

Monitorowanie sił skrawania podczas toczenia

ADRIAN NOSOL, MARIAN BARTOSZUK *

Streszczenie: Powszechnie wiadomo, że obróbka skrawaniem jest podstawową techniką wytwarzania części maszyn. Z biegiem lat zauważalna jest intensyfikacja procesów obróbki, co więcej – coraz częściej obrabiane są materiały trudnoskrawalne, np. stopy niklu i tytanu. Z tego powodu proces ich skrawania nie do końca jest poznany. Znajomość rozkładu sił skrawania i zjawisk występujących w strefie skrawania pozwala np. na optymalizację parametrów skrawania oraz na monitorowanie zużycia narzędzia. W literaturze fachowej urządzenia do pomiaru składowych całkowitej siły skrawania były rzadko opisywane. Z tego powodu autorzy postanowili zgłębić ten temat. Artykuł niniejszy przedstawia przykładowe konstrukcje siłomierzy tokarskich oraz porównanie wyników uzyskanych dla siłomierzy tensometrycznych własnej konstrukcji i profesjonalnego siłomierza piezoelektrycznego dla tych samych parametrów obróbki.

Słowa kluczowe: toczenie, siła skrawania, składowa siła skrawania, siłomierz, pomiar siły.

Wprowadzenie

Pomiar siły skrawania najczęściej związany jest z pomiarem wartości odkształceń sprężystych w układzie obrabiarka-uchwyt-przedmiot-narzędzie (OUPN). Odkształcenia te są wynikiem oddziaływania mierzonych składowych siły. Pomiar siły skrawania realizowany jest przy użyciu specjalnych siłomierzy [2]. Za ich pomocą określić można średnie wartości sił skrawania lub mierzyć ich wartości chwilowe.

Siłę skrawania można mierzyć przez [1, 4, 7]:

- pomiar zapotrzebowania mocy,
- zrównoważenie siły ciężarem,
- pomiar momentu skrawania,
- pomiar wywołanych odkształceń plastycznych,

- pomiar wywołanych odkształceń sprężystych.

Ideowy układ pomiarowy do pomiaru składowych sił skrawania składa się z trzech członów (rys. 1):

- a) czujnika,
- b) układu pośredniczącego (np. wzmacniacza sygnału),
- c) miernika.

Gdy w czasie pomiaru z czujnika wypływa sygnał o dostatecznej mocy umożliwiający sterowanie miernikiem, to wtedy układ pośredniczący staje się zbędny. W celu zapewnienia poprawności pomiarów siły przez układ pomiarowy, całość aparatury, jak i poszczególne jej elementy, powinny posiadać następujące cechy [1]:

- 1) cały układ pomiarowy – duża stabilność (odporność na zakłócenia), łatwość wzorcowania;

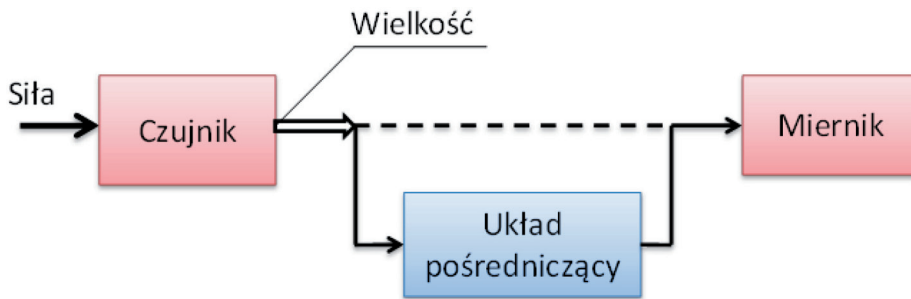
- 2) czujnik – mała bezwładność, duża czułość, brak histerezy i prostoliniowa charakterystyka;

- 3) miernik – łatwość odczytu wskazania, mała bezwładność oraz mała histereza;

