

EMISJA AKUSTYCZNA JAKO WSKAŹNIK POCZĄTKU DEKOHEZJI W PROCESIE FREZOWANIA

Joanna KRAJEWSKA-ŚPIEWAK, Marek NOWAK, Józef GAWLIK

Streszczenie: Obróbka materiałów trudnoskrawalnych niesie ze sobą wiele problemów wynikających z ich unikatowych właściwości, do których można zaliczyć generowanie bardzo wysokich temperatur podczas skrawania oraz niską przewodność cieplną. Główną zaletą tych materiałów jest stosunkowo niska gęstość, która sprawia, iż konstrukcje z nich wykonane są relatywnie lekkie. W obrabianym materiale występują zmiany strukturalne (samoutwardzanie, naprężenia), które powodują zmiany właściwości warstwy wierzchniej. Procesy (propagacja pęknięć, procesy korozyjne, odkształcenia plastyczne) występujące w obrabianym materiale jednocześnie są źródłem emisji akustycznej, podczas której generowane są fale sprężyste możliwe do zarejestrowania przez odpowiedni system pomiarowy. W artykule przedstawiono metodę wykorzystującą sygnał emisji akustycznej do określenia obszaru dekohezji (burzenia spójności materiału) podczas obwodowego frezowania współbieżnego materiałów trudnoskrawalnych (Ti6Al4V, Inconel 718). Określenie początku występowania dekohezji podczas obróbki jest szczególnie istotne w przypadku obróbki wyrobów cienkościennych, stosowanych np. w przemyśle lotniczym.

Słowa kluczowe: dekohezja, emisja akustyczna, materiały trudnoskrawalne

1. Proces skrawania

Frezowanie jest procesem dynamicznym o zmiennym charakterze oddziaływań pomiędzy przedmiotem obrabianym i narzędziem. Przekształcenie warstwy skrawanej w wiór zależy od grubości warstwy skrawanej (a_p), a w strefie skrawania można wyróżnić trzy etapy oddziaływań krawędzi ostrza na materiał obrabiany [3]:

- I – gdy $a_p < h_{\min}$ - występują odkształcenia sprężyste i ugniatanie plastyczne materiału obrabianego,
- II - gdy $a_p \approx h_{\min}$ - występują odkształcenia sprężysto-plastyczne z częściowym skrawaniem materiału obrabianego,
- III - gdy $a_p \geq h_{\min}$ – następuje usuwanie materiału w postaci wióra. Gdzie h_{\min} to minimalna grubość warstwy skrawanej.

Odkształcenia sprężyste, o charakterze odwracalnym, nie powodują znacznych zmian związanych z ułożeniem atomów w sieci. Powstają wskutek przemieszczania się atomów na odległości nie większe niż odległości sieciowe. Po przekroczeniu przez materiał granicy sprężystości, w materiale dochodzi do procesów (pełzanie, dyslokacje, poślizg, bliźniakowanie), które prowadzą do występowania odkształceń plastycznych o nieodwracalnym charakterze.

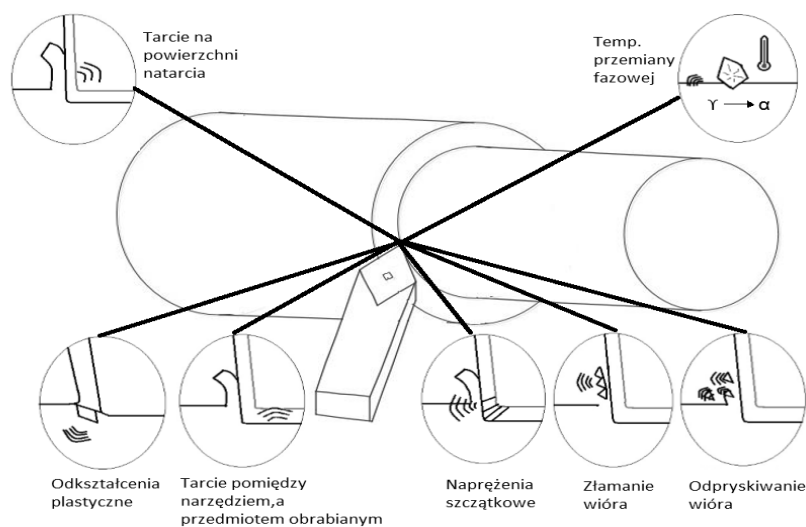
Siły działające podczas frezowania prowadzą do powstawania naprężeń, które są przyczyną odkształceń sprężystych i plastycznych. Podczas skrawania, wydzielane jest ciepło tworzące pole temperatur, które zmienia właściwości obrabianego materiału. Materiały trudnoskrawalne utwardzają się podczas skrawania, a składniki stopowe

występujące w strukturze materiału są materiałem ściernym, przyspieszającym zużycie powierzchni ostrza. Zjawiska występujące w strefie skrawania wzajemnie ze sobą oddziałują, a ponieważ zachodzą na niewielkim obszarze, z dużą prędkością i w wysokiej temperaturze, badanie ich za pomocą metod konwencjonalnych jest trudne [1], [4].

