

Marcin PŁODZIEN, Robert BABIARZ, Damian MAZUR, Łukasz ŻYLKA
POLITECHNIKA RZESZOWSKA,
Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

Sterowanie adaptacyjne procesem frezowania HPC

Mgr inż. Marcin PŁODZIEN

Absolwent Wydziału Budowy Maszyn i Lotnictwa Politechniki Rzeszowskiej. Pracę dyplomową "Dobór frezów do wysokowydajnej obróbki stopów aluminium" obronił w 2010 r. Asystent w Katedrze Techniki Wytwarzania i Automatyzacji. Zajmuje się problematyką dotyczącą systemów CAD/CAM i obróbki ubytkowej.



e-mail: plodzien@prz.edu.pl

Dr inż. Robert BABIARZ

Adiunkt w Katedrze Techniki Wytwarzania i Automatyzacji Politechniki Rzeszowskiej. Zajmuje się diagnostyką i sterowaniem procesami skrawania i obróbki ścierniej oraz automatyzacją produkcji.



e-mail: robertb@prz.edu.pl

Dr inż. Damian MAZUR

Dr inż. Damian Mazur pracuje w Zakładzie Podstaw Elektrotechniki i Informatyki Politechnik Rzeszowskiej na stanowisku adiunkta. W pracy dydaktycznej zajmuje się diagnostyką urządzeń elektromechanicznych (obliczeniami i pomiarami maszyn elektrycznych), metodami numerycznymi (metodą elementów skończonych, brzegowych), programowaniem obrotowym i bazami danych.



e-mail: mazur@prz.edu.pl

Dr inż. Łukasz ŻYLKA

Adiunkt w Katedrze Techniki Wytwarzania i Automatyzacji Politechniki Rzeszowskiej. W pracy naukowo dydaktycznej zajmuje się programowaniem maszyn CNC, podstawami obróbki skrawaniem oraz ścierniej, doбором narzędzi obróbkowych i oprzyrządowania oraz diagnostyką procesów wytwarzania.



e-mail: zylkaprz.edu.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono podział oraz ogólną charakterystykę najczęściej stosowanych w obrabiarkach CNC systemów sterowania adaptacyjnego. Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych procesu wysokowydajnego frezowania stopów aluminium określono stopień skrócenia czasu obróbki spowodowany zastosowaniem wybranego układu sterowania adaptacyjnego.

Słowa kluczowe: frezowanie, nadzorowanie, regulacja adaptacyjna.

Adaptive control of the HPC milling process

Abstract

This paper presents an overview of the division of the most widely used adaptive control systems. Figure 1 shows an example of adaptive control off-line, and in Section 2 of the paper there is described the on-line adaptive control system as an example of Marpos ARTIS. In Section 3 the high-performance milling (HPC) of aluminum alloys is discussed. In the machining center HSC 55 Linear with implemented module ARTIS there were performed experimental investigations of the machining process with and without adaptive control. The experimental setup is shown in Figure 4. The experiment was carried out for two nominal values of feed per minute $f_c=1\text{m/min}$ and 2m/min . Other machining parameters were as follows: depth of cut $a_p=5\text{ mm}$, spindle speed $n=9000\text{ r/min}$ and cutting speed $v_c=350\text{ m/min}$. The milling process was realized by using a carbide end mill. The results are shown in Figures 5 and 6. Based on the obtained results it was found that the milling process has a significant impact on shortening the manufacturing process. The use of adaptive control allowed for reduction of the processing time by 15 - 24%.

Keywords: milling, monitoring, adaptive control.

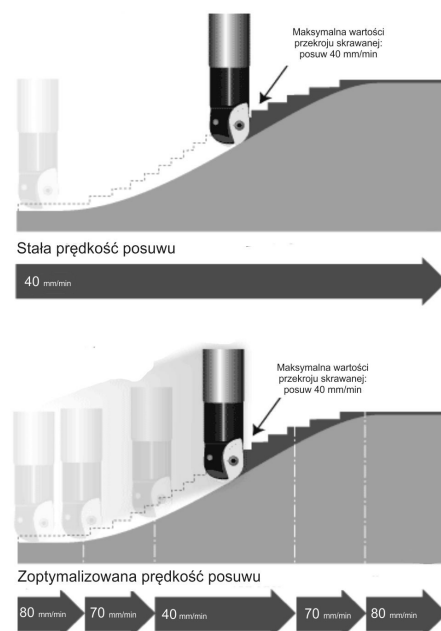
1. Wstęp

Wykorzystanie systemów sterowania adaptacyjnego i monitorowania stanu narzędzia w procesie wytwarzania wyrobów w produkcji wielkoseryjnej odgrywa duże znaczenie w światowej produkcji. Zazwyczaj obrabiarki CNC nie posiadają możliwości dopasowania parametrów skrawania do zmian warunków obróbki związanych z takimi zakłóceniami procesu jak np. tępienie narzędzia czy zmiany skrawalności materiału obrabianego. Dopiero dodatkowe systemy nadzorowania i adaptacji pozwalają rozwiązać

ten problem. Ich praca polega na monitorowaniu aktualnych warunków obróbki i automatycznym regulowaniu posuwu do największej możliwej wartości definiowanej dla każdej operacji obróbkowej, a jeżeli jest to konieczne zatrzymania go w przypadku wystąpienia przeciążenia lub uszkodzenia narzędzia [1, 2].

