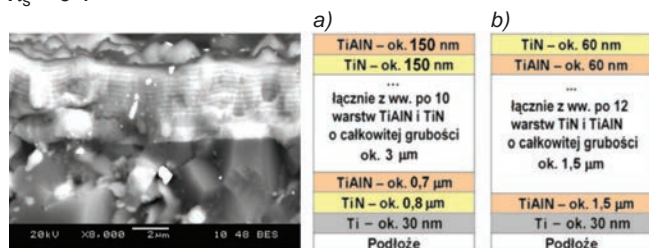
Zagadnienia nanoszenia na ostrza narzędzi skrawających wielowarstwowych powłok nanostrukturalnych,

* Dr inż. Kazimierz Czechowski, kazimierz.czechowski@ios.krakow.pl, <https://orcid.org/0000-0001-6554-5108> – Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Zaawansowanych Technologii Wytwarzania

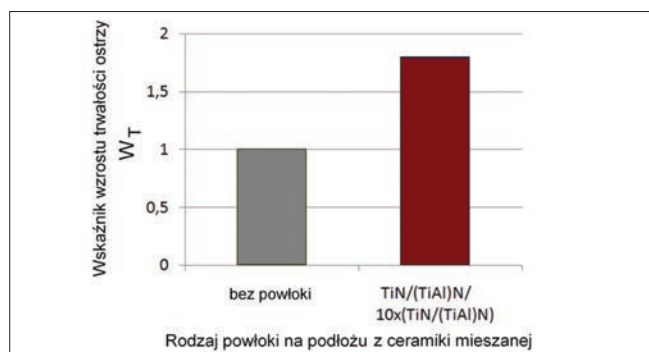
w tym nadstrukturalnych, przedstawiono w artykułach [5] i [6]. Właściwości ostrzy narzędzi można znacznie poprawić, jeśli zastosuje się powłoki przeciwzużyciowe o odpowiedniej wielowarstwowej strukturze w skali mikro i nano, co daje bardzo istotną możliwość zwiększenia produktywności obróbki skrawaniem.

Dla przykładu, opracowane w IZTW nanostrukturalne powłoki wielowarstwowe, składające się z azotków TiN i TiAlN (rys. 1a), naniesione na ostrza z ceramiki mieszanej $Al_2O_3 +$ do 30% TiC, umożliwiły ok. 1,8-krotny wzrost trwałości tych ostrzy w obróbce toczeniem stali z gatunku 100Cr6 o twardości 50 ± 2 HRC (rys. 2). Stosowano następujące parametry obróbki: prędkość skrawania $v_c = 150$ m/min, posuw $f = 0,1$ mm/obr, głębokość skrawania $a_p = 0,5$ mm. Płytkę skrawającą SNGN 120408 T02020 była mocowana z zapewnieniem kąta natarcia $\gamma_0 = -6^\circ$ i kąta przyłożenia $\alpha_0 = 6^\circ$.

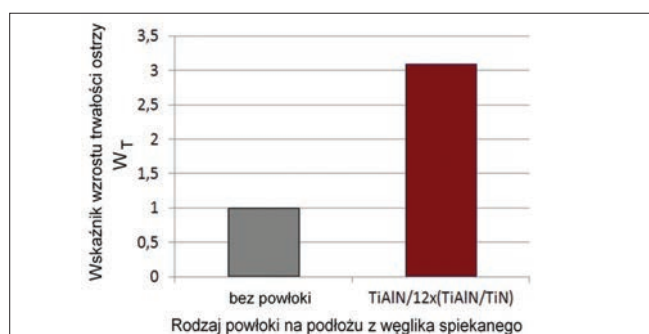
Z kolei powłoki z azotków TiAlN i TiN (rys. 1b), naniesione na ostrza z węglika spiekane go z gatunku SM25T, umożliwiły ok. 3,1-krotny wzrost trwałości tych ostrzy w obróbce toczeniem stali z gatunku 100Cr6 o twardości 50 ± 2 HRC (rys. 3). Zastosowano następujące parametry obróbki: prędkość skrawania $v_c = 120$ m/min, posuw $f = 0,07$ mm/obr, głębokość skrawania $a_p = 0,5$ mm. Płytkę skrawającą SPUN 120308 była mocowana z kątem natarcia $\gamma_0 = 5^\circ$ i kątem pochylenia krawędzi skrawającej $\lambda_s = 0^\circ$.



Rys. 1. Architektura wielowarstwowych powłok nanostrukturalnych naniesionych metodą PVD wraz z obrazem przelotnym powłoki TiN/TiAlN/10x(TiN/TiAlN) – obraz z mikroskopu elektronowego skaninowego



Rys. 2. Przykład wzrostu trwałości ostrzy po naniesieniu powłoki na podłoże z ceramiki mieszanej przy toczeniu stali z gatunku 100Cr6



Rys. 3. Przykład wzrostu trwałości ostrzy po naniesieniu powłoki na podłoże z węglika spiekane go przy toczeniu stali z gatunku 100Cr6

Zwiększanie produktywności obróbki skrawaniem poprzez dobór parametrów skrawania na podstawie wyników badań obrabialności

Istotny wzrost produktywności obróbki skrawaniem można uzyskać poprzez odpowiedni dobór warunków obróbki i parametrów skrawania. Produktywne kształtowanie wysokiej jakości wyrobów, zwłaszcza w produkcji seryjnej i masowej, wymaga uwzględnienia podczas opracowywania procesu technologicznego zarówno skrawalności materiału obrabianego (mogącej się istotnie różnić nawet w zakresie jednego gatunku materiału w zależności od dostawy), jak i skrawności ostrzy narzędzi.

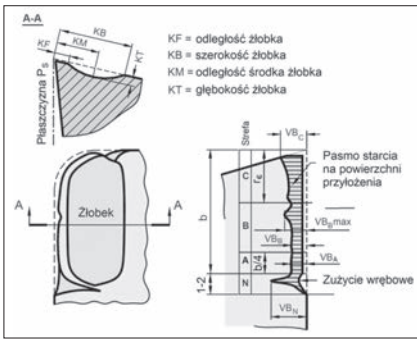
Skrawalność materiału obrabianego to stopień jego podatności na obróbkę wiórową i uzyskiwanie pozytywnych właściwości powierzchni obrobionej. Skrawność ostrzy narzędzia to zdolność do zdejmowania za ich pomocą nadmiaru na skrawanie i nadawania korzystnych właściwości obrobionej powierzchni [7]. Skrawalność materiału obrabianego i skrawność ostrzy narzędzi są ze sobą związane i uwarunkowane przez wiele czynników występujących podczas kształtowania wyrobu za pomocą obróbki skrawaniem oraz podczas poprzedzającego ją przygotowania półfabrykatu. Na te czynniki mogą mieć wpływ:

- narzędzie (m.in. rodzaj i gatunek materiału ostrza, w tym rodzaj powłoki, kształt i wymiary ostrza oraz jego mikrogeometria, sposób połączenia ostrza z korpusem narzędzia),
- warunki skrawania (np. rodzaj obróbki, wymiary i kształt warstwy skrawanej, prędkość ruchów skrawania, sposób i intensywność dostarczania cieczy obróbkowej lub jej brak),
- skład chemiczny materiału, jego struktura i właściwości fizyczne, w tym wynikające z obróbki cieplnej i cieplno-chemicznej [8].

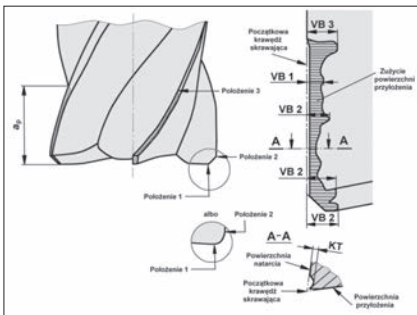
Najdokładniejszymi i powszechnie stosowanymi sposobami określania skrawalności materiałów i skrawności ostrzy narzędzi są badania trwałości ostrzy podczas toczenia, frezowania i wiercenia. Okres trwałości ostrza narzędzia może zostać określony m.in. poprzez: utratę właściwości skrawnych narzędzia, uzyskiwanie zbyt dużej chropowatości powierzchni obrobionej, utratę wymaganej dokładności obróbki, nadmierny wzrost sił skrawania oraz związane z tym ugięcia przedmiotu obrabianego i drgania w układzie obróbkowym. Przy właściwie dobranych warunkach obróbki zmniejszenie właściwości skrawnych narzędzia następuje stopniowo, w miarę ścierania się jego powierzchni przyłożenia i tworzenia się żłobka na powierzchni natarcia. Najczęściej przyjmowanym kryterium trwałości narzędzia jest wartość starcia na powierzchni przyłożenia (rys. 4 i 5), gdyż jest stosunkowo łatwa do pomiaru i ma wpływ na inne wymienione czynniki decydujące o upływie okresu trwałości narzędzia [9, 10].

W normie ISO 3685:1993 (PN-ISO 3685:1996) określono zalecane procedury badań trwałości noży tokarskich punktowych z ostrzami ze stali szybko tnącej, węglików spiekanych i materiałów ceramicznych, używanych do toczenia stali i żeliw. Z kolei zalecane procedury badania trwałości narzędzi do frezowania stali i żeliwa zamieszczono w normach:

- ISO 8688-1:1989 (PN-ISO 8688-1:1996) – dotyczących badań trwałości narzędzi z węglików spiekanych do frezowania czołowego,
- ISO 8688-2:1989 (PN-ISO 8688-2:1996) – dotyczących badań trwałości narzędzi ze stali szybko tnącej do frezowania obwodowo-czołowego (głównie obwodem lub głównie czołem narzędzia) i do frezowania rowków.



Rys. 4. Zużycie ściernie ostrza noża tokarskiego punktowego zgodnie z PN-ISO 3685:1996 [9]



Rys. 5. Zużycie ściernie ostrzy frezów walcowo-czołowych i frezów do rowków – zgodnie z normą PN-ISO 8688-2:1996 [10]

Zalecenia zawarte w tych normach odnoszą się do badań laboratoryjnych, a jednocześnie są przewidziane do stosowania w praktyce produkcyjnej.

Przebieg zużycia ostrza w czasie przy niezmiennych warunkach pracy umożliwia – dla przyjętego kryterium stępienia – określenie trwałości ostrza. Nanosząc wartości prędkości skrawania i określonych przy ich stosowaniu trwałości ostrzy na wykres okresu trwałości ostrzy w funkcji prędkości skrawania (wykonany w skali podwójnie logarytmicznej), otrzymuje się linię prostą o równaniu [3]:

$$v_c \cdot T^{-1/k} = C \quad (1)$$

gdzie: v_c – prędkość skrawania [m/min]; T – okres trwałości [min]; C – stała; $k = \tan \alpha$ (nachylenie wykresu w skali podwójnie logarytmicznej); które po przekształceniach może mieć postać:

$$T = C_T \cdot v_c^k \quad (2)$$

lub

$$v_c = \frac{C_V}{T^m} \quad (3)$$

gdzie: $m = -1/k$

Ze względów praktycznych, w aspekcie zwiększania produktywności obróbki skrawaniem, zwłaszcza w produkcji masowej i wielkoseryjnej, ważne jest uwzględnienie we wzorze Taylora [1], oprócz wpływu prędkości skrawania na trwałość T , także wpływu takich technologicznych parametrów skrawania, jak: posuw f (w przypadku toczenia, a przy frezowaniu: posuw na ostrze f_z) i głębokość skrawania a_p . Stosuje się wzory w postaci [3]:

$$T = \frac{C_T}{v_c^{x_T} \cdot f^{y_T} \cdot a_p^{z_T}} \cdot K \quad (4)$$

$$v_c = \frac{C_V}{T^{x_V} \cdot f^{y_V} \cdot a_p^{z_V}} \cdot B \quad (5)$$

gdzie: v_c – prędkość skrawania [m/min]; T – okres trwałości ostrza [min]; f – posuw; a_p – głębokość skrawania; $x_T, y_T, z_T, x_V, y_V, z_V$ – wykładniki (oznaczane również innymi literami i indeksami); C_T, C_V, K, B – stałe. Wykładniki i stałe, w tym stałe K i B (stanowiące iloczynyny współczyn-

ników poprawkowych uwzględniających zmiany pozostałych warunków obróbki), określane są na podstawie wyników badań doświadczalnych.

Oprócz linearyzowanego modelu Taylora stosuje się różne modele matematyczne obiektu badań, w postaci równań regresji pierwszego i drugiego stopnia, w tym z członami interakcyjnymi, uwzględniające w badaniach procesów obróbki wiórowej pojedynczy lub łączny wpływ posuwu i głębokości skrawania oraz innych parametrów obróbki na okres trwałości ostrza.

Badania skrawalności materiałów i skrawności ostrzy narzędzi oparte na klasycznych doświadczalnych próbach określania trwałości ostrzy narzędzi są oferowane i wykonywane w IZTW od wielu lat na zlecenie komercyjne z firm i ośrodków badawczych oraz w ramach projektów. W zależności od potrzeb były to badania prowadzone w zakresie obróbki toczeniem, frezowaniem, wierceniem, czasem ograniczone do badań porównawczych, przy jednym lub kilku wariantach parametrów skrawania, z uwagi na to, że metoda klasyczna jest pracochłonna i wymaga dużej ilości materiału obrabianego.

Aby istotnie zmniejszyć pracochłonność określania skrawalności materiałów obrabianych lub wpływu na nią różnych cieczy obróbkowych, IZTW oferuje badania za pomocą szybkich metod określania wskaźników skrawalności materiałów, m.in. [8]:

- metodą J. Dagnella – powiercania przy stałej sile posuwowej z pomiarem czasu skrawania szeregu jednakowej długości odcinków pomiarowych (rys. 6),
- metodą AB-IOŚ – polegającą na skrawaniu ze stałą siłą posuwową, z pomiarem czasu skrawania dwóch jednakowej długości odcinków pomiarowych (rys. 7),
- metodą KC-IZTW – polegającą na skrawaniu jednakowej długości odcinków pomiarowych ze stałym posuwem, z pomiarem siły posuwowej (rys. 8).

W każdej z wymienionych metod stosowane jest specjalne oprzyrządowanie i oprogramowanie, umożliwiające pomiar wskaźników skrawalności.

W metodzie J. Dagnella [11], przeznaczonej do określania skrawalności stopów metali przez powiercanie wstępnego otworu wiertłami piórkowymi ze stali szybkoobrotowej przy stałej sile posuwowej, na podstawie wyznaczonej funkcji (6), aproksymującej liniowo wyniki pomiarów czasu skrawania kolejnych odcinków pomiarowych (rys. 6), obliczane są parametry stanowiące wskaźniki skrawalności: L – z uwagi na intensywność tępienia się ostrza [ms/mm], według wzoru (7) oraz τ_0 – ze względu na opory skrawania [ms/mm], według wzoru (8).

$$t_i = t_0 + L \cdot i \cdot l_0 \quad (6)$$

gdzie: t_i – czas skrawania odcinka pomiarowego [ms], t_0 – wartość czasu na osi rzędnych uzyskana z przecięcia tej osi liniową funkcją aproksymującą czasy skrawania poszczególnych odcinków pomiarowych, i – numer odcinka pomiarowego, l_0 – długość odcinka pomiarowego [mm].

$$L = \frac{t_k - t_0}{i_k \cdot l_0} \quad (7)$$

$$\tau_0 = \frac{t_0}{l_0} \quad (8)$$

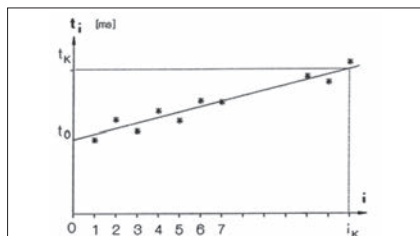
gdzie: t_k, t_0 – czasy skrawania [ms], i_k – numer odcinka ostatniego.

W metodzie AB-IOŚ, służącej do określania skrawalności stopów metali poprzez powiercanie wstępnego otworu wiertłami piórkowymi ze stali szybkoobrotowej albo toczenie wałka nożem ze stali szybkoobrotowej – przy stałej sile posuwowej,

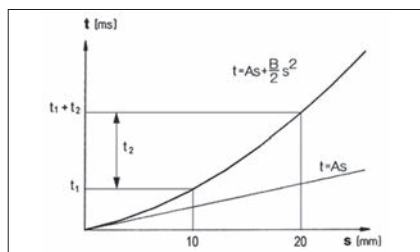
w wyznaczonej funkcji (9), aproksymującej wyniki pomiarów (rys. 7), parametr B [ms/mm^2] stanowi wskaźnik skrawalności z uwagi na intensywność tępienia się ostrza (równy co do wartości wskaźnikowi L z metody J. Dagnella), a parametr A [ms/mm] stanowi wskaźnik skrawalności ze względu na opory skrawania.

$$t = A \cdot s + \frac{B}{2} \cdot s^2 \quad (9)$$

gdzie: t – czas skrawania [ms]; s – droga skrawania [mm]; t_1 , t_2 – czasy skrawania kolejnych odcinków drogi (np. po 10 mm).



Rys. 6. Określanie wskaźników skrawalności: τ_0 (ze względu na opory skrawania) i L (z uwagi na intensywność tępienia się ostrza) – według metody opracowanej przez J. Dagnella [8, 11]



Rys. 7. Określanie wskaźników skrawalności: A (ze względu na opory skrawania) i B (z uwagi na intensywność tępienia się ostrza) – według opracowanej w IZTW metody AB-IOS [8]

W obydwu metodach analizę statystyczną prowadzi się na podstawie uzyskanych wartości wskaźników skrawalności L (lub B) i τ_0 (lub A) z co najmniej 10 prób. Analiza ta polega na obliczeniu wartości średnich i przedziałów ufności oraz na porównaniu za pomocą testu istotności dwóch średnich wartości uzyskanych dla bazowych i badanych materiałów lub płynów technologicznych. Wynik testu dla przyjętego poziomu istotności decyduje, czy można uznać materiał lub płyn technologiczny za istotnie różniący się od materiału lub płynu bazowego.

Z przeprowadzonych w IZTW badań i analiz wynika, że istnieje duża korelacja opisanych metod wyznaczania wskaźników skrawalności poprzez powiercanie otworów ze stałą siłą posuwową z klasyczną metodą toczenia wzdłużnego, co do wyniku z podobieństwa procesu powiercania prostym wiertłem piórkowym do wytaczania dwoma ostrzami. W związku z tym dla danego gatunku stali można wyznaczyć empiryczną zależność pomiędzy wskaźnikiem skrawalności z uwagi na intensywność tępienia się ostrza (L lub A) a mnożnikiem B_M (uwzględniającym wpływ materiału obrabianego) we wzorze na okresową prędkość skrawania. To pozwala na przybliżone określenie, jaką należy zastosować zmianę prędkości skrawania dla danej partii materiału obrabianego, aby trwałość narzędzi nie była mniejsza od dotychczasowej, albo przy zmianie płynu technologicznego z bazowego na badany, aby zachować dotychczasową trwałość narzędzi.

Omówione metody sprawdziły się zwłaszcza przy określaniu skrawalności stali węglowych, automatowych, niskostopowych itp. w stanie surowym, normalizowanym i zmięczonym, a także przy porównywaniu wpływu cieczy obróbkowych na skrawalność materiału.

W metodzie KC-IZTW przeznaczonej do określania skrawalności stopów metali poprzez skrawanie ostrzami ze stali szybko tnącej, węglików spiekanych lub innych materiałów – ze stałym posuwem z pomiarem siły posuwowej, w wyznaczonej funkcji (10), aproksymującej

liniowo wyniki pomiarów siły na kolejnych odcinkach pomiarowych (rys. 8), parametr C [N/mm] stanowi wskaźnik skrawalności z uwagi na intensywność tępienia się ostrza; obliczany według wzoru (11), a parametr K [N] jest wskaźnikiem ze względu na opory skrawania ($K = F_0$).

$$F_i = F_0 + C \cdot s \quad (10)$$

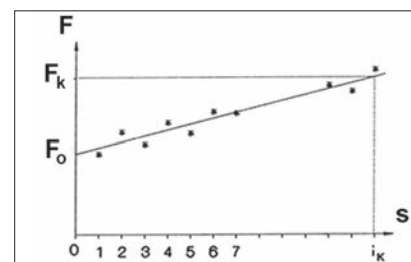
gdzie: F_1 – uśredniona siła posuwowa skrawania [N] przy skrawaniu na odcinku pomiarowym, F_0 – wartość siły na osi rzędnych uzyskana z przecięcia tej osi liniową funkcją aproksymującą uśrednione siły skrawania na poszczególnych odcinkach pomiarowych, s – droga skrawania [mm] (w zakresie pomiarowym równa iloczynowi liczby odcinków pomiarowych i_k oraz długości odcinka pomiarowego l_0).

$$C = \frac{F_k - F_0}{i_k \cdot l_0} \quad (11)$$

gdzie: F_k , F_0 – siły skrawania [N].

W przypadku niemożności zastosowania aproksymacji liniowej wyniki mogą być aproksymowane do odpowiednio dopasowanej funkcji drugiego stopnia. Metoda ta nadaje się także do szybkiej porównawczej oceny skrawalności ostrzy. W tej metodzie szybkiego określania wskaźników skrawalności prowadzi się analizę statystyczną uzyskanych wyników na podstawie odpowiedniej liczby powtórzeń pomiarów.

Rys. 8. Określanie wskaźników skrawalności: K (ze względu na opory skrawania) i C (z uwagi na intensywność tępienia się ostrza) – według opracowanej w IZTW metody KC-IZTW [8]



Podsumowanie

Przedstawione metody szybkiej oceny skrawalności materiałów można wykorzystać do korygowania parametrów obróbki w zależności od zmian obrabialności materiału i właściwości skrawanych ostrzy lub wpływu na te właściwości zastosowanych cieczy obróbkowych w celu utrzymania na właściwym poziomie albo poprawienia wskaźnika produktywności.

LITERATURA

- [1] Michłowicz E., „Zarys logistyki przedsiębiorstwa”. Kraków: Wydawnictwo AGH, 2012.
- [2] Oczko K.E., „Kierunki zwiększania produktywności procesów skrawania”. *Mechanik*. 5–6 (2007): 325–348.
- [3] Grzesik W., „Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych”. Warszawa: WNT, 2010.
- [4] Kawalec M., „Efekty technologiczne obróbki na twardo materiałów metalowych”. *Mechanik*. 1 (2006): 20–25.
- [5] Czechowski K., Tobiła D., Wronska I., „Nanostrukturalne powłoki wielowarstwowe na ostrza narzędzi z węglików spiekanych i stali szybko tnących”. *Mechanik*. 3 (2019): 174–178.
- [6] Czechowski K., „Wpływ nanostrukturalnych powłok wielowarstwowych na właściwości użytkowe narzędzi” (“Effect of nanostructured multilayer coatings on functional properties of tools”). *Mechanik*. 1 (2017): 28–33. DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.1.27> (PL i ENG).
- [7] Miernik M., „Skrawalność metali. Metody określania i prognozowania”. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2000.
- [8] Czechowski K., Wronska I., Tobiła D., „Metody szybkiej oceny skrawalności materiałów obrabianych i skrawności ostrzy narzędzi oraz wpływu cieczy obróbkowych na te właściwości”. *Mechanik*. 8–9 (2017): 680–683.
- [9] Czechowski K., Wronska I., Tobiła D., „Ocena i badanie jakości narzędzi skrawających – cz. II”. *Stal, Metale & Nowe Technologie*. 7–8 (2016): 42–47.
- [10] Czechowski K., Wronska I., Tobiła D., „Ocena i badanie jakości narzędzi skrawających – cz. III”. *Stal, Metale & Nowe Technologie*. 9–10 (2016): 56–64.
- [11] Dagnell J., „Machinability ranking by a constant feed force method”. *Annals of the CIRP*. XVII, 3 (1969): 233–242. ■