2. Emisja akustyczna

Procesy zachodzące w materiale podczas skrawania, generują fale sprężyste, które są możliwe do zarejestrowania przez odpowiedni system pomiarowy. Zjawisko emisji akustycznej polega na powstawaniu fal sprężystych wskutek wyzwolenia energii w materiale. Dornfeld i Liang w swojej pracy [5] wymienili podstawowe źródła emisji akustycznej podczas skrawania (rys.1):

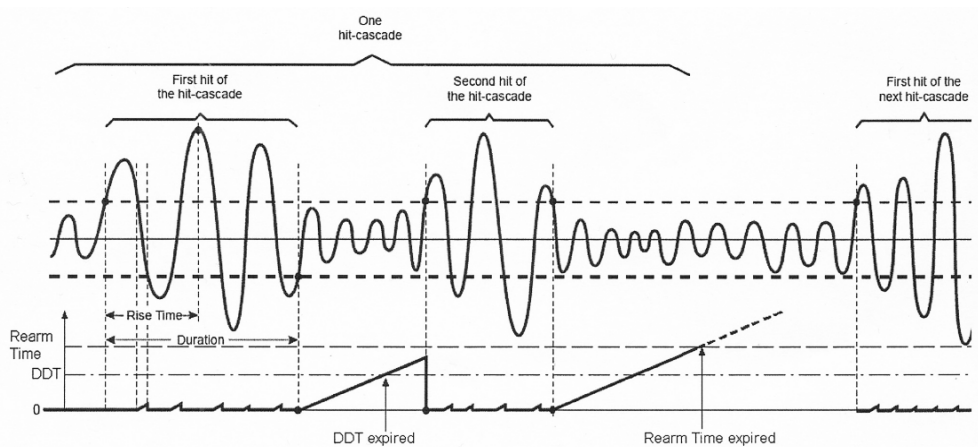
- Odkształcenia plastyczne przedmiotu obrabianego w strefie ścinania;
- Odkształcenia plastyczne oraz tarcie pomiędzy wiórem a powierzchnią natarcia narzędzia;
- Tarcie pomiędzy przedmiotem obrabianym, a powierzchnią przyłożenia narzędzia,
- Formowanie, płatanie, złamanie wióra;
- Falę uderzeniową, powstającą przy wejściu narzędzia w przedmiot obrabiany;
- Nagłe złamanie wióra na wyjściu narzędzia z przedmiotu obrabianego.



Rys. 1 Źródła emisji akustycznej podczas skrawania [13]

Sygnal emisji akustycznej podczas procesu skrawania ma charakter złożony. Zaliczany jest on do ultradźwięków o zakresie częstotliwości od 50 kHz do 2 MHz. Główną zaletą tak wysokich częstotliwości jest to, że są one odległe od częstotliwości drgań swobodnych, wymuszonych i samowzbudnych (w tym hałasów) towarzyszących skrawaniu [4].

Do podstawowych parametrów opisujących przebieg sygnału AE zalicza się: liczbę zliczeń, czas trwania zdarzenia (duration), czas narastania zdarzenia (rise time), energię oraz amplitudę (rys.2).