Systemy adaptacji i monitorowania wykorzystywane obecnie w obróbce ubytkowej charakteryzują następujące właściwości [3]:

- możliwość regulacji posuwu w czasie rzeczywistym,
- diagnozowanie stanu narzędzia i wrzeciona,
- nadzorowanie osi sterowanych obrabiarki.



Rys 1. Przykład optymalizacji posuwu w trybie OFF-LINE
Fig. 1. Example of OFF-LINE feed adaptation

Ze względu na tryb pracy możemy je podzielić na dwie podstawowe grupy. Pierwsza z nich to grupa systemów OFF-LINE, do której zaliczamy m.in. oprogramowanie PRODUCTION MODULE

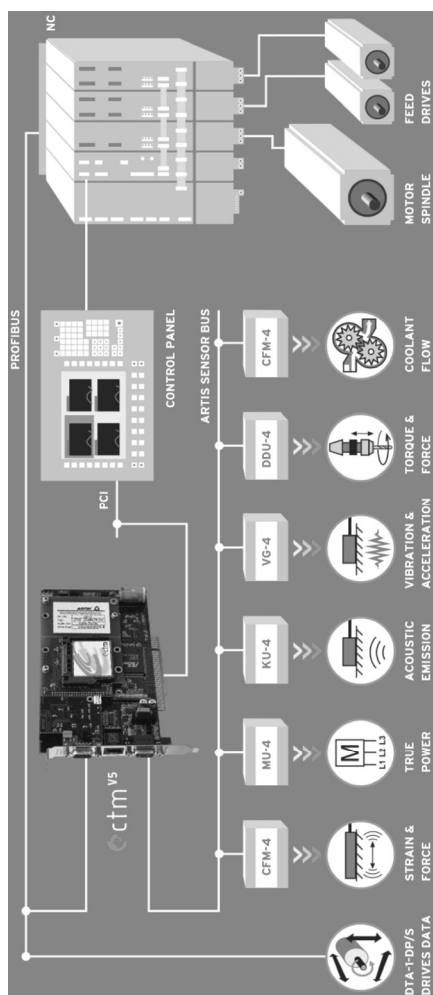
firmy Third Wave oraz VERICUT z modułem OPTIPATH firmy CGTech. Ich sposób działania jest bardzo podobny. Na podstawie programu obróbkowego wygenerowanego z zewnętrznego systemu CAM, działającego ze stałą wartością posuwu minutowego f_t , system przeprowadza w pierwszej kolejności symulację obróbki a następnie koryguje program źródłowy zmieniając wartości posuwu, uwzględniając zmienny przekrój warstwy skrawanej (rys. 1).

Druga grupa systemów realizuje swoje zadania w trybie ON-LINE. Systemy te są zaimplementowane bezpośrednio w układzie sterowania obrabiarki w postaci dodatkowego modułu elektronicznego lub modułu oprogramowania. Przykładem takich rozwiązań są systemy ARTIS firmy Marposs oraz OMATIVE firmy Omative Systems.

2. Sterowanie adaptacyjne procesu skrawania

W wyposażeniu Katedry Technik Wytwarzania i Automatykacji znajduje się centrum obróbkowe HSC 55 Linear firmy DMG z zaimplementowanym modułem ARTIS.

Część sprzętowa układu jest to karta komputerowa na złączu PCI zamontowana w komputerze przemysłowym obrabiarki. Komunikacja pomiędzy kartą, a modułami obrabiarki odbywa się przy użyciu magistrali ProfiBus. Rys. 2 przedstawia przykładową strukturę możliwą do zaimplementowania w obrabiarence.



Rys. 2. Struktura systemu ARTIS
Fig. 2. Structure of ARTIS system

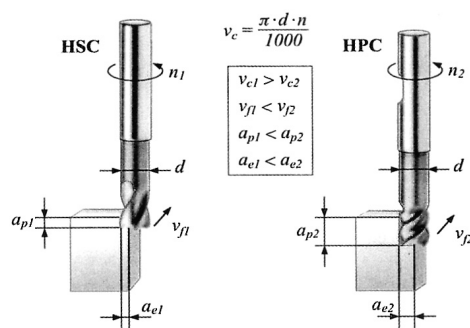
Jak wynika z schematu przedstawionego na powyższym rysunku posiada ona duże możliwości dotyczące integracji z układem sterowania obrabiarki różnego rodzaju czujników procesu, umożliwiając jego wielokryterialną ocenę.

