

WYBRANE PROBLEMY DIAGNOSTYKI PROCESU OBRÓBK MATERIAŁÓW TRUDNOSKRAWALNYCH

Joanna KRAJEWSKA

Streszczenie: Zakres zastosowania materiałów trudnoskrawalnych, jak np. stopów tytanu i stali stopowych z grupy Inconel® w konstrukcjach przemysłowych wzrasta w takich branżach jak: przemysł lotniczy, motoryzacyjny, przemysł wytwarzający formy odlewnicze, a także w wytwarzaniu innych części maszyn. Ich wysokie właściwości mechaniczne sprawiają, iż materiały te należą do grupy trudnoobrabialnych z zastosowaniem technologii mechanicznej. W artykule scharakteryzowano główne cechy tych materiałów. Podano przykłady rozwiązań układów diagnostycznych, które mogą być zastosowane do monitorowania procesu obróbki. Zwrócono uwagę na problem analizy sygnałów diagnostycznych. Przedstawiono przykład zastosowania sygnału emisji akustycznej (AE) do diagnostyki procesu skrawania.

Słowa kluczowe: materiały trudnoskrawalne, diagnostyka procesu obróbki

1. Charakterystyka wybranych materiałów trudnoskrawalnych

Dzięki swoim unikatowym właściwościom mechanicznym, fizycznym oraz chemicznym, materiały trudnoskrawalne są powszechnie stosowane w takich branżach przemysłowych jak: przemysł lotniczy, motoryzacyjny, przemysł wytwarzający formy odlewnicze oraz w technologii wytwarzania części maszyn [1]. Ich korzystne właściwości mechaniczne sprawiają, iż materiały te należą do grupy trudnoobrabialnych z zastosowaniem technologii mechanicznej, w tym obróbki za pomocą skrawania. Do najpopularniejszych materiałów trudnoobrabialnych zalicza się między innymi stopy tytanu i stale stopowe typu Inconel®.

Ze względu na zastosowanie tych materiałów do pracy w ekstremalnych warunkach oraz konieczności przenoszenia bardzo dużych obciążeń, istotną rolę odgrywa jakość powierzchni wykonywanych elementów. Monitorowanie procesu obróbki pozwala na zapewnienie odpowiednich warunków kształtowania powierzchni, aby zapewnić jakość technologiczną wyrobu, gwarantującą uzyskanie wymaganych walorów użytkowych obrobionego elementu (np. odporności na zużycie zmęczeniowe).

Według [1] do trudnoskrawalnych materiałów, zaliczane są materiały konstrukcyjne o następujących właściwościach:

- duża wytrzymałość mechaniczna materiału, która jest utrzymywana w wysokich temperaturach, prowadzi do powstawania bardzo dużych sił skrawania.;
- siła przewodność cieplna utrudnia swobodny rozptyw ciepła i jego odprowadzanie ze strefy skrawania, co powoduje powstawanie wysokiej temperatury na ostrzu narzędzia, zwłaszcza w pobliżu krawędzi skrawającej.;
- składniki stopowe występujące w strukturze materiału są materiałem ściernym, przyspieszającym zużycie powierzchni ostrza.;
- utwardzanie się materiału podczas obróbki (superstopy);

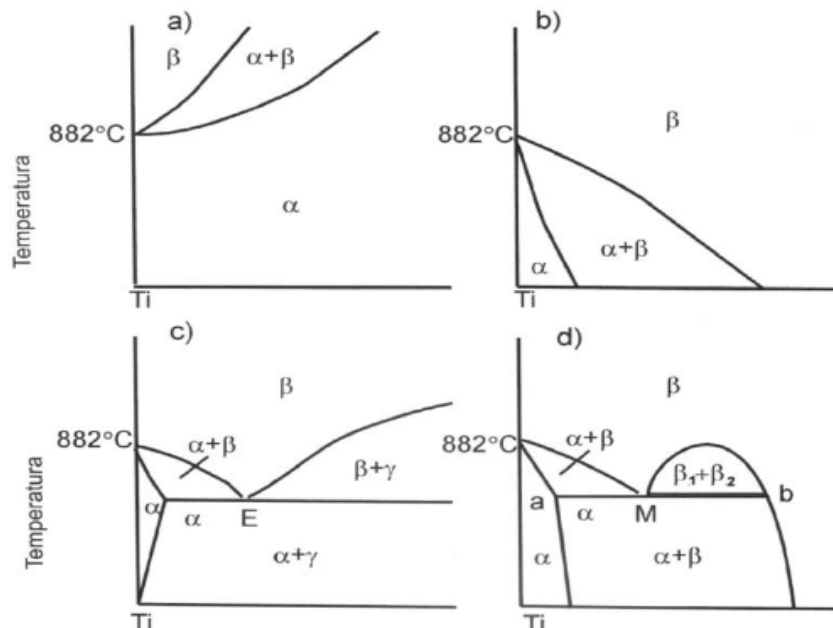
- duże siły skrawania i szybkie zużycie ostrza skrawającego powodują, że obrabiane części posiadające stosunkowo cienkie ściany mają tendencję do deformacji.

Jedną z podstawowych trudności obróbki materiałów trudnoskrawalnych jest zbyt niska wytrzymałość narzędzi skrawających, zwłaszcza na skutek wysokich temperatur skrawania, w stosunku do tych, jakie występują podczas obróbki materiałów o dobrej skrawalności.

Charakterystyka stopów tytanu

Stopy tytanu można podzielić na trzy grupy (Rys.1): jednofazowe α – zawierają w swoim składzie chemicznym pierwiastki stabilizujące fazę α , do takich pierwiastków należą: glin, oraz pierwiastki międzywęzłowe: tlen, azot, węgiel, jednofazowe β – zawierają w swoim składzie chemicznym pierwiastki stabilizujące fazę β , w których wyróżniamy pierwiastki izomorficzne: molibden, wanad, niob oraz tantal, oraz pierwiastki β -eutektoidalne: żelazo, mangan, chrom, kobalt, miedź, krzem, wodór oraz dwufazowe $\alpha+\beta$ – otrzymywane przy określonej zawartości pierwiastków stabilizujących obie fazy α oraz β .

Najważniejszym dodatkiem stopowym jest aluminium, którego zadaniem jest obniżenie gęstości stopów tytanu oraz umacnianie roztworowe fazy α . Oprócz wymienionych wyżej pierwiastków, do stopów tytanu dodawać również można tzw. pierwiastki neutralne, które nie stabilizują żadnej z faz oraz, które spowalniają niektóre niekorzystne przemiany fazowe, jakie zachodzą w stopach tytanu. Do takich pierwiastków zalicza się: cyna, cyrkon, german, hafn i tor.



Rys.1. Wpływ pierwiastków stopowych na przemianę alotropową tytanu $\alpha \leftrightarrow \beta$ oraz typ układu równowagi a) pierwiastki stabilizujące fazę α , b) pierwiastki izomorficzne stabilizujące fazę β , c) pierwiastki eutektoidalne stabilizujące fazę β , d) pierwiastki pseudoizomorficzne stabilizujące fazę β , wg [2]

Ze względu na swój skład chemiczny stopy α charakteryzują się wytrzymałością na pełzanie, dużą odpornością na kruchość, oraz stabilnością cieplną. Dodatek aluminium powoduje, iż stopy te wykazują bardzo małą podatność na przeróbkę plastyczną. Stopy cechują się słabymi właściwościami wytrzymałościowymi. Najlepszą wytrzymałością charakteryzują się stopy $\alpha + \beta$. W stosunku do stopów dwufazowych $\alpha + \beta$, stopy jednofazowe β wyróżniają się większą twardością, kruchością oraz trudnością ich obrabiania.

Charakterystyka stopów niklu - Inconel®

Inconel® należy do rodziny austenitycznych nadstopów niklo-chromowych, tzw. superstopów. Ze względu na swoje unikatowe właściwości stopy Inconel® są używane do prac w wysokich temperaturach. Należą one do grupy stopów żaroodpornych i żarowytrzymałych. W skład chemiczny Inconelu® wchodzi następujące pierwiastki: nikiel (45-80%), chrom (15-29%), kobalt (14-20%), molibden (3-26%), żelazo (1-22%) oraz w zależności od gatunku: wolfram, wanad, tytan, aluminium oraz krzem.

Do najważniejszych cech stopów Inconel® należą: duża twardość, skłonność do reakcji z narzędziem, duża wytrzymałość w wysokiej temperaturze, mała przewodność cieplna oraz zdolność do umacniania się.

Poniżej został przedstawiony wpływ poszczególnych pierwiastków na własności stopów Inconel®:

Nikiel – to główny składnik tych stopów, który ma wpływ na ich strukturę, stabilność faz oraz zachowanie się tych stopów w procesach technologicznych. Do podstawowych właściwości niklu można zaliczyć odporność na korozję, podatność na obróbkę plastyczną zarówno na zimno jak i na gorąco. Nikiel jest pierwiastkiem dobrze spawalnym oraz zgrzewalnym. Nikiel charakteryzuje dobre właściwości mechaniczne do temperatury 500°C.

Chrom – jego udział w stopach Inconelu® powoduje wzrost odporności na utlenianie oraz korozję wysokotemperaturową.

Do jednej z podstawowych zalet stopów Inconelu® należy wysoka odporność na utlenianie oraz korozję. Podczas podgrzewania, Inconel® tworzy grubą, stabilną warstwę ochronną i zabezpieczającą. Stopy te zachowują swoje właściwości w szerokim zakresie temperatur. Szczególnie dobrze sprawują się w wysokich temperaturach, gdzie żelazo czy aluminium ulega pełzaniu.

Główne właściwości:

- odporność na utlenianie i korozję;
- zachowanie integralności struktury w wysokich temperaturach;
- pasywacja powierzchni przy nagrzewaniu;
- dobra wytrzymałość na rozciąganie

2. Rodzaje układów diagnostycznych

Jednym z najistotniejszych czynników ograniczających dalszy rozwój bezobsługowych, elastycznych obrabiarek, według [3] jest tzw. monitorowanie narzędzi TCM (Tool Condition Monitoring) i procesu skrawania PCM (Process Condition Monitoring). Głównymi obszarami systemów TCM/PCM są:

- diagnozowanie stanu narzędzi skrawających
- monitorowanie zużycia ostrza (wykrywanie końca okresu trwałości)

- wykrywanie tzw. katastroficznego stopienia ostrza
- diagnostyka postaci wióra,
- wykrywanie drgań
- inne (wykrywanie narostu na ostrzu, kształtowanie ostrych narzędzi, wykrywanie kolizji).

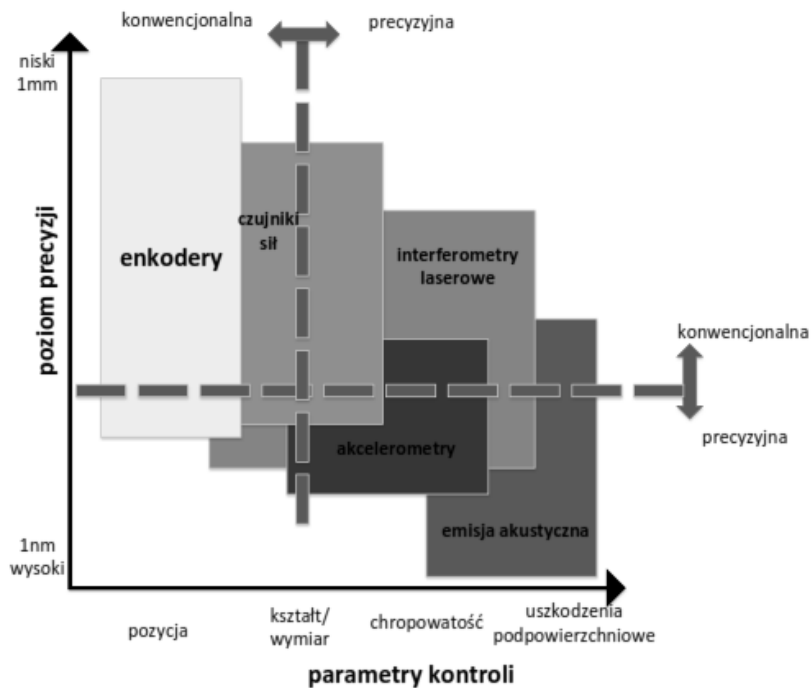
Systemy diagnostyczne stosowane są w celu zagwarantowania dokładności, stabilności oraz jakości obróbki. Aby monitorować procesy obróbki, wykorzystuje się przebiegi czasowe wybranych wielkości - mierzone on-line, w celu wydobycia istotnych zdarzeń z punktu widzenia diagnostyki procesu. Wielkości te są poddawane analizie. Do najczęstszych metod analizy zaliczą się różnego rodzaju transformaty, które pozwalają na odpowiednią interpretację sygnałów oraz wydobycie z nich najważniejszych informacji dotyczących przebiegu procesu.

Istnieje wiele różnych metod diagnostycznych. Do najpopularniejszych zalicza się:

- termo - diagnostykę, polegającą na pomiarze i analizie temperatury dla określonego stanu narzędzia. Najczęściej do pomiaru używa się termometry (pomiar stykowy) lub kamery termowizyjne, termometry na podczerwień itp. (pomiar bezstykowy);
- tribo - diagnostykę, polegającą na wykorzystywaniu informacji zawartych w używanych podczas obróbki cieczy chłodząco-smarujących lub smarów. Następnie określa się stan zużycia cieczy oraz określany jest stan techniczny przedmiotu obrabianego i narzędzia skrawającego bazując na użytej cieczy
- wibro - diagnostykę, w której do oceny stanu wykorzystywany jest sygnał drgań, który jest opracowywany oraz analizowany. W tej diagnostyce do pomiaru używa się prędkości, przyspieszenia oraz odchylenia wywołanego wibracją
- diagnostykę akustyczną, mającą za zadanie wydobyć sygnał akustyczny, a następnie przy użyciu odpowiedniego stanowiska następuje analiza oraz ocena zmierzonego sygnału akustycznego
- metodę pomiaru sił skrawania, polegającą na pomiarze odkształceń elementów, które zostały poddane działaniom sił. Przy pomocy czujników rejestrujących odkształcenia następuje przekształcenie otrzymanych sygnałów na wielkości dogodne do odczytu. Do pomiaru sił skrawania używa się siłomierzy: elektromechanicznych, elektrycznych oraz mechanicznych
- inne metody diagnostyczne w skład, których może wchodzić na przykład diagnostyka elektryczna bądź próby niszczące.

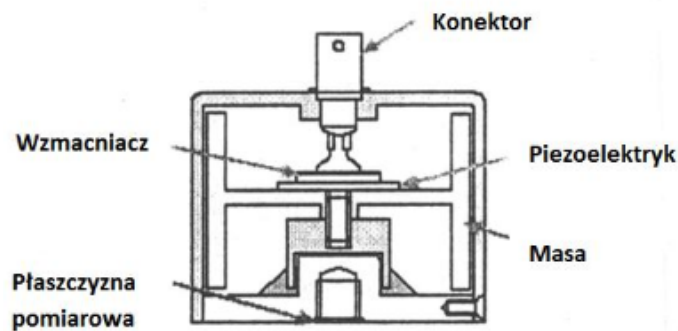
Do diagnostyki procesów skrawania używa się najczęściej czujników w postaci enkoderów, interferometrów laserowych, czujników AE, akcelerometrów i innych (przedstawione na Rys.2). W artykule zostaną opisane metody wibro-diagnostyczne (przy zastosowaniu akcelerometrów), oraz diagnostyka akustyczna, wykorzystująca czujnik AE.

Jedną z metod diagnostyki procesów obróbki, jest użycie czujników przyspieszeniowych, tzw. akcelerometrów. Są to urządzenia sejsmiczne, które oceniają wibracje mierzonego urządzenia. Ich działanie wymaga użycia efektu piezoelektrycznego, [6] czyli zjawiska fizycznego, polegającego na mechanicznej deformacji kryształu pod wpływem zewnętrznego pola elektrycznego oraz na powstawaniu na przeciwległych ścianach kryształów ładunków elektrycznych przeciwnego znaku w wyniku deformacji kryształu. Ładunek elektryczny jest proporcjonalny do przyłożonej siły, a masa czujnika jest stała, dlatego też ładunek elektryczny jest proporcjonalny do przyspieszenia - akceleracji.



Rys.2. Zastosowanie różnego typu czujników w zależności od poziomu dokładności obróbki oraz parametrów kontrolnych

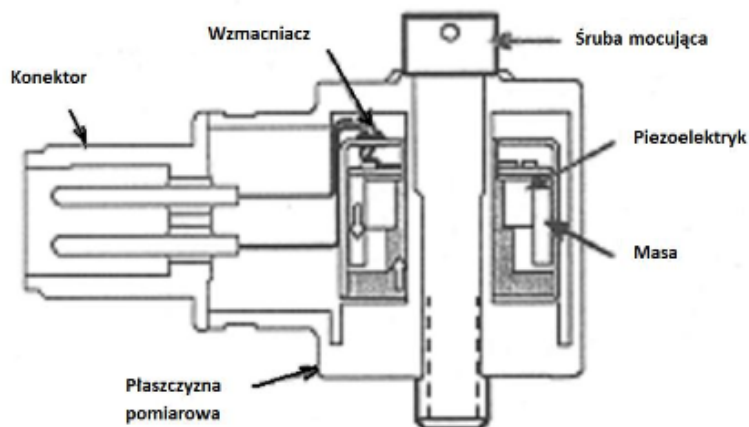
W zależności od działających na nie obciążeń wyróżnia się akcelerometry na naprężenia styczne oraz na naprężenia ściskające (Rys.3, Rys.4).



Rys.3 Akcelerometr na naprężenia ściskające [7]

Generowane fale wibroakustyczne podczas procesów skrawania, mogą być zapisane zarówno w dziedzinie czasu jak i w dziedzinie częstotliwości. Zapis w dziedzinie czasu, pozwala na skorelowanie w czasie zdarzeń, które są źródłem sygnału wibroakustycznego. Maszyny technologiczne podczas monitorowania, wytwarzają drgania harmoniczne o częstotliwościach związanych z liczbą obrotów lub innych ruchów okresowych. Amplitudy

drgań podlegają silnym zmianom. Spowodowane jest to losowością obciążeń roboczych oraz niewielkimi zmianami częstotliwości tego ruchu.



Rys.4 Akcelerometr na naprężenia styczne [7]

Rejestracja sygnału wibroakustycznego podczas procesu monitorowania ma miejsce w pewnej odległości od źródła w wybranym punkcie układu dynamicznego maszyny. Podzespoły układu maszyny cechuje wielo-rezonansowa transmitancja oraz małe tłumienie. Ma to istotny wpływ na zmiany zachodzące w okolicy punktu pomiarowego, do którego również docierają sygnały wibroakustyczne z wielu zespołów roboczych danej maszyny, a nawet z innych maszyn i urządzeń zastosowanych w procesie technologicznym. Wszystkie te czynniki, z punktu widzenia zadań diagnostyki są uznawane za sygnały zakłócające. W rejestrowanym sygnale można również zauważyć istnienie szumu (sygnału o charakterze ciągłym akustycznym, optycznym bądź elektrycznym, który zakłóca sygnał użyteczny) wywołany głównie za skutek zjawisk tarcowych w parach kinematycznych, ale również przepływem cieczy i wymuszonego ruchu powietrza[8].

Poprawianie jakości produkowanych elementów związane z intensyfikacją produkcji, wymusiło stworzenie układów diagnostycznych (systemów monitorowania) w czasie rzeczywistym/ on-line. Proces monitorowania oraz kontroli ważny jest w szczególności podczas obróbki wykończeniowej, np. toczenia oraz szlifowania. Podczas procesu toczenia, następuje formowanie się wiórów segmentowych. Tworzone wióry posiadają różnorodny rozkład odkształceń plastycznych. Obszar pogranicza segmentu charakteryzuje intensywne odkształcenie plastyczne, podczas gdy chwilami odcinki wióra są prawie plastycznie nieodkształcone. Częstotliwość segmentacji wióra zależy od wartości posuwu oraz prędkości skrawania. Niemożliwe, więc jest wykrycie procesu powstawania wióra przy użyciu akcelerometrów, dlatego proponowane jest użycie sygnału AE.

Emisja akustyczna wg [4] definiowana jest, jako fizyczne zjawisko wysyłania energii (w postaci promieniowania fal) przez ciało wzbudzone energetycznie, z równoczesnym jego przejściem do stanu o niższej energii.

Wzrastająca energia, zamieniana jest w impuls mechaniczny, który przemieszcza się wzdłuż materiału, jako fala sprężysta. Po osiągnięciu powierzchni materiału, fala ta przekształca się w falę powierzchniową. Wykrywanie sprężystych fal na przedmiocie obrabianym, przy użyciu piezoelektrycznych czujników AE, umożliwia otrzymanie

elektrycznego sygnału AE. Taki sygnał przechodzi przez przedwzmacniacz, trafiając do aparatury pomiarowej w celu jego przetworzenia.

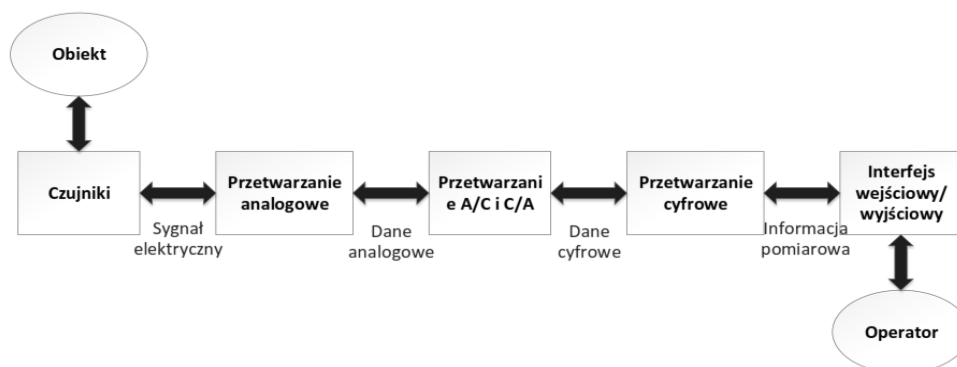
Rozróżnia się dwa rodzaje sygnałów: sygnał ciągły oraz sygnał dyskretny. Pierwszy, związany jest i towarzyszy procesom ciągłym bądź stałym. Sygnał dyskretny natomiast, pojawia się w momentach zaburzenia spójności materiału, np., gdy wiór ma wpływ na proces obróbki. Częstotliwość sygnału AE jest powyżej 20 kHz. Częstotliwość sygnału AE zawiera się w przedziale od 50 – 400 kHz.

3. Wybrane metody przetwarzania sygnałów AE

Celem przetwarzania sygnału AE jest wykrywanie "wybuchów", które są dowodem nagłej emisji energii wytwarzanej wewnątrz materiału. Zadaniem AE jest oszacowanie czasu i lokalizacji wybuchów, częstotliwości oscylacji, oraz odpowiednie opisanie nakładających się struktur.

Wydobycie takich fizycznych parametrów z otrzymanego sygnału AE jest jednym z problemów związanych z przetwarzaniem sygnału AE. Problem ten związany jest z faktem, iż sygnały są sygnałami niestacjonarnymi, których przebiegi są nieznanne i obejmują zmiany w czasie i w częstotliwości.

Jedną z popularniejszych metod przetwarzania sygnału AE jest Transformata Fouriera (FFT Fast Fourier Transform). Jej zadaniem jest rozłożenie sygnału na składowe o poszczególnych częstotliwościach. TF stosowana jest do przekształcania sygnałów rzadkich, które zawierają stosunkowo niewiele składników częstotliwościowych o znacznej amplitudzie. Mankamentem tej metody jest to, że w trakcie procesu przetwarzania surowego sygnału w dziedzinę częstotliwości, sygnał traci informacje w dziedzinie czasu. W takim przypadku otrzymany sygnał należy poddać filtracji. W celu ominięcia tego problemu, proponuje się używanie STFT (short-time Fourier Transform). Ta metoda stosowana jest głównie w przypadku sygnałów niestacjonarnych. Okno danych w STFT zostało skupione w czasie. Współczynniki widmowe obliczane są dla danych o krótkich długościach, następnie okno jest przenoszone na nową pozycję i zostaje ponownie obliczane. Na rysunku 5 została przedstawiona ogólna struktura przetwarzania sygnałów.

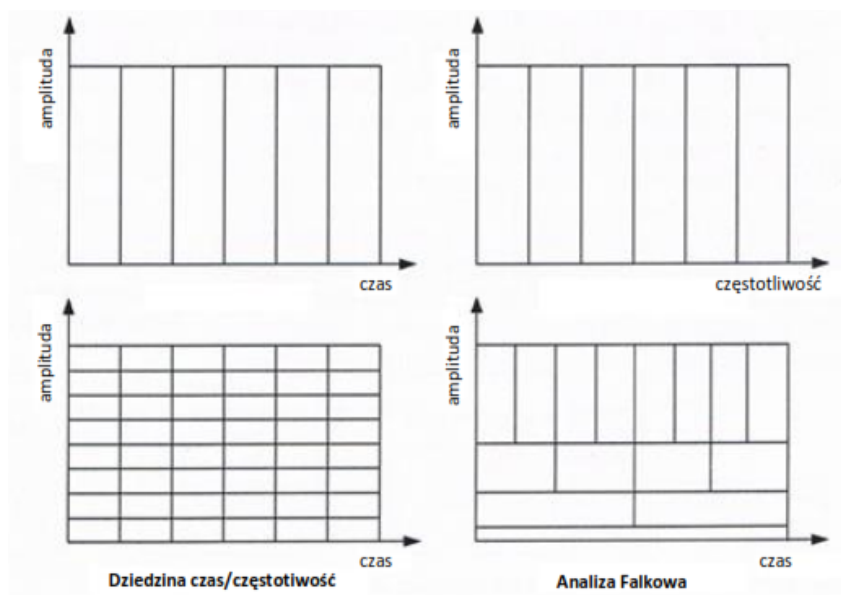


Rys.5 Struktura przetwarzania sygnałów

Kolejną metodą przetwarzania sygnałów jest analiza Falkowa. Pozwala ona na zastosowanie długich okresów czasu, gdy potrzebne są bardzo precyzyjne dane oraz dane o małej częstotliwości. Umożliwia również stosowanie krótkich okresów, gdy potrzebne są

dane o wysokich częstotliwościach. Kluczowym punktem analizy Falkowa, jest wydobycie informacji z oryginalnego sygnału, poprzez: rozkład tego sygnału na serie przybliżeń oraz rozmieszczenie danych na różnych pasmach częstotliwości. Charakterystyki w dziedzinie czasu oraz częstotliwości są zachowane. Kolejnym etapem przetwarzania sygnału, jest wybranie kilku sekwencji rozkładu, odpowiednich dla danej aplikacji.

Falki to matematyczne funkcje, które dzielą dane na różne składowe częstotliwości. Każdy fragment jest analizowany z odpowiednią rozdzielczością dopasowaną do jego skali. Najbardziej interesującą różnicą pomiędzy Transformacją Fouriera oraz Analizą Falkowa, jest fakt, iż pojedyncza funkcja falki jest zlokalizowana w przestrzeni, natomiast funkcje sinus oraz cosinus w Transformacji Fouriera nie są zlokalizowane w przestrzeni. Aby dostrzec różnice w rozkładzie czas-częstotliwość pomiędzy tymi dwoma metodami, należy przyglądnąć się podstawowej funkcji na płaszczyźnie czas-częstotliwość, która została przedstawiona na rysunku 6.



Rys.6 Podstawowe funkcje czasu oraz czasu i częstotliwości [5]

4. Przykład zastosowania AE do diagnostyki procesu skrawania materiałów trudnoobrabialnych

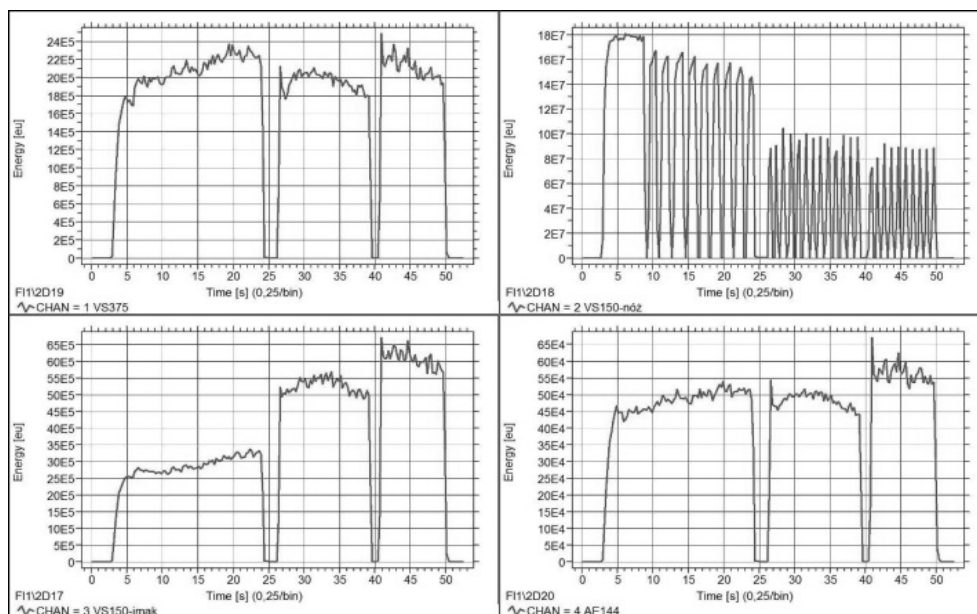
O przebiegu i efektach procesu skrawania można uzyskać informację analizując charakterystyczne wskaźniki, które można podzielić na:

- geometryczne, charakteryzujące zmianę cech stereometrycznych ostrzy (oznaczenia tych wskaźników są przyjęte zgodnie z zaleceniami normalizacyjnymi ISO);
- technologiczne, charakteryzujące zmianę cech jakości technologicznej wyrobu (zmiany dokładności wymiarowo-kształtowej i fizycznych właściwości warstwy wierzchniej);
- energetyczne, charakteryzujące zmiany strumieni energetycznych w strefie

kontaktu ostrza z obrabianym materiałem w procesie dekohezji (ich przejawem jest zmiana składowych siły skrawania i poboru mocy, zmiana ilości wydzielanego ciepła i temperatury skrawania, zmiana natężenia i amplitudy drgań, zmiana sygnału emisji akustycznej itd.).

Przeprowadzono badania wykorzystania sygnału emisji akustycznej (AE) do diagnozowania procesu skrawania materiałów trudnoobrabialnych (stopu tytanu i stali nierdzewnej). Rejestracji sygnałów emisji akustycznej (AE) dokonano przy toczeniu wałków z parametrami skrawania:

- wariant I (Rys.7): głębokość $a_p=0,7$ mm oraz stała prędkość skrawania $v_c=80$ m/min; zmienny posuw
 - a) $f_z=0,05$ mm/obr
 - b) $f_z=0,085$ mm/obr
 - c) $f_z=0,12$ mm/obr
- wariant II (Rys.8): głębokość $a_p=0,7$ mm oraz stały posuw $f_z=0,085$ mm/obr; zmienna prędkość skrawania
 - a) $v_c=60$ m/min
 - b) $v_c=70$ m/min
 - c) $v_c=90$ m/min

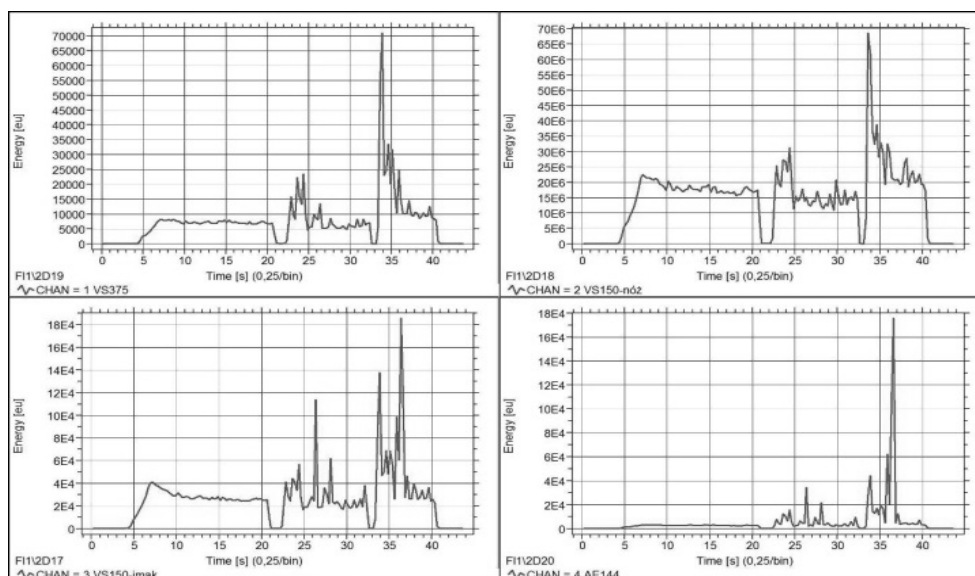


Rys.7. Średnie wartości energii (w przedziałach 0, 25s) sygnałów rejestrowanych na poszczególnych czujnikach AE w czasie obróbki wałka tytanowego – wariant I

Sygnały AE były rejestrowane z wykorzystaniem systemu pomiarowego firmy Vallen serii AMSY6 oraz różnych typów czujników pomiarowych pracujących na czterech kanałach, zamocowanych na imaku narzędziowych oraz na nożu tokarskim.

Ze względu na charakter monitorowanego metodą AE procesu rejestrację sygnałów prowadzono dla wariantu emisji ciągłej. W takim przypadku ilość parametrów AE jest ograniczona do następujących wielkości: amplituda; energia sygnału; czas narastania

sygnału; liczba przekroczeń progu dyskryminacji.



Rys. 8. Średnie wartości energii (w przedziałach 0, 25s) sygnałów rejestrowanych na poszczególnych czujnikach AE w czasie obróbki wałka ze stali nierdzewnej – wariant II

5. Wnioski

Istnieje wiele systemów służących do diagnostyki procesu i stanu narzędzia. W artykule skoncentrowano się na pełniejszym scharakteryzowaniu jednej z metod, tj. na zastosowaniu czujników emisji akustycznej. Pomimo wielu prac nad udoskonalaniem tej metody, nadal istnieje potrzeba jej rozwoju, a w szczególności skoncentrowania się nad takimi aspektami jak na przykład, przystosowanie czujników AE do pracy w trudnych warunkach, jakie występują w strefie skrawania.

Zalety diagnostyki procesu skrawania przy użyciu AE:

- zakres częstotliwości jest wyższy, niż odpowiadające wibracje maszyny oraz jest powyżej hałasu otaczającego środowiska, dzięki czemu sygnały AE pochodzące od procesu skrawania są wolne od tych zakłóceń zewnętrznych;
- prostota montażu i instalacji czujników AE poza bezpośrednią strefą skrawania, dzięki czemu czujniki nie ulegają uszkodzeniu w wyniku procesu obróbki.;
- analiza Falkowa jest lepsza od transformaty Fouriera do wskazywania uszkodzeń, gdyż pozwala ona określić czy w sygnale występują "detale" określonej wielkości i jaki mają wpływ na sygnał. Ponadto, falki służą do badania sygnału niestacjonarnego, a taki występuje podczas procesu skrawania przy użyciu AE.

Wadą diagnostyki procesu skrawania przy użyciu AE jest to, iż w miarę postępującego zużycia ostrza zmieniają się warunki dekohezji w strefie skrawania, co może stwarzać dodatkowe problemy z wyselekcjonowaniem składowych sygnałów odpowiedzialnych za poszczególne procesy (tj. dekohezji i zużycia).

Literatura

1. Zębala W.: Modelowanie procesu toczenia materiałów trudnoskrawalnych, Mechanik z. 15/2008
2. Bylica A., Sieniawski J.: Tytan i jego stopy, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1985
3. Kosmol J., Jemieliński K.: Diagnostyka narzędzia i procesu skrawania - stan aktualny i kierunki rozwoju, Mechanik nr 10, 1996
4. Jarosz M, Słownik wyrazów obcych, wydawnictwo Europa, Wrocław 2001
5. X.Chen, B. Li, Acoustic emission method for tool condition monitoring based on wavelet analysis, Published online, London 2006
6. http://kpt.wm.am.gdynia.pl/doc/WYKLAD_V.Pdf, Wykład
7. Blata J., Juracek J. :VŠB – Technická univerzita Ostrava, Ostrava 2013
8. Lipski J.: Diagnostyka procesów wytwarzania, Lublin 2013
9. Czech J., Wybrane metody i narzędzia diagnostyki obiektów technicznych, Utrzymanie Ruchu 1/2011

Mgr inż. Joanna Krajewska
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji M6
Politechnika Krakowska
31-864 Kraków, Al. Jana Pawła II 37
e-mail: jkrajewska.pk@gmail.com