Rys. 2. Opis przebiegu sygnału AE [6]

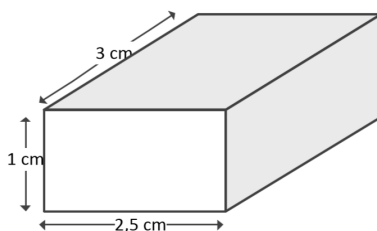
Wydobycie cech sygnału AE jest możliwe dzięki narzędziu Feature Extractor- w systemie AMSY-5. Cechy, które mogą być wydobyte z sygnału AE:

- czas przybycia (arrival time) – (48bit, 100ns); - jest to parametr wykorzystywany do identyfikacji uderzenia (hit) oraz wyznaczenia lokalizacji źródła uderzenia;
- amplituda szczytowa (uderzenia) - jest podawana w dB, a maksymalna jej wartość to 99,9dB (przy wzmacnieniu 34dB);
- wartość progowa – początkiem uderzenia jest pierwsze przekroczenie wartości progowej. Koniec uderzenia jest osiągany kiedy napięcie wejściowe nie przekroczy progu dla określonego okresu czasowego (tzw. Duration discrimination time). Wartość progowa wyrażana jest w dB;
- czas narastania (rise time) – jest to czas pomiędzy pierwszym przekroczeniem wartości progowej, a wykrytą w uderzeniu wartością szczytową;
- czas trwania wydarzenia (duration) – jest to czas pomiędzy pierwszym przekroczeniem wartości progowej, a ostatnim przekroczeniem tej wartości przez uderzenie (hit);
- liczba zliczeń – jest liczbą przekroczeń wartości progowej w czasie trwania jednego uderzenia. Jej zakres jest ograniczony do 65535 zliczeń na uderzenie;
- uderzenie kaskadowe – jest to seria dyskretnych uderzeń. Koniec uderzenia kaskadowego opisany jest jako brak przekroczenia wartości progowej dla wybranej wartości RAT;
- liczba zliczeń kaskad – jeśli całkowitą liczbą przekroczeń wartości progowej podczas trwania jednego uderzenia kaskadowego. Zakres liczby zliczeń kaskad wynosi 1 do 65536 (jedno uderzenie kaskadowe)

Bardzo ważne są wartości DDT (duration discrimination time) oraz wartość RAT (rearm time). Rearm time określa długość trwania wybuchu generowanego przez źródło AE. Czas ten powinien mieć wartość zbliżoną do okresu trwania wybuchu. Wartość DDT powinna być niższa od różnicy pomiędzy czasem końcowym, a początkiem pierwszego uderzenia. W małych strukturach sygnał AE może się nakładać i wówczas określenie wartości DDT staje się niemożliwe [7].

3. System pomiarowy

Badania przeprowadzono na prostopadłościennych próbkach wykonanych ze stopów tytanu – Ti6Al4V oraz niklu – Inconel 718 o wymiarach jak na rys.3.



Rys. 3. Wymiary skrawanych próbek

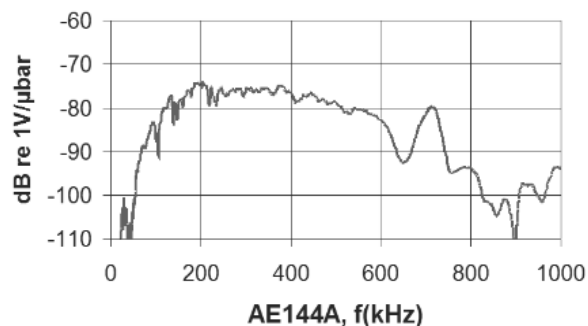
Próbki zostały poddane obwodowemu współbieżnemu frezowaniu węglukowymi frezami trzypiętowymi $\Phi 10$. Zastosowane palcowe frezy czterostrzowe redukują drgania i wibracje podczas skrawania, dzięki czemu wzrasta żywotność narzędzia skrawającego. Drgania minimalizowane są na skutek zmiennych kątów przyłożenia oraz pochylenia linii śrubowej rowka wiórowego. Cztery ostrza freza umożliwiają efektywną obróbkę rowków w porównaniu do innych narzędzi skrawających. Gdy dochodzi do zjawiska łamania wióra, dzięki specjalnej geometrii ostrza skrawającego, jest on łatwiej ewakuowany ze strefy skrawania [12].

Badania przeprowadzono na frezarce FNX 30P z bezstopniową regulacją obrotów wrzeczona z równoczesną rejestracją składowych sił skrawania przy użyciu siłomierza typu Kistler 9257B. Dane były rejestrowane przez Kartę A/C USB 6351 połączoną z systemem NI Signal Express. Podczas frezowania rejestrowana była emisja akustyczna przy wykorzystaniu trzech czujników AE o różnych charakterystykach: VS150M+AE P4; VS375; AE144A o zakresie częstotliwości (50-850kHz) i systemu Wallen 6.

Przed przetwarzaniem sygnału AE, sygnał musi być wzmocniony. W tym celu stosowane są przedwzmacniacze, które mogą być wbudowane w czujniki AE lub być dodatkowym elementem systemu. Czujniki z zewnętrznym przedwzmacniaczem są zazwyczaj mniejsze, ale potrzebują połączenia (kabel SEC) z zewnętrznym przedwzmacniaczem. Kabel SEC musi być krótki i cienki w celu minimalizacji strat transmisji danych sygnału.

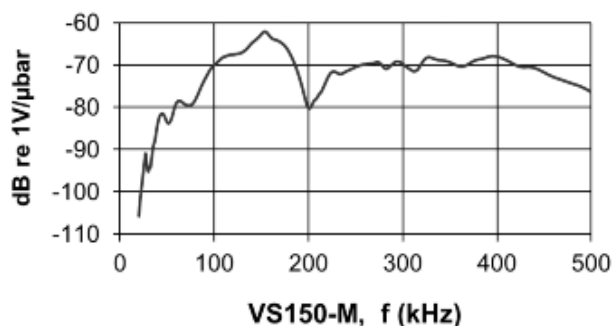
Czujniki z wbudowanym przedwzmacniaczem są zwykle większe. Ich zaletą jest kompaktowość oraz łatwość w obsłudze. Nie potrzeba dodatkowego kabla SEC podczas stosowania integralnych czujników AE oraz dodatkowego przedwzmacniacza. Mogą one być połączone do ASIP-2 przy użyciu mocnego kabla BNC.

Każdy czujnik posiada inną charakterystykę częstotliwości, która definiowana jest jako poziom sygnału wyjściowego w zakresie działania czujnika. Czujnik AE144A ma stosunkową płaską charakterystykę pomiędzy 100 a 500kHz. Krzywa częstotliwości mierzona jest kablem o długości 1m, o pojemności 90pF i pojemności wewnętrznej równej 33pF. Czujnik ten może działać w zakresie temperatury od -20 do 80°C. Na rysunku 4 przedstawiona jest krzywa częstotliwości czujnika AE144A.



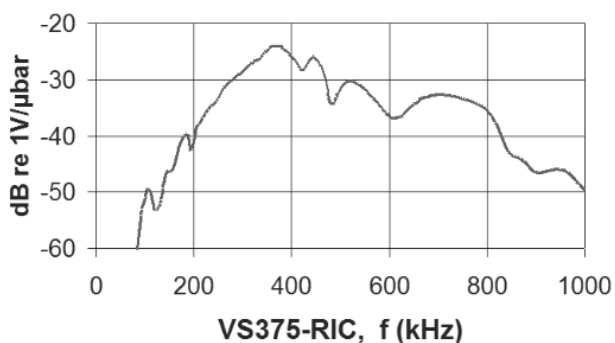
Rys. 4. Krzywa częstotliwości czujnika AE144A [6]

Kolejny czujnik- VS150M jest czujnikiem rezonansowym o szeroki przeznaczeniu. Charakteryzuje go bardzo wysoka czułość i jest odpowiedni do badania integralności metali oraz struktur kompozytowych. Zakres temperatury, w której może funkcjonować wynosi od -50 do 100°C (rys.5).



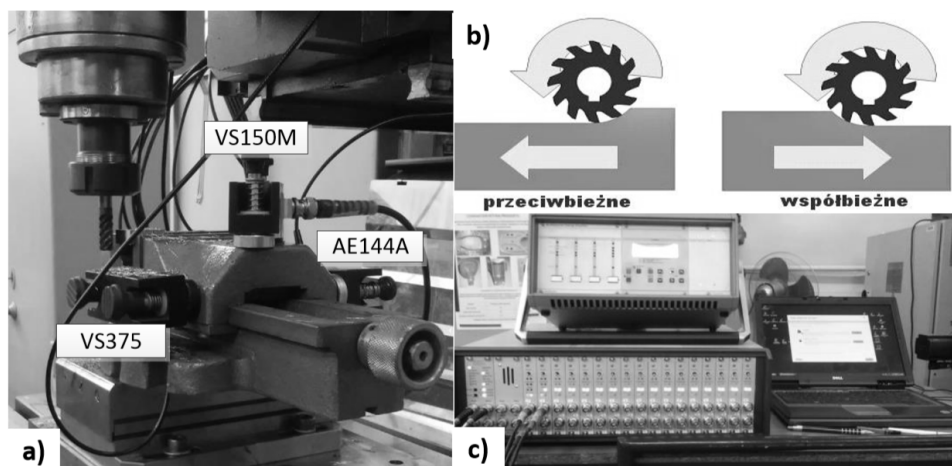
Rys. 5. Krzywa częstotliwości czujnika VS150M [6]

Ostatni czujnik jest czujnikiem z wbudowanym przedwzmacniaczem (o wzmacnieniu równym 34dB). Czujnik VS375 (rys.6) wykorzystywany jest do wykrywania źródeł AE w środowisku zaszumionym i zakres temperatury w którym może być stosowany wynosi od -40 do 85°C.



Rys. 6. Krzywa częstotliwości czujnika VS375 [6]

Czujniki AE zamontowano za pomocą obejmy magnetycznej i pasty sprzęgającej mającej na celu zmniejszenie zakłóceń. Przed przystąpieniem do badań sprawdzano sprawność czujników AE wykorzystując test łamania ołówka.



Rys.7 a) Lokalizacja czujników emisji akustycznej b) kinematyka frezowania [1] c) system pomiarowy

Próby frezowania przeprowadzono przy trzech zmiennych parametrach skrawania: prędkość skrawania, posuw oraz głębokość skrawania. Parametry dobrano zgodnie z zaleceniami producenta zastosowanych frezów czterostrzowych. Wybrano wartości: minimalne, maksymalne i pośrednie, a dodatkowe wyliczono zgodnie ze schematem realizacji programu PS/DS-P:α.

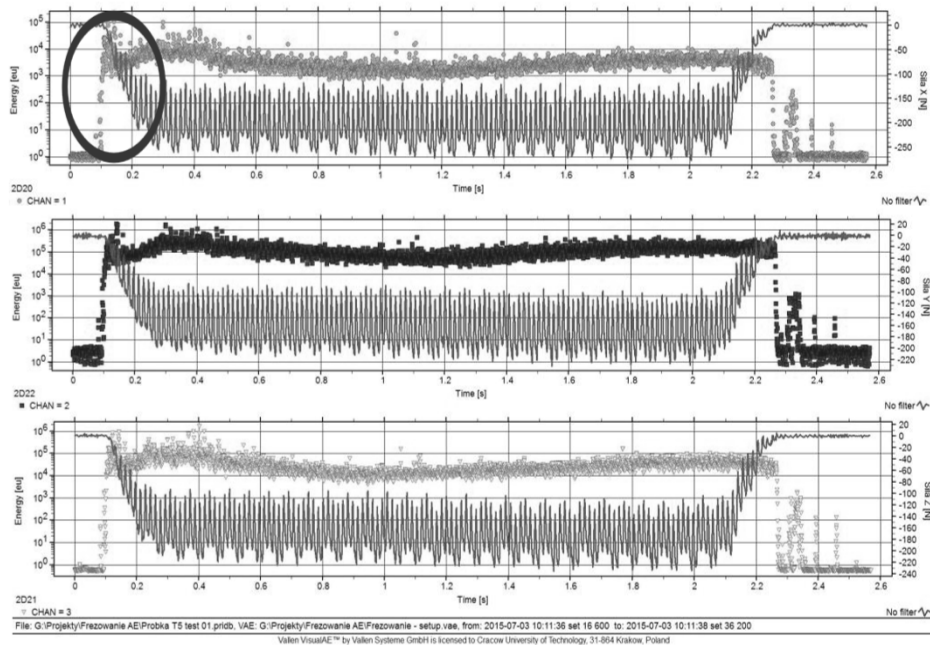
Frezowaniu poddano 15 próbek Ti6Al4V oraz 15 próbek wykonanych z Inconelu 718. W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki frezowania dwóch próbek tytanowych (oznaczonych T5 i T8). Tabela 1 przedstawia zastosowane parametry skrawania dla próbek T5 oraz T8.

Tabela 1. Zastosowane parametry skrawania

Ti6Al4V				
	v_c [mm/min]	n [obr/min]	f [mm/min]	a_p [mm]
T5	$v_c=30$	$n=955$	750	0,5
T8	$v_c=62,1$	$n=1978$	750	0,5

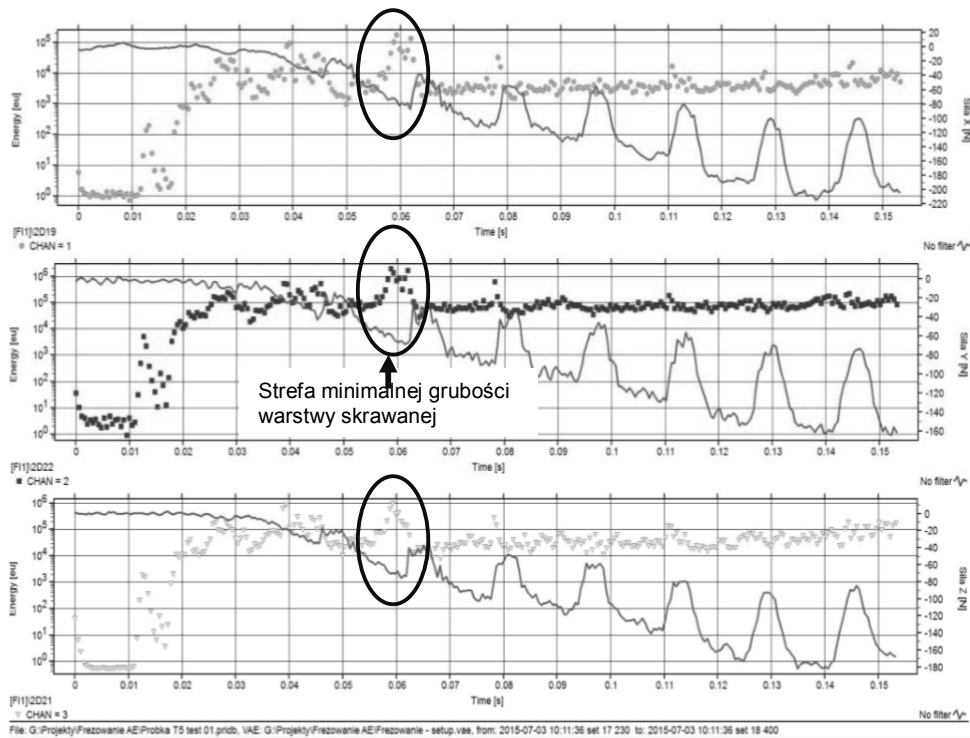
4. Wyniki badań

Z sygnału AE wydobyto główne cechy sygnału: liczbę zliczeń, amplitudę szczytową oraz energię. Na wykresach (rys.8) przedstawiono energię (eu) w zależności od czasu. Energia, jako jedna z podstawowych cech sygnału AE jest przetwarzana w dwóch trybach: w trybie rzeczywistym lub w trybie siły sygnału i podawana jest w jednostkach energii (eu). Tryb energii rzeczywistej polega na podniesieniu do kwadratu wartości cyfrowego sygnału AE i scałkowaniu wyniku podczas uderzenia (hit). Tryb siły sygnału jest obliczany po całce wartości sygnału AE podczas trwania uderzenia.



Rys. 8. Wykres energii emisji akustycznej próbki T5 otrzymany z trzech czujników AE, odpowiednio 1) czujnik VS375 RIC 2) czujnik VS150M 3) czujnik AE144A

Zarejestrowane sygnały AE pozwalają wyłowić pewne obszary charakterystyczne w trakcie skrawania: początek styku ostrza z przedmiotem obrabianym, strefę odkształceń sprężystych i plastycznych oraz stabilizację procesu. Z racji zainteresowania początkiem procesu skrawania, kolejny rys. 9 obrazuje w powiększeniu obszar skrawania zaznaczony na czerwono (na rysunku).