Oprogramowanie układu ARTIS umożliwia realizację sterowania adaptacyjnego z posuwem minutowym f_t w zakresie od 80 do 150% posuwu nominalnego. Wartość posuwu podczas procesu uzależniona jest od wartości obciążenia wrzeciona oraz przyjętych przez operatora wartości granicznych. Dodatkowo, oprócz sterowania adaptacyjnego możliwe jest monitorowanie procesu i zapobieganie np. nadmiernemu zużyciu czy uszkodzeniu narzędzia czy też przeciążeniu napędów osi sterowanych oraz wrzeciona głównego [4].

Sterowanie adaptacyjne realizowane jest dla konkretnego przydadku: narzędzie, materiał, program obróbkowy. Dlatego też, w celu zaimplementowania sterowania potrzebne jest wykonanie przynajmniej dwóch próbnych przedmiotów. Podczas ich obróbki zostają wyznaczone czasy obróbki oraz przeprowadzone skalowanie wartości obciążenia napędów obrabiarki dla przyjętych parametrów skrawania. W pierwszej kolejności system Artis automatycznie skaluje poziom obciążenia układów napędowych wynikający z parametrów procesu skrawania. Następnie wyznacza krzywą obciążenia dla realizowanego zadania obróbkowego (tzw. krzywa nominalna obciążenia). Dopiero podczas obróbki kolejnego przedmiotu układ realizuje funkcję adaptacji regulując wartości posuwu tak, aby maksymalnie skrócić czas obróbki, ale jednocześnie nie przekroczyć wartości granicznych [4].

3. Obróbka wysokowydajna stopów Al

W praktyce przemysłowej stosowane są najczęściej dwie metody kształtowania ubytkowego stopów aluminium. Pierwsza polega na usuwaniu materiału z dużymi prędkościami skrawania HSC (High Speed Cutting), która charakteryzuje się dużymi wartościami prędkości skrawania v_c nawet 5 ÷ 10 krotnie większymi niż podczas frezowania konwencjonalnego, dużą prędkością posuwu v_f oraz małym dosuwem osiowym a_p . Obróbkę z dużymi prędkościami skrawania stosuje się w obróbce kształtującej i wykończeniowej (rys. 3).



Rys. 3. Porównanie parametrów obróbki HPC i HSC [5]
Fig. 3. Comparison of HPC and HSC machining parameters

Drugim sposobem kształtowania stopów aluminium jest obróbka wysokowydajna HPC (High Performance Cutting), będąca rozwinięciem obróbki HSC. Charakterystyczną cechą tego procesu jest stosowanie 2 ÷ 5 krotnie większych prędkości skrawania v_c niż w przypadku obróbki konwencjonalnej oraz maksymalnych wartości posuwu na ostrze f_z , dosuwu promieniowego a_e i osiowego a_p (rys. 3). Zazwyczaj wartości dosuwu osiowego przyjmuje się na poziomie $a_p = (1 \div 1.5) \cdot d$, a dosuwu promieniowego $a_e = (0.7 \div 1) \cdot d$. Frezowanie wysokowydajne dzięki zwiększonym wartościom dosuwu i posuwu znacząco poprawia produktywność, jednakże kosztem pogorszenia jakości uzyskanej powierzchni. Z uwagi na to frezowanie HPC jest procesem stosowanym zazwyczaj w obróbce zgrubnej i kształtującej. Zastosowanie dużego przekroju warstwy skrawanej powoduje w efekcie utworzenie powierzchni schodkowej. Jej niekorzystną cechą jest zmienny naddatek na operacje wykończeniowe wyrobu i związane z tym zmienne obciążenie narzędzia podczas operacji wykończeniowych. Dlatego szczególnie w takich przypadkach zasadne jest stosowanie systemów adaptacyjnych [5].

4. Badania doświadczalne

Celem badań doświadczalnych było sprawdzenie funkcjonalności stosowania sterowania adaptacyjnego podczas obróbki wysokowydajnej HPC stopów aluminium. Stanowisko badawcze zostało opracowane na bazie obrabiarki sterowanej numerycznie HSC 55 Linear firmy DMG, na której zamocowano próbkę badawczą wykonaną ze stopu aluminium 6061. Stanowisko oraz przedmiot obrabiany przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Stanowisko badawcze: 1- komputer multimedialny, 2- wzmacniacz ładunku, 3- 24-bit przetwornik A/C, 4- trzy składnikowy siłomierz piezoelektryczny, 5- badana próbka, 6- frez, 7- pulpit sterownika CNC z systemem Artis
Fig. 4. Experimental setup: 1- multimedia computer, 2- charge amplifier, 3- 24-bit A/D converter, 4- three-component piezoelectric dynamometer, 5- test sample, 6- mill cutter, 7- desktop of CNC controller with ARTIS system

Wykorzystując uprzednio przygotowany przedmiot testowy, którego kształt opowiada typowym elementem obrabianym w przemyśle lotniczym przeprowadzono próby doświadczalne frezowania wysokowydajnego HPC odpowiