Rafał Kudelski, Halina Nieciąg, Krzysztof Zagórski

Badania możliwości diagnostycznych stanu procesu cięcia stali wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym

JEL: L97 DOI: 10.24136/atest.2018.440

Data zgłoszenia: 19.11.2018 Data akceptacji: 15.12.2018

W artykule przedstawiono zastosowanie pomiaru sygnału drgań głowicy tnącej do diagnostyki stanu procesu cięcia wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym. Akwizycji danych dokonano podczas cięcia próbek ze stali S355J2H w kształcie klina. Zarejestrowany sygnał poddano odpowiedniej analizie. W części podsumowującej wyciągnięto wnioski z przeprowadzonych badań.

Słowa kluczowe: WaterJet, drgania mechaniczne, analiza sygnału, diagnostyka.

Wstęp

Części i elementy zespołów środków transportu publicznego i samochodowego powinny zapewniać bezpieczeństwo użytkownika, charakteryzując się odpowiednią wytrzymałością i odpornością na warunki użytkowania. Spełnienie tych wymagań jest możliwe nie tylko przez dobór materiałów o odpowiednich właściwościach, takich jak metale i ich stopy (stal, aluminium), czy stosowane w współczesnych rozwiązaniach materiały kompozytowe i innowacyjne. Ważnym czynnikiem wpływającym na własności wyrobu jest także odpowiednio dobrana technologia obróbki materiałów. Wiele rodzajów metod kształtowania, jak np. cięcie laserem, powoduje przemiany struktury materiału, jej niejednorodność, czego konsekwencją są zmiany mechanicznych właściwości elementów.

Jedną z niekonwencjonalnych metod cięcia materiałów jest technologia obróbki wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym, stosowana w polskim przemyśle od kilkunastu lat do wycinania geometrycznie złożonych przedmiotów wykonanych z materiałów nowej generacji jak również materiałów tradycyjnych. Wysoki stopień automatyzacji procesu oraz wsparcie dedykowanego środowiska CAD/CAM z układami sterowania oferującymi realizację typowych cykli obróbkowych, oraz zastosowanie lokalnych komputerowych baz danych dla doboru parametrów cięcia, tworzy wraz z obrabiarkami skrawającymi CNC bardzo efektywne kompleksy technologiczne o wysokiej elastyczności. Główną wadą urządzeń do cięcia wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym w porównaniu z obrabiarkami skrawającymi CNC jest brak systemów monitorowania stanu procesu skrawania. Powodowane jest to trudnością pozyskania odpowiednio informatywnego sygnału diagnostycznego w warunkach przemysłowych. Podobnie do tendencji rozwojowych obserwowanych w obrabiarkach skrawających CNC, można wnioskować iż w niedalekiej przyszłości urządzenia do wysokociśnieniowej cięcia strumieniem wodnościernym będą wyposażane w dedykowane systemy diagnostyczne.

Jednym z problemów podczas cięcia wodnościernego jest zapewnienie odpowiedniej dokładności realizacji toru ruchu strumienia wodnościernego w materiale, co uzależnione jest od interakcji wysokoenergetycznego strumienia wodnościernego z przedmiotem obrabianym.

Ten szczególny rodzaj sprzężenia strumienia z przedmiotem obrabianym, którego analiza prowadzona była w wielu pracach [2-4,6], uzależniony jest od szeregu parametrów w tym ciśnienia, prędkości

posuwu, grubości materiału, rodzaju materiału (stale, materiały warstwowe, typu plaster miodu, kompozyty, minerały itp.) intensywności dodawanego strumienia ścierniwa oraz rodzaju ścierniwa, a także zużycia dyszy wodnej oraz mieszającej. W rezultacie procesu cięcia otrzymuje się wynikową powierzchnię przedmiotu obrabianego [1] charakteryzowaną chropowatością, błędami kształtu oraz wynikową dokładnością wykonania elementu.

Związane z otrzymaną powierzchnią przedmiotu wskaźniki charakteryzujące jego stan można podzielić na bezpośrednie, określone siłowym oddziaływaniem strumienia na materiał oraz wskaźniki pośrednie jak np.: kierunek, amplituda i częstotliwość drgań głowicy roboczej bądź poziom ciśnienia akustycznego towarzyszącego procesowi cięcia. Na podstawie dotychczas przeprowadzonych badań [5] można wnioskować, że z punktu widzenia użyteczności badanego sygnału uzasadnione jest wykorzystanie wskaźników pośrednich takich jak częstotliwość i amplituda drgań głowicy tnącej bądź poziom emisji akustycznej. Bezpośrednie wyniki pomiarów sił odporowych towarzyszących procesowi cięcia, pomimo ich wysokiej informatywności są trudne do realizacji w warunkach przemysłowych. W związku z tym w dalszej części pracy zostaną zaprezentowane wyniki badań drgań głowicy tnącej oraz sposoby analizy sygnału drganiowego dla pozyskania informacji o niektórych stanach przedmiotu podczas cięcia wodnościernego.

1. Metodyka badań

Badania eksperymentalne miały na celu uzyskania danych do analizy parametrów drgań głowicy tnącej jako sygnału diagnostycznego stanu procesu cięcia. Eksperyment prowadzono na maszynie do cięcia wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym firmy H.G. RIDDER Automatisierungs-GmbH model HWE-P 1520 znajdującej się w Katedrze Systemów Wytwarzania, na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Robotyki w Akademii Górniczo-Hutniczej (rys. 1).

Rys. 1. Maszyna do cięcia wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym

Badania prowadzono podczas przecinania próbek w kształcie klina (rys.2) ze stali S355J2H przy następujących parametrach:

- ciśnienie $p = 280 \text{ MPa}$,
- prędkość posuwu $v_f = 0.5 \text{ mm/s}$,
- ilość dawkanego ścierniwa $q = 6.5 \text{ g/s}$,

- średnica dyszy mieszającej $D = 1 \text{ mm}$,
- średnica dyszy wodnej $d = 0,35 \text{ mm}$,
- rodzaj ścierniwa i ziarnistość: GARNET GMA #80 mesh, z wykorzystaniem głowicy iniekcyjnej typ ALLFI IV. Ponadto procesu cięcia dokonano z dwoma zestawami dysz, pierwszy zestaw były to dysze nowe, natomiast drugi zestaw składał się z dysz, które pracowały już 125 godzin.

Rys. 2. Próbką badawczą i głowicą roboczą na stanowisku badawczym

Na podstawie uzyskanych wyników badań wstępnych określono wymagania dotyczące szerokości pasma przenoszenia oraz amplitudy drgań, a także uzyskano potwierdzenie, że dominującym pod względem informatywności jest sygnał drganiowy uzyskany z akcelerometru mierzącego drgania w osi z. Docelowy tor pomiarowy złożony został z następujących elementów (rys. 3) :

1. Karta pomiarowa NI 9215.
2. Obudowa NI CDAQ-9171.
3. Wzmacniacz sygnału M352A60 PCB do czujników typu ICP.
4. Czujnik przyspieszeń M352A60 firmy PCB PIEZOELECTRONIC.

Rys. 3. Schemat układu pomiarowego.

Ważnym elementem systemu pomiarowego, oprócz zestawienia i konfiguracji toru pomiarowego dla prowadzonych badań, był wybór odpowiedniego oprogramowania do akwizycji i analizy sygnałów diagnostycznych. Z tych względów w analizie danych eksperymentalnych wykorzystano oprogramowanie LabView 2015 firmy National In-

struments, zapewniające współpracę z torem pomiarowym oraz łatwość konfiguracji modułu akwizycji danych. Zarejestrowany sygnał drganiowy w osi Z poddawano analizie [7]:

1. Czasowo-amplitudowej, umożliwiającej prezentację sygnału w czasie.
2. Czasowo-częstotliwościowej, dokonanej w oparciu o algorytm STFT (Short-time Fourier Transform), umożliwiającej pozyskanie informacji o częstotliwości i amplitudzie składowych tworzących sygnał oraz momentach czasu odpowiadających poszczególnym wartościom amplitud i częstotliwości składowych.

2. Wyniki Badań

W prowadzonych badaniach sygnał przyspieszeń drgań głowicy tnącej rejestrowano w osi Z a następnie zapisywano do pliku w celu jego późniejszej analizy. Zależność sygnału amplitudy przyspieszeń drgań głowicy tnącej od czasu wraz z widmem czasowo-częstotliwościowym podczas cięcia próbki w kształcie klina z zestawem dysz, które przepracowały 125 godzin zaprezentowano na rys.6, natomiast podczas cięcia próbki z nowym zestawem dysz na rys.5.

W trakcie realizacji badań zwrócono szczególną uwagę na specyficzne zachowanie się wysokociśnieniowego strumienia wodno-ściernego przy wyjściu z materiału (rys. 4).

Rys. 4. Szczelina cięcia przy wyjściu wysokociśnieniowego strumienia wodno-ściernego z materiału

Na podstawie obserwacji geometrycznych cech szczeliny cięcia (rys. 4.), można wyróżnić trzy stany szczeliny odpowiadające:

1. cięciu jakościowemu – z zachowaniem cech prostoliniowości szczeliny cięcia, które uzyskuje się od najmniejszych głębokości cięcia H , aż do głębokości krytycznej, gdzie pojawiają się pierwsze obserwowalne nieregularności szczeliny,
2. rozdzielaniu materiału – z wyraźnymi nieregularnościami przechodzącymi wraz ze wzrostem głębokości cięcia H w pola nie w pełni przeciętego materiału,
3. niedocięciu materiału – będące zbiorem pól nie w pełni przeciętego materiału, zakończonych całkowicie nieprzeciętym materiałem.

Przejęcie szczeliny ze stanu rozdzielania materiału do stanu niedocięcia materiału zostało uwidocznione w zarejestrowanym sygnale drgań głowicy tnącej.

Rys. 5. Zależność sygnału amplitudy przyspieszeń drgań głowicy tnącej od czasu wraz z widmem czasowo-częstotliwościowym w zakresie częstotliwości 0-50 kHz, ciśnienie wody $p = 280$ MPa, posuw $v_f = 0,5$ mm/s, wydatek ścierniwa $q = 6,5$ g/s, materiał stal S355J2H, ścierniwo GARNET #80, dysza wodna $d_w = 0,35$ mm, dysza mieszająca $d_o = 1$ mm, nowy zestaw dysz

Rys. 6. Zależność sygnału amplitudy przyspieszeń drgań głowicy tnącej od czasu wraz z widmem czasowo-częstotliwościowym w zakresie częstotliwości 0-50 kHz, ciśnienie wody $p = 280$ MPa, posuw $v_f = 0,5$ mm/s, wydatek ścierniwa $q = 6,5$ g/s, materiał stal S355J2H, ścierniwo GARNET #80, dysza wodna $d_w = 0,35$ mm, dysza mieszająca $d_o = 1$ mm, czas pracy dyszy 125 h

Podsumowanie

Analiza wyników badań wskazuje na możliwość wykorzystania sygnału amplitudy przyspieszeń drgań głowicy tnącej w kierunku osi Z przy zakresie częstotliwości od 5kHz do 50kHz do diagnostyki szczególnych stanów procesu cięcia wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym, jakimi są niedocięcia materiału.

Przeprowadzone badania dają podstawę do stwierdzenia, że w stanach procesu odpowiadających niedocięciom materiału, amplituda przyspieszeń drgań głowicy tnącej osiąga wielkość rzędu 150 m/s² w przypadku nowego zestawu dysz (przy maksymalnej wysokości cięcia 66,73 mm, rys.5), natomiast podczas cięcia zestawem dysz, który przepracował 125 godzin, amplituda przyspieszeń drgań głowicy tnącej osiąga wielkość rzędu 200 m/s² (przy maksymalnej wysokości cięcia 59,89 mm, rys.6).

Podczas stabilnego procesu cięcia, odpowiadającemu cięciu jakościowemu oraz rozdzielaniu materiału amplituda drgań przyspieszeń głowicy tnącej osiąga wielkość rzędu ok. 50 m/s².

Dla uzyskania niezbędnej wiedzy dotyczącej możliwości diagnostycznych, w dalszych badaniach należy zmierzać do zwiększenia zakresu prędkości posuwowych, przy różnym ciśnieniu strumienia wody i różnej ilości dozowanego ścierniwa. Istotny wpływ na rejestrowany sygnał może mieć także rodzaj ciętego materiału, co w kolejnych badaniach zostanie uwzględnione.

Bibliografia:

1. Borkowski J., Sutowska M.: The quality of surface shaped by abrasive-waterjet. Unconventional and Hydrojetting Technologies. ISSN 0239-7129. Koszalin 2009, str.259-272.
2. Momber A., Kovacevic R.: Principles of Abrasive Water Jet Machining. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 1997.
3. Momber A., Kovacevic R.: Calculation of Exit Jet Energy in Abrasive Water Jet Cutting. PED-Vol.68-1, Manufacturing Science and Engineering. Volume 1. ASME 1994.
4. Sutowska M: Wpływ warunków procesu cięcia wysokociśnieniową strugą wodno-ścierną na kształt śladów obróbkowych. AT-MiA Nr4/31 2011.
5. Wantuch E., Kot R., Kudelski R.: Badania wstępne możliwości diagnostycznych stanu procesu przy cięciu wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym na podstawie cech widma częstotliwościowo-amplitudowego drgań zespołu głowicy tnącej. XXXIII Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej. Łódź 2010, str.479-488
6. Wantuch E., Kot R.: Problem dokładności odwzorowania toru krzywoliniowego przy obróbce wysokociśnieniowym strumieniem wodnościernym. XXVI Naukowa Szkoła Obróbki Ściernej. Łódź 2003, str.329-337.
7. Zieliński T., Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2005.

Investigation of diagnostic possibilities of the state cutting process of steel with high-pressure abrasive water jet

The article presents the application of vibration measurement of the cutting head for the diagnostics of the state of the cutting process with high-pressure water jet. Data acquisition was performed when cutting wedge-shaped samples of S355J2H steel. The recorded signal was analyzed appropriately. In the summary part, conclusions from the research were drawn.

Keywords: WaterJet Cutting, mechanical vibrations, signal analysis, diagnostic.

Autorzy:

dr inż. **Rafał Kudelski** – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, WIMiR, kudelski@agh.edu.pl.

dr inż. **Halina Nieciąg** – AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, WIMiR, hnieciag@agh.edu.pl.

dr inż. **Krzysztof Zagórski** - AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, WIMiR, zagkrzys@agh.edu.pl.