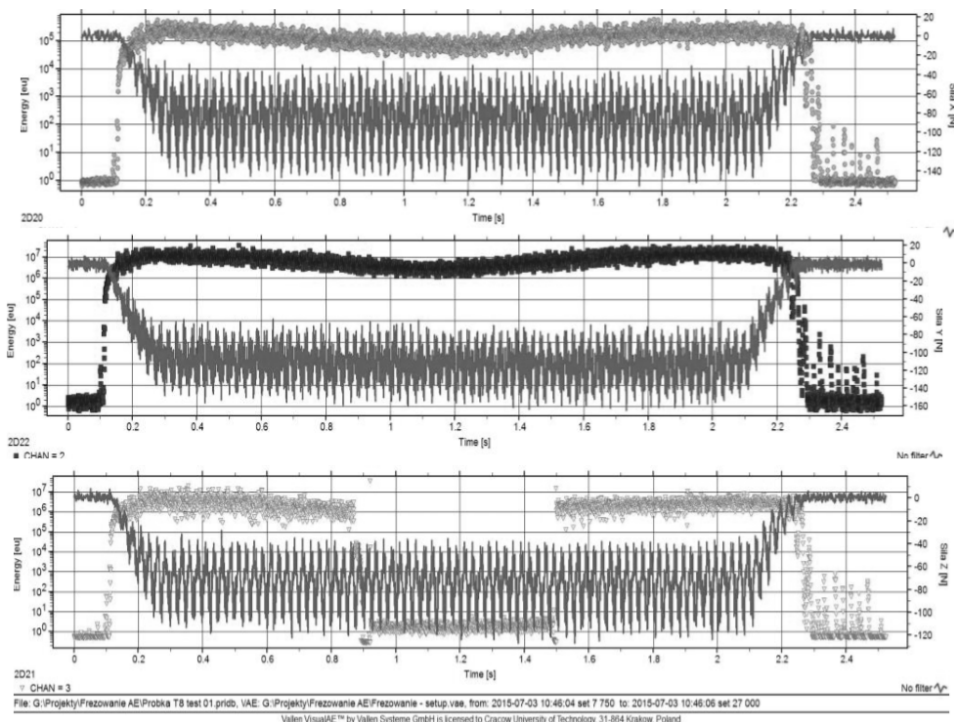


Rys. 9. Zarejestrowana energia AE dla T5, początkowy obszar skrawania

Przybliżenie początkowej strefy skrawania, potwierdza możliwość wyodrębnienia poszczególnych etapów procesu skrawania. Kolejne wykresy (rys.10) również przedstawiają zarejestrowaną wartość energii AE lecz przy innych parametrach skrawania (próbka T8).

Tak jak i w pierwszym przypadku na kolejnym rys. 11 przedstawiono początkowy obszar procesu skrawania.

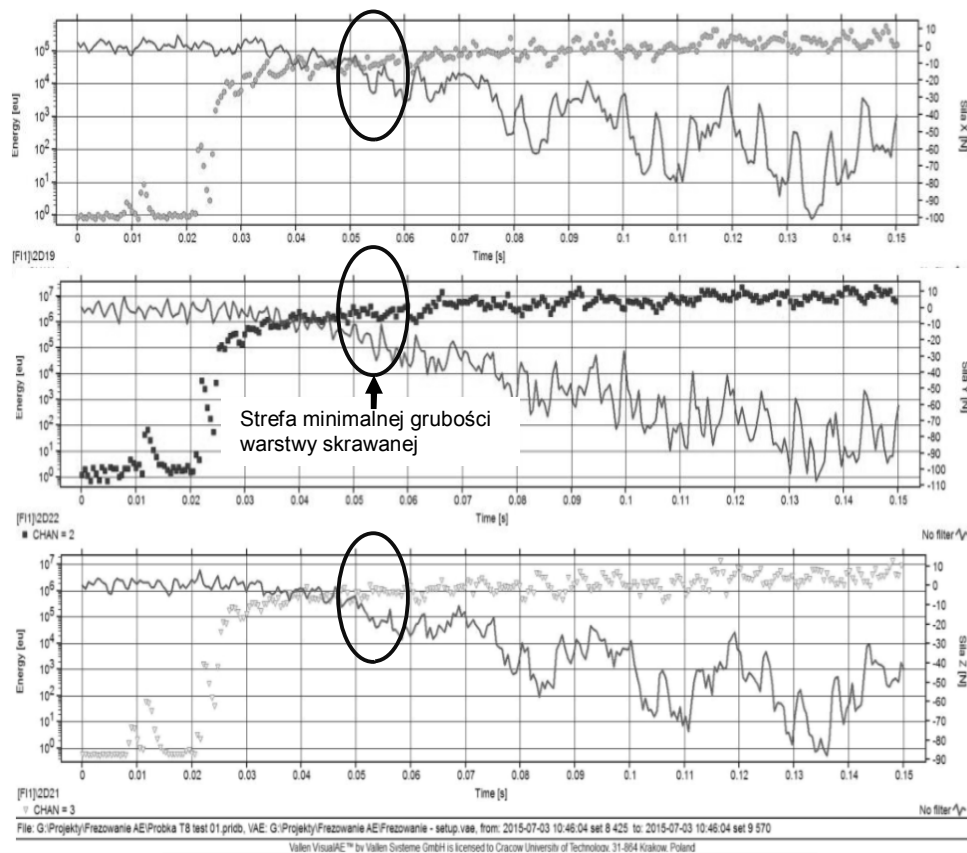
Sygnal zarejestrowany podczas frezowania próbki T8 również wskazuje charakterystyczne etapy frezowania.