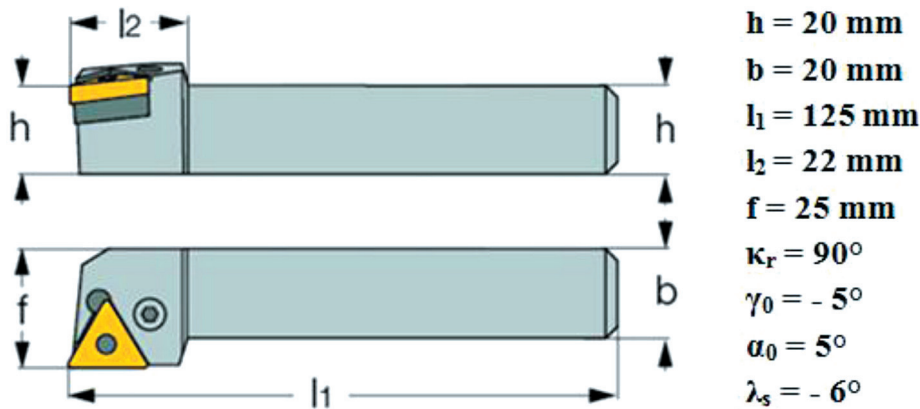
- 4) wzmocnienie układu pośredniczącego – możliwie małe, odpowiedni zakres regulacji oraz liniowa charakterystyka w całym zakresie spodziewanych częstotliwościach zmian siły.

Na przestrzeni lat powstawały siłomierze o różnej konstrukcji. Na początku budowane były we własnym zakresie, np. na bazie noża trzonkowego odpowiednio oklejonego tensometrami. Potem stosowano konstrukcje specjalnie do tego zaprojektowane. Obecnie powszechnie stosowane są siłomierze piezoelektryczne. W artykule przedstawiono budowę przykładowych siłomierzy. Ponadto porównano wyniki badań zrealizowanych: tensometrycznym siłomierzem trzonkowym, siłomierzem imakowym oraz profesjonalnym siłomierzem piezoelektrycznym firmy KISTLER.

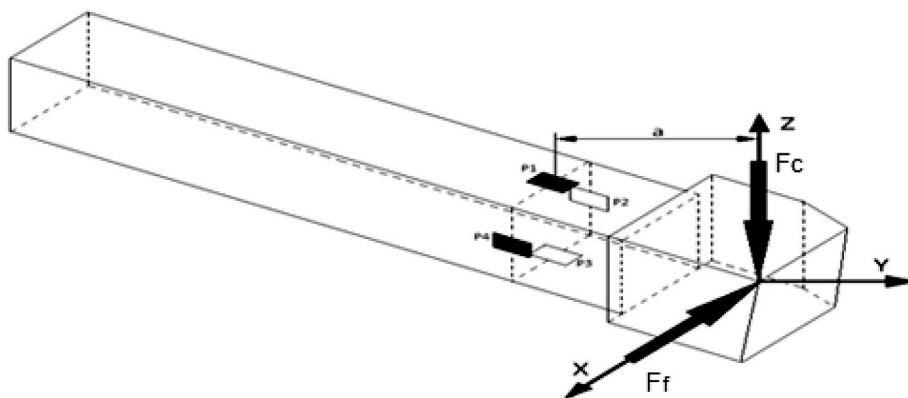
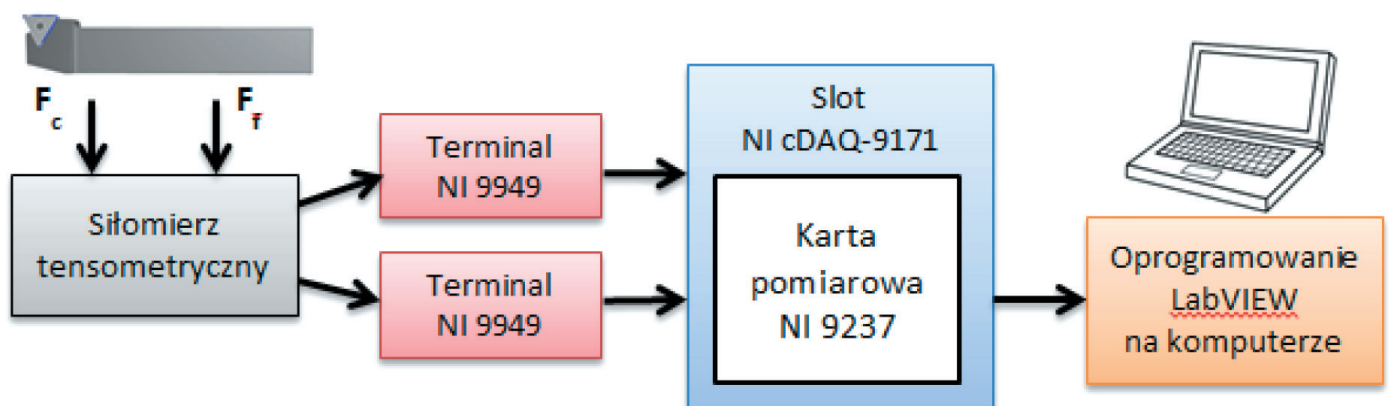
* Mgr inż. Adrian Nosol, dr hab. inż. Marian Bartoszek, prof. PO, Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, e-mail: ktmiap@po.opole.pl



Rys. 1. Schemat ogólny układu pomiarowego do pomiaru składowych siły skrawania [6]



Rys. 2. Nóż tokarski PTGNR 2020K-16 firmy Iscar [9]

Rys. 3. Schemat noża z naklejonymi tensometrami, a – odległość od końcówki ostrza, F_c – siła na osi Z, F_x – siła na osi X, $P_1 - P_4$ – tensometry [6]

Rys. 4. Schemat układu pomiarowego dwuskładowego siłomierza tensometrycznego

Budowa siłomierzy

Tensometryczny siłomierz trzonkowy

Siłomierz trzonkowy zbudowany jest na bazie noża tokarskiego PTGNR 2020K-16 firmy Iscar (rys. 2). Celem jego budowy była chęć dysponowania tanim i uniwersalnym siłomierzem, przystosowanym do pracy zarówno z tokarką CNC, jak również z konwencjonalną.

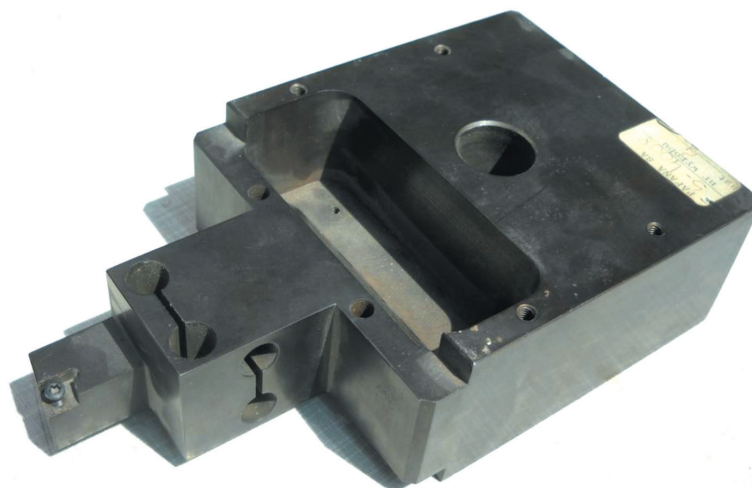
Na oprawkę nakleiono 4 tensometry firmy TENMEX typu TF-1, a każdy tensometr został umiejscowiony centralnie na każdej powierzchni trzonka (rys. 3), tworząc w ten sposób dwa pół-mostki Wheatstone'a. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwy był pomiar odkształceń w kierunku siły skrawania F_c oraz siły posuwowej F_f . Dla ustalenia relacji pomiędzy wartościami poszczególnych składowych siły skrawania, a odpowiadającymi im wartościami odkształcenia przeprowadzono wzorcowanie statyczne siłomierza. Wzorcowanie polegało na statycznym obciążeniu siłomierza znanymi wartościami sił w kierunku osi X i Z (rys. 3) i odczytywaniu w tej chwili odkształcenia noża za pomocą oprogramowania stworzonego w środowisku LabVIEW.

Do budowy układu pomiarowego wykorzystano: kartę pomiarową – NI 9237, slot – NI cDAQ-917, 2 terminale – NI 9949. Schemat układu pomiarowego przedstawiono na rys. 4.

Tensometryczny siłomierz imkowy

Siłomierz imkowy posiada specyficzną konstrukcję, która pozwala zamonto-

wać go na obrabiarce zamiast imaka nożowego (rys. 5). Jednocześnie konstrukcja ta pozwala na kontrolowane odkształcanie się jego końcówki narzędziowej pod wpływem działania sił skrawania. Siłomierz taki nie ma charakteru uniwersalnego i może być stosowany w obrabiarkach konwencjonalnych wyposażonych w konkretny model imaka narzędziowego. Wartości sił skrawania mierzone podobnie jak w poprzednim przypadku, z użyciem mostków tensometrycznych. Zmontowany siłomierz imakowy pokazano na rysunku 6.

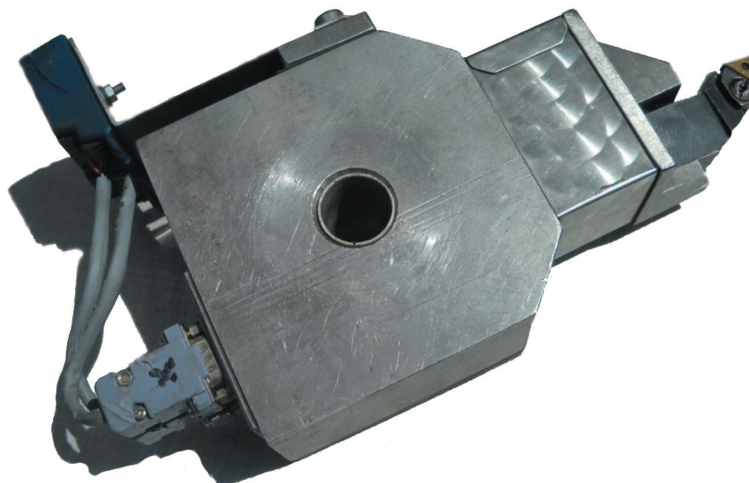


Rys. 5. Konstrukcja tensometrycznego siłomierza imakowego

Schemat toru pomiarowego używanego do pomiarów i archiwizacji składowych sił skrawania jest identyczny jak dla siłomierza trzonkowego (rys. 4).

Siłomierz piezoelektryczny

W obecnych czasach jako siłomierze używane są wysokiej klasy konstrukcje firmy Kistler (rys. 7). W konstrukcjach oferowanych przez tą firmę pomiar składowych sił skrawania dokonywany jest na podstawie ładunku wyzwalanego w kryształach piezoceramicznych odkształcanych pod wpływem sił skrawania. W tym przypadku sygnał wyjściowy musi być wzmacniany przez wzmacniacz. Siłomierz taki posiada możliwość pomiaru wszystkich trzech składowych sił F_c , F_f , F_p .



Rys. 6. Tensometryczny siłomierz imakowy

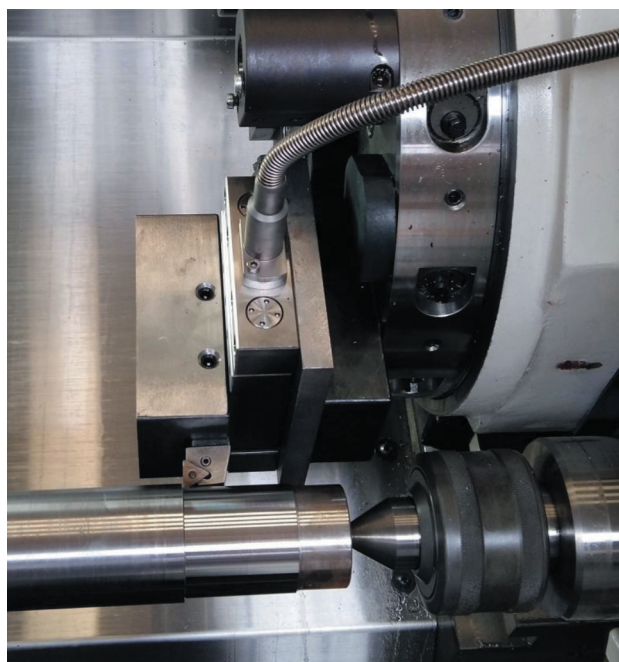
Pomiary oraz analiza ich rezultatów

Metodyka badań

W celu pokazania zalet i wad poszczególnych siłomierzy dokonano badań porównawczych procesu toczenia stali C45 (AISI 1045) narzędziem TNMA 160408 NTH1 firmy Baildonit. Jest to ostrze z wielowarstwowa powłoką ochronną, o następującej strukturze (TiC+Ti(C,N)+Al₂O₃+TiN).

Parametry procesu skrawania wynosiły odpowiednio:

- głębokość skrawania: $a_p = 2$ mm,
- posuw $f = 0,16$ mm/obr,
- prędkość skrawania $v_c = 166, 190, 238, 271, 330, 377$ m/min.



Rys. 7. Siłomierz Kistler zamontowany w obrabiarce CNC

Badania zrealizowano dla trzech rodzajów siłomierzy:

- trzonkowego siłomierza tensometrycznego własnej konstrukcji [5, 6],
- imakowego siłomierza tensometrycznego konstrukcji Katedry Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji Politechniki Opolskiej [3, 8],
- piezoelektrycznego siłomierza firmy Kistler typ 9122AA.

W przypadku siłomierzy tensometrycznych w trakcie badań korzystano z toru pomiarowego pokazanego na rysunku 4. W przypadku siłomierza piezoelektrycznego zmierzona wartość ładunku wzmacniana była przez wzmacniacz sygnału Kistler 5070 i trafiała do karty pomiarowej NI 9237. Odczytu i akwizycji danych dokonywano za pomocą programu stworzonego w środowisku LabVIEW.

Ze względu na konstrukcje siłomierzy, badania realizowano na tokarce CNC Okuma Genos L200E-M oraz na tokarce konwencjonalnej TUM-35D1 z zachowaniem identycznych parametrów obróbki.

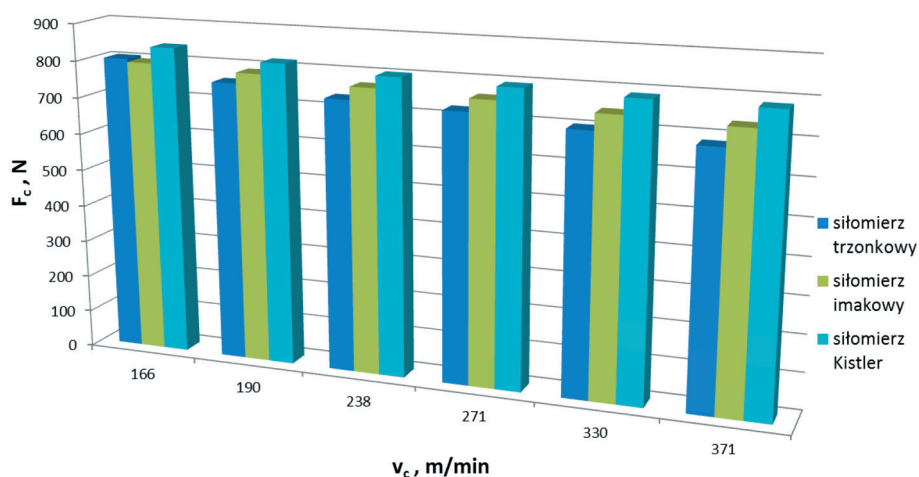
Wyniki badań

Wyniki badań dla poszczególnych siłomierzy przy zmiennej prędkości skrawania przedstawiono w tabeli 1. Porównywano wartości składowych F_c (siła skrawania) i F_f (siła posuwowa) dla wszystkich trzech siłomierzy. Uzyskane wyniki w sposób graficzny przedstawiono na rysunkach 8 i 9.

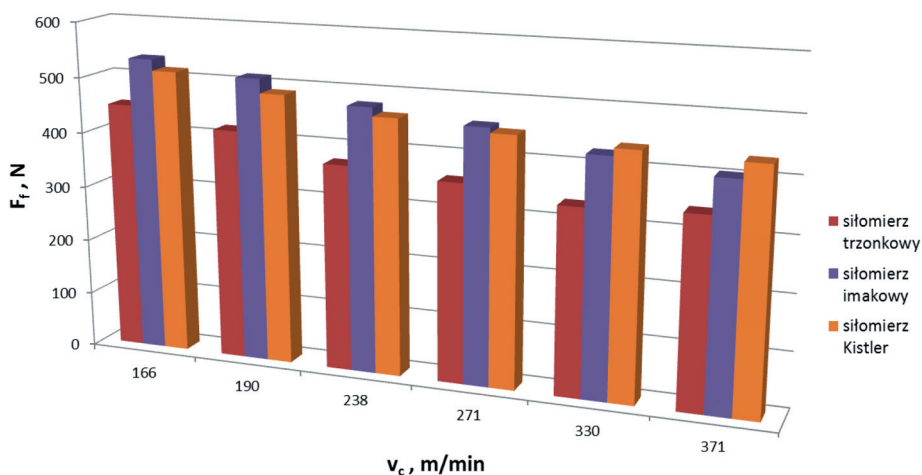
Na podstawie rysunku 7 można stwierdzić, że przy wzroście prędkości skrawania siła skrawania F_c we wszystkich trzech siłomierzach maleje. Jednak spadki te nie są równomierne. Największe zmniejszenie się siły F_c o 15% obserwuje się dla trzonkowego siłomierza tensometrycznego. Spadki dla pozostałych dwóch były mniejsze i wynosiły odpowiednio 8% dla imakowego siłomierza tensometrycznego oraz 7% dla siłomierza piezoelektrycznego firmy Kistler. Dla małych wartości prędkości skrawania $v_c = 166$ m/min różnice między wskazaniem są niewielkie i wynoszą maksymalnie 36 N (5%). Jednak już przy większych prędkościach $v_c = 377$ m/

Tabela 1. Wyniki pomiarów składowych siła skrawania dla zmiennej prędkości skrawania ($f = 0,16$ mm/obr, $a_p = 2$ mm)

Prędkość skrawania	Trzonkowy siłomierz tensometryczny		Siłomierz tensometryczny		Siłomierz piezoelektryczny	
	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]	F_c [N]	F_f [N]
166	805	449	797	535	841	515
190	758	417	787	513	818	488
238	735	372	770	477	802	461
271	725	359	760	457	795	448
330	701	335	745	425	788	438
377	684	341	735	404	785	432



Rys. 8. Wykres zależności siły skrawania F_c od prędkości skrawania



Rys. 9. Wykres zależności siły posuwowej F_f od prędkości skrawania

min osiągają wartość nawet około 100 N (15%). W całym zakresie pomiarowym różnice mieszczą się w przedziale od 5 do 15%. Największe rozbieżności wskazań występują między siłomierzem trzonkowym, a piezoelektrycznym siłomierzem Kistler.

Analizując dane zamieszczone na rysunku 9 zauważyć można, że dla wszystkich badanych siłomierzy następuje wyraźne zmniejszenie wartości siły posuwowej F_f przy wzroście prędkości skrawania. Podobnie jak w przypadku siły skrawania F_c spadki te nie są równomierne.

Największe zmniejszenie się siły obserwowane jest dla siłomierza imakowego oraz siłomierza trzonkowego. Wynoszą one odpowiednio 25% oraz 24%. Najmniejszy spadek siły posuwowej (o 16%) stwierdzono dla siłomierza piezoelektrycznego. W całym zakresie pomiarowym $v_c = 166 \div 377$ m/min widoczne są znaczące różnice pomiędzy wskazaniami poszczególnych siłomierzy, które oscylują w przedziale od 13 do nawet 26%. Zauważalna jest również zdecydowanie mniejsza wartość siły posuwowej F_f mierzonej trzonkowym siłomierzem tensometrycznym. Jest ona w całym zakresie pomiarowym mniejsza o około 90 N od pozostałych, które oscylują na podobnym poziomie.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzić można, że pomiar składowych siły skrawania różnymi siłomierzami sprawia wiele problemów. Siłomierze tensometryczne własnej konstrukcji wymagają wzorcowania, co jest operacją czasochłonną i realizowana jest

na specjalnie do tego skonstruowanym stanowisku. Rozbieżności wyników badań uzyskanych dla badanych siłomierzy spowodowane mogą być różną sztywnością obrabiarek oraz odmienną czułością sensorów pomiarowych (tensometrów) i kryształów piezoceramicznych. Co więcej w przypadku tensometrów na wynik pomiarów wpływ ma również rodzaj tensometru, sposób naklejenia i dokładność umiejscowienia. Mimo tych wad w dalszym ciągu uzasadnione jest stosowanie siłomierzy tensometrycznych, choćby z uwagi na ich niewielką cenę.

Literatura

1. AFFASANOWICZ Z. I INNI: Ćwiczenia laboratoryjne z obróbki skrawaniem. Skrypt Politechniki Śląskiej, Gliwice 1981.
2. GRZESIK W.: Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych. WNT, Warszawa 2010.
3. GRZESIK W.: The influence of thin hard coatings on frictional behaviour in the orthogonal cutting process. Tribology International, Vol. 33 (2), 2000, pp. 131-140.

4. JEMIELNIAK K.: Automatyczna diagnostyka stanu narzędzia i procesu skrawania. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2002.
5. NOSOL A.: Pomiar składowych całkowitej siły skrawania za pomocą siłomierza tensometrycznego. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, s. Mechanika. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, 2016.
6. NOSOL A.: Pomiar składowych sił skrawania na tokarce CNC. Praca magisterska – niepublikowane, Opole 2015.
7. OLSZAK W.: Obróbka skrawaniem. WNT, Warszawa 2009.
8. ŻAK K.: Badania procesu skrawania ostrzami z powłokami wielowarstwowymi. Praca magisterska – niepublikowane, Opole 2003.
9. www.iscar.pl – Katalog narzędzi, dostęp na dzień 28.06.2018 r. ■