

## Nowoczesne metody monitorowania zużycia ostrzy narzędzi

Maciej SZAFARCZYK, Jarosław CHRZANOWSKI, Radosław GOŚCINIAK\*

### WPROWADZENIE

Powszechnie wiadomo, że spośród wszystkich elementów systemu biorących udział w obróbce skrawaniem ostrza narzędzi zużywają się najszybciej. W związku z tym muszą być często zamieniane przez ostrza takie same, lecz ostre. Ostrze zużywa się już od chwili jego zetknięcia z materiałem obrabianym. Zużycie to może przebiegać stopniowo, wskutek mechanicznego, termicznego i chemicznego oddziaływania procesu skrawania, nazywane jest wówczas zużyciem naturalnym. Przy zużyciu naturalnym zamiana na ostre powinna nastąpić, gdy zostanie osiągnięty stan założonego wskaźnika zużycia przyjęty jako kryterium stopienia. Potrzeba zamiany może też nastąpić nagle wskutek przekroczenia granic wytrzymałości i wykruszenia lub stopienia ostrza. Taki przypadek określa się jako katastroficzne stopienie ostrza i oznacza akronimem KSO.

Katastroficzne stopienie ostrza powinno być możliwie szybko wykryte a po jego wykryciu należy spowodować odpowiednie zmiany w przebiegu procesu obróbki. Oznacza to, że stosowanie automatyzacji obróbki wymaga automatycznego wykrywania i odpowiedniego reagowania na KSO. Przebieg i zakres takiego automatycznego nadzoru zależy między innymi od rodzaju obróbki. Na rynku istnieje szereg układów automatycznego nadzoru nad KSO.

Zużycie naturalne jest z jednej strony trudniejsze do pomiaru, lecz z drugiej stawia mniejsze wymagania w stosunku do czasu reakcji układu nadzoru, z powodu ciągłego charakteru przebiegu i tolerancji wielkości wskaźnika wybranej jako kryterium stopienia. Przeprowadzono szereg badań automatycznego monitorowania i nadzorowania naturalnego zużycia ostrzy oraz opublikowano wiele ich wyników [1], lecz nie ma dotychczas rozwiązań zaakceptowanych i stosowanych przez przemysł.

---

\* Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Instytut Technologii Maszyn

Prof. dr inż. Maciej Szafarczyk

Dr inż. Jarosław Chrzanowski – adiunkt

Mgr inż. Radosław Gościński – doktorant

## **KATASTROFICZNE STĘPIENIE OSTRZA**

Najczęściej stosowane wykrywanie KSO opiera się na pomiarze i ocenie przebiegu sił skrawania. Nagła zmiana kształtu ostrza powoduje nagłą zmianę sił skrawania, mierzoną bądź bezpośrednio, bądź przez obciążenie wrzeciona lub silnika napędowego. W przypadku toczenia zmierzony przebieg sił można powiązać z cyklem zmian odpowiadającym jednemu obrotowi obrabianego przedmiotu [2]. W przypadku frezowania katastroficzne stępienie jednego z ostrzy freza zmienia przebieg sił, gdy to ostrze znajduje się w materiale, w stosunku do przebiegów sił związanych z innymi ostrzami. W obu przypadkach obróbka powinna być bezzwłocznie zatrzymana. Przed kontynuacją obróbki, po zamianie narzędzia, wymagane jest sprawdzenie czy fragmenty zniszczonego ostrza nie pozostały wbite w materiał przedmiotu.

Inną strategię automatycznego nadzoru KSO wykorzystuje się w niektórych przypadkach wiercenia. W przypadku wiercenia katastroficzne stępienie polega zwykle na złamaniu lub ukręceniu wiertła. Odłamany koniec wiertła pozostaje po KSO w niedokończonym otworze. Przy jednoczesnej obróbce zespołem wiertel wielu stosunkowo niewielkich otworów, co jest przypadkiem częstym w przemyśle samochodowym, operację wiercenia kończy się, mimo złamania wiertła. Korpus ze złamanym kawałkiem wiertła musi być poddany specjalnym zabiegom obróbkowym, lub zostać złomowany. Automatyczny nadzór powinien nie dopuścić do prób kontynuacji dalszej obróbki korpusu, gdyż złamane wiertło, tkwiące w otworze, doprowadziłoby do łamania następnych narzędzi (rozwiertaka, gwintownika...), które usiłowałyby ten otwór obrabiać. W takim przypadku monitorowanie może zostać przeprowadzone w przerwie między tymi operacjami. Może ono polegać na sprawdzeniu, czy po wywierceniu otworów w korpusie i wycofaniu narzędzi żadne wiertło nie zostało złamane. Zadanie to można stosunkowo łatwo wykonać metodą dotykową, lub bezdotykową [3].

Istnieje szereg firm, głównie niemieckich, oferujących gotowe urządzenia i programy do realizacji obu wymienionych strategii automatycznego nadzorowania KSO (Artis, Brankamp, Nordmann...) [4].

## **NATURALNE ZUŻYCIE OSTRZA**

Naturalne zużycie polega na stopniowym ubywaniu materiału ostrza podczas skrawania zmieniającym jego kształt i wymiary. Zmiany te mogą dotyczyć wszystkich powierzchni ostrza stykających się z przedmiotem obrabianym lub z wiórem w czasie skrawania. W teorii skrawania przyjęto, ujednolicone w skali międzynarodowej, oznaczenia wybranych wymiarów zmian spowodowanych zużyciem [10] stosowanych jako parametry przy opisywaniu stanu ostrza spowodowanego naturalnym zużyciem. Parametry te przedstawia się zwykle na przykładzie noża tokarskiego.

Najwłaściwszą metodą monitorowania byłby bezpośredni pomiar parametru, który wybrano do oceny stanu zużywającego się ostrza. Niestety nie jest to możliwe na bieżąco, podczas skrawania, gdyż czynna część ostrza jest wówczas zagłębiona w obrabianym materiale przedmiotu. Trzeba w związku z tym, bądź mierzyć w czasie skrawania inne dostępne wielkości fizyczne, które są powiązane w jednoznaczny i znany sposób z parametrem geometrycznym ostrza określającym zużycie, bądź mierzyć ten parametr bezpośrednio w czasie przerw w obróbce.

Ocena stanu naturalnego zużycia ostrza w czasie przerw w obróbce, zamiast ciągłego monitorowania w czasie skrawania, jest dopuszczalna w przypadku operacji krótkich w stosunku do okresu trwałości ostrza, ze względu na ciągły charakter narastania naturalnego zużycia.

Monitorowanie i nadzór nad stanem ostrza może wykonywać człowiek-operator, lub zadania te może realizować układ automatyczny. W przypadku „ręcznego” nadzorowania naturalnego zużycia ostrza operator monitoruje zwykle jego stan na podstawie:

- obserwowania właściwości technologicznych, czyli wyników obróbki - na przykład na podstawie oceny jakości powierzchni przedmiotu uzyskanej po obróbce,
- zjawisk towarzyszących skrawaniu i działających na jego zmysły - zwykle ocenia zużycie na podstawie emitowanych dźwięków lub drgań,
- obserwacji zmian geometrii ostrza, w czasie przerw w obróbce, oraz wykonania wówczas ewentualnych pomiarów - zwykle pomiarów za pomocą mikroskopu warsztatowego.

Z doświadczenia operatora wynika, którą metodę najlepiej zastosować i jakie przyjąć kryterium decydujące o potrzebie zamiany ostrza na nowe, ostre.

Ze względu na coraz powszechniejsze stosowanie obrabiarek NC i związaną z tym automatyzację obróbki skrawaniem, zarówno przy produkcji masowej jak małoseryjnej, istnieje istotna potrzeba stosowania automatycznego monitorowania i nadzoru naturalnego zużycia ostrzy. System automatyczny mógłby nie tylko zastąpić operatora, ale również monitorować zużycie dokładniej i bardziej wiarygodnie niż operator, ze względu na obiektywne pomiary i powtarzalne algorytmy przetwarzania sygnałów. Do monitorowania próbowano stosować pomiary: sił skrawania i wielkości z nimi związanych (odkształceń, momentów, prądów silników...), drgań, fal naprężeń (zwanym emisją akustyczną, AE), dźwięków... Niestety, w przeciwieństwie do KSO, mimo licznych badań różnych metod automatycznego monitorowania naturalnego zużycia ostrza w znanych ośrodkach naukowych [1], nie udało się dotychczas opracować systemu, który znalazłby zastosowanie w praktyce przemysłowej.