Rys. 10. Energia sygnału AE dla całego procesu skrawania próbki T8

5. Wnioski

Bardzo ważnym aspektem podczas rejestracji sygnału AE jest dobór czujników AE oraz ich lokalizacja. Przed badaniami zasadniczymi konieczne jest przeprowadzenie wcześniejszych prób oraz ustalenie podstawowych charakterystyk wybranych czujników. W przypadku identyfikacji obszaru dekohezji ważne jest, aby czujniki były odpowiednio umiejscowione w pobliżu strefy skrawania. Poprawi to rejestrację sygnału AE oraz w pewnym stopniu zmniejszy możliwość błędu rejestracji (dużej ilości zakłóceń) spowodowanych wydłużoną drogą transmisji danych. Kolejnym ważnym aspektem są stosowane ciecze chłodząco smarujące. W przypadku badań opisanych w tym artykule nie były stosowane żadne ciecze smarujące w celu lepszej identyfikacji i rejestracji sygnału AE. Jednak należy pamiętać, że w warunkach przemysłowych i w przypadku produkcji wielkoseryjnej mogą być stosowane ciecze chłodząco-smarujące. Dlatego, konieczne jest przeprowadzenie badań obrazujących wpływ cieczy smarujących na rejestrowany sygnał AE oraz na funkcjonowanie czujników AE. Dużą zaletą czujników AE jest fakt, iż w odróżnieniu od innych systemów pomiarowych, czujniki mogą być nieco oddalone od strefy skrawania i podczas rejestracji on-line, nie ulegają zniszczeniu. Wyniki otrzymane z przeprowadzonych badań wykazują możliwość wykorzystania sygnału AE, jako wskaźnika początku dekohezji podczas frezowania. Widoczna jest zależność wynikająca z doboru prędkości skrawania od otrzymanych wyników. Mniejsze wartości v_c dokładniej rejestrują procesy zachodzące w warstwie skrawanej. Im większe wartości v_c tym rejestrowany sygnał jest bardziej ustabilizowany.



Rys.11 Zarejestrowana energia AE dla T8, początkowy obszar skrawania

Literatura

1. Adamczyk Z., Jemielniak K., Kosmol J., Sokołowski A.: Monitorowanie ostrza skrawającego. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1996
2. <http://highspeedmachining.eu>
3. Nowakowski Ł., Miko E.: Pomiar minimalnej grubości warstwy skrawanej dla procesu frezowania czołowego, Mechanik Nr 7, (2013)
4. Olszak W.: Obróbka skrawaniem. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2008
5. Dornfeld D., Liang S.: Tool wear detection using time series analysis of acoustic emission; J. Eng. Ind. Trans. ASME 111(3) 1989, str. 199-205
6. The Acoustic Emission Company: Acoustic emission sensors Specification. Germany, 2012
7. Vallen System GmbH: Acoustic Emission System AMSY-5, System Description, Germany 2009
8. Vallen System GmbH: AE Testing. Fundamentals- Equipment- Data Analysis (Overview), Germany 2010

9. Krajewska J.: Wybrane problem diagnostyki procesu obróbki materiałów trudnoskrawalnych, Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją w Opolu Opole 2014
10. Gawlik J., Niemeżewska-Wójcik M., Krajewska J.: Technological systems of shaping elements out of difficult-to-machine materials, Innowacje w Zarządzaniu i Inżynierii Produkcji, Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją w Opolu, Opole 2014
11. Gawlik J., Krajewska-Śpiewak J., Zębała W.: Identification of the minimal thickness of cutting layer based on the Acoustic Emission signal, 8th International Congress on Precision Machining, Novi Sad 2015
12. Colourmill: Frezy do obróbki Inox, Inconel oraz stopów tytanu- specyfikacja
13. Teti.R, Jemielniak K., O'Donnell G., Dornfeld D.: Advanced monitoring of machining operations; CIPR Annals-Manufacturing Technology 59, 2010

Prof. dr hab. inż. Józef GAWLIK
Mgr inż. Joanna KRAJEWSKA-ŚPIEWAK
Mgr inż. Marek NOWAK
Politechnika Krakowska
Wydział Mechaniczny
Instytut Technologii Maszyn i Automatyzacji Urządzeń
Al. Jana Pawła II, 31-864 Kraków
e-mail: jgawlik@mech.pk.edu.pl
jkspiewak@mech.pk.edu.pl
nowak@mech.pk.edu.pl