Niepowodzenia wynikają, przede wszystkim, z trudności określenia wiarygodnej zależności między mierzoną wielkością fizyczną a zużyciem ostrza. Na zależność tą wpływa zbyt wiele zmiennych czynników procesu skrawania. Zależność ta jest również inna przy innej „historii” ostrza; zmienia się, gdy ostrze wcześniej było używane do skrawania w innych warunkach. Wynika stąd możliwość uzyskania wiarygodnej zależności i stosowania, w związku z tym, monitorowania zużycia na podstawie pomiarów wielkości fizycznych, które mu towarzyszą, tylko przy powtarzającym się przebiegu procesu skrawania. Można wówczas wykryć zależność, która odpowiada temu przypadkowi obróbki i wykorzystać ją do monitorowania. Występuje to przy produkcji wielkoseryjnej, a zwłaszcza przy produkcji masowej. W przemyśle uważa się jednak, że wówczas dostatecznie dobrze działa zamiana ostrza na nowe po obróbce zawsze takiej samej, określonej doświadczalnie, liczby przedmiotów. Odpowiada to pogładowi, że w produkcji wielkoseryjnej, przy dużej powtarzalności właściwości stosowanych ostrzy i obrabianych przedmiotów monitorowanie naturalnego zużycia w ogóle nie jest potrzebne, w przeciwieństwie do monitorowania katastroficznego stopienia. Nie jest to, co prawda, zgodne z wynikami badań, lecz

niewątpliwie brak monitorowania naturalnego zużycia ostrza jest w tym przypadku mniej dotkliwy niż przy produkcji małoseryjnej lub jednostkowej.

## **ZALECANE „MONITOROWANIE” NATURALNEGO ZUŻYCIA W TOKARKACH STEROWANYCH NUMERYCZNIE**

Niektórzy producenci tokarek NC twierdzą, że w ich obrabiarkach stosuje się monitorowanie naturalnego zużycia ostrza, dzięki zastosowaniu sond narzędziowych. Sonden narzędziowe są od kilkunastu lat stosowane w celu określania położenia ostrzy narzędzi w układach współrzędnych obrabiarek NC. W tokarkach NC są to sondy dotykowe z trzpieniami zakończonymi prostopadłościennymi płytkami. Sonden takie są umieszczane na końcach ruchomych ramion przymocowanych do korpusów wrzecienników.

W celu określenia współrzędnych ostrza sonda jest wprowadzana do przestrzeni obróbkowej tokarki a narzędzie jest do niej dosuwane. Dosuwanie ostrza narzędzia do sondy odbywa się kolejno wzdłuż osi współrzędnych X i Z aż do zetknięcia z prostopadłą do danej osi płaszczyzną płytki sondy. W chwili, gdy wierzchołek ostrza dotknie do płytki sonda wysyła jednobitowy sygnał do układu sterowania NC, który powoduje zapamiętanie, jaka jest wówczas wartość współrzędnej wzdłuż której odbywał się ruch. Stosowanie sondy narzędziowej ma sens gdy kolejne zabiegi obróbkowe wykonywane są różnymi narzędziami. Aby program obróbkowy mógł być prawidłowo wykonany konieczne staje się wtedy określenie położenia wierzchołków kolejnych narzędzi względem wybranego punktu odniesienia. Wartości te nazywane są współczynnikami korekcji i wprowadzane są do układu sterowania obrabiarki a procedurę określa się jako „ustawianie zestawu narzędzi”. Taki pomiar współrzędnych wierzchołka ostrza można powtórzyć po określonym czasie, gdy ostrze narzędzia uległo już pewnemu zużyciu. Zmierzone wartości będą wówczas nieco inne, między innymi wskutek naturalnego zużycia powodującego skrócenie ostrza, które jest oznaczane symbolem KE. Producenci obrabiarek proponują, aby zmianę wartości współrzędnej w stosunku do wartości współrzędnej uzyskanej przy dotykaniu wierzchołkiem narzędzia ostrego traktować jako miarę naturalnego zużycia, wyrażoną przez KE. Propozycja ta spowodowała to, że korekty wpisywane do układów sterowania NC po ponownym określaniu współrzędnych ostrza nazywane są na ogół „zużyciem ostrza” [5]. Nie uwzględnia się jednak przy takim podejściu, że **na zmianę wartości współrzędnej wpływają również inne czynniki, poza skróceniem ostrza.** Nie uwzględnia się na przykład, że **znacznie większe zmiany wartości współrzędnych mogą powodować odkształcenia termiczne.**

Przeprowadzone badania powtarzalności pomiarów sondą narzędziową [8] wykazały, że wartość powtarzalności jest zbliżona do granicznej wartości KE. Oczywiście ponowne określanie współrzędnych wierzchołka ostrza jest potrzebne i uwzględni ono również wpływ skrócenia ostrza na wartości współrzędnych jego wierzchołka, a więc skoryguje również bezpośredni wpływ naturalnego zużycia na wymiary przedmiotu obrabianego. Nie można jednak zmiany współrzędnych traktować jako KE, gdyż skrócenie ostrza jest tylko jednym ze składników tej zmiany.

## KONCEPCJA POMIARU ZUŻYCIA OSTRZA NOŻA ZA POMOCĄ TOKARSKIEJ SONDY NARZĘDZIOWEJ

Jak przedstawiono powyżej typowe zastosowanie sondy narzędziowej nie może być wykorzystane do monitorowania naturalnego zużycia ostrzy noży tokarskich przez pomiar skrócenia ostrza, KE. Jednak takie monitorowanie byłoby bardzo korzystne, gdyż używanie do tego celu sond daje szansę na praktyczne zastosowanie pomiarów w celu monitorowania zużycia ostrzy noży tokarskich w przemyśle. Sondy są już przystosowane do warunków warsztatowych i są już obecnie instalowane w większości tokarek sterowanych numerycznie. Pracownicy wydziałów obróbkowych są już przyzwyczajeni do stosowania sond. **Nasunęło to pomysł na taką modyfikację sondy, aby mogła ona w czasie tego samego dosunięcia ostrza narzędzia wykonywać dwie funkcje: określać współrzędne wierzchołka ostrza w układzie NC obrabiarki oraz prawidłowo zmierzyć skrócenie ostrza, KE [6].**

W celu wyeliminowania innych czynników zakłócających pomiar KE należało tak zaprojektować sondę, aby pomiar skrócenia ostrza był wykonywany w odniesieniu do stałej bazy położonej jak najbliżej w stosunku do wierzchołka ostrza (rozwiązania takie opatentowano [7]).

Najlepiej było by, aby pomiar KE był wykonywany w odniesieniu do bazy umieszczonej na tej samej co wierzchołek płytki skrawającej. Do pomiaru można wykorzystać istniejące czujniki obrabiarki stosowane do pomiaru współrzędnych, lub dodatkowe czujniki wbudowane w sondę narzędziową. Oceniono, że zakres pomiarów KE powinien wynosić około 0,5 mm a dokładność ułamek mikrometra. Wymagana dokładność wskazywała raczej na zastosowanie specjalnego czujnika w sondzie narzędziowej.

Ponieważ zastosowanie sondy dotykowej powoduje, że KE jest mierzone w określony sposób, postanowiono to zaznaczyć stosując dla tak zmierzonego skrócenia ostrza symbol pKE.

W celu jednoczesnego określania współrzędnych wierzchołka ostrza w układzie NC zmodyfikowana sonda powinna również, po dotknięciu wierzchołkiem ostrza do płytki prostopadłościennej, wysyłać do układu sterowania numerycznego możliwie powtarzalny sygnał jednobitowy, tak jak typowa sonda narzędziowa.

Dla zapewnienia możliwości określania współrzędnych i pomiaru zużycia różnych rodzajów noży tokarskich sonda powinna działać przy ruchu dosuwającym do niej ostrze z każdego z czterech kierunków: +X, -X, +Z i -Z.

## WARIANTY ROZWIĄZAŃ

Pierwsze zmodyfikowane sondy zbudowane i zbadane w Politechnice Warszawskiej działały tylko przy ruchu dosuwanego ostrza w kierunku -X. Chodziło wówczas o sprawdzenie, czy pomiar pKE względem bazy umieszczonej na narzędziu umożliwia dostatecznie dokładne określanie naturalnego zużycia ostrzy noży tokarskich. W pierwszym rozwiązaniu sondy, wykorzystano dwa precyzyjne łączniki drogowe, z których jeden dotykał do wierzchołka ostrza a drugi do punktu narzędzia wybranego jako baza pomiarowa. Pomiar wykorzystywał różnice wskazań już istniejącego w obrabiarce czujnika współrzędnej X. Wyniki były obiecujące, lecz czujnik pomiaru współrzędnych nie dawał założonej dokładności pomiaru pKE a

zastosowanie dwóch łączników drogowych ograniczało możliwości zbliżenia bazy pomiarowej do wierzchołka ostrza.

Następna sonda zbudowana w tym samym etapie badań miała wbudowany dokładny czujnik indukcyjny LVDT, który pozwalał na pomiar przemieszczeń z dokładnością równą dziesiątym częściom mikrometra. Korpus czujnika był przesuwany w obudowie sondy i wypychany na zewnątrz sprężyną, która go dociskała do twardego zderzaka. Korpus czujnika był zakończony ostrym występem, który przy dosuwaniu ostrza narzędzia opierał się o jego punkt wybrany jako baza pomiarowa i powodował przesuwanie całego czujnika w głąb sondy. Dzięki takiemu rozwiązaniu można było mierzyć skrócenie ostrza, pKE, w stosunku do bazy umieszczonej bardzo blisko wierzchołka ostrza, nawet na tej samej płytce skrawającej. Sonda ta została bardzo starannie i wszechstronnie przebadana w ramach pracy doktorskiej [8]. Okazała się bardzo dobra do pomiaru zużycia poprzez pKE, lecz nie nadawała się do praktycznego zastosowania. Z założenia zresztą nie była do tego przeznaczona. Była zbyt złożona i droga, a pomiar umożliwiała tylko przy jednym kierunku przysuwania ostrza.

Do budowy wielozadaniowej sondy, która nadaje się do praktycznego zastosowania, wykorzystano oryginalne rozwiązanie tensometrycznego czujnika pomiarowego (zgłoszone do opatentowania). Główną częścią czujnika jest zginany okrągły pręt na odcinku którego wykonano obustronne spłaszczenie i naklejono cztery aktywne tensometry połączone w pełen mostek. Spłaszczenie jest ustawione pod kątem  $45^{\circ}$  w stosunku do osi X i Z. Dzięki takiemu rozwiązaniu tensometry prawidłowo mierzą wygięcie pręta przy naciskaniu w każdym z czterech kierunków (+X, -X, +Z lub -Z) na prostopadłościenną płytkę przymocowaną do jego górnego końca. Pozwala to na pomiar przemieszczenia płytki a, po zastosowaniu układu porównującego, na wysyłanie w określonym położeniu płytki sygnału jednobitowego, wykorzystywanego do określania współrzędnych ostrza.

W celu pomiaru pKE w odniesieniu do bazy znajdującej się na płytce skrawającej pręt z tensometrami umieszczono w rurce zakończonej płytką prostopadłościenną z otworem usytuowaną pod prostopadłościenną płytką pręta. Krawędzie tej płytki są równoległe do bocznych płaszczyzn płytki pręta. Przy dosuwaniu wierzchołka ostrza do płytek sondy najpierw wierzchołek ostrza opiera się o płytkę pręta i przesuwa ją wyginając pręt. Mostek tensometryczny wysyła narastający sygnał pomiarowy. Przy ustalonym wygięciu pręta wysyłany jest jednobitowy sygnał dla określenia współrzędnej wierzchołka. Po dalszym ruchu ostrza i wyginaniu pręta następuje zetknięcie płytki skrawającej z krawędzią płytki rurki. Pomiar odległości między wierzchołkiem ostrza a bazą jest wówczas zakończony i ruch ostrza powinien zostać przerwany. Wartość sygnału z mostka tensometrycznego w chwili dotknięcia krawędzi płytki rurki powinna zostać zapamiętana. Różnica między wartością sygnału przy ostrym narzędziu i wówczas gdy narzędzie było już używane określa pKE. Sygnał powodujący zakończenie dosuwania narzędzia do sondy może być wysyłany przez zestyki rozwierane przy wychylaniu rurki, przez tensometry naklejone na rurkę lub może być generowany przez układ NC [9].

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] G. Byrne, D. Dornfeld, I. Inasaki, G. Ketteler, W. Konig, R. Teti, „Tool Condition Monitoring – The Status of Research and Industrial Application” CIRP Keynote Papers, STC C , 44/2/1995, p. 541
- [2] K. Jemielniak, „Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawania”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2002
- [3] [www.renishaw.com](http://www.renishaw.com)
- [4] [www.artis.de](http://www.artis.de), [www.brankamp.com](http://www.brankamp.com), [www.nordmann.info](http://www.nordmann.info)
- [5] Siemens Sinumerik 840D manual 01/2006
- [6] M. Szafarczyk, J. Chrzanowski, „Tool Probe for Measuring Dimensional Wear and X Co-ordinate of Turning Edge”, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 23 no 3-4, 2004
- [7] M. Szafarczyk, A. Winiarski, „Opis patentowy” PL 190226 B1, 11/2005
- [8] J. Chrzanowski „Pomiar zużycia ostrza noża sondą narzędziową”, Rozprawa doktorska, Warszawa 2004
- [9] R. Gościński „Strain gauge tool probe for NC lathes” IV International Conference on Machining and Measurement of Sculptured Surfaces” 2006 No A/1/MMSS06
- [10] Polska Norma – PN-ISO 3685:1996; Badanie trwałości noży tokarskich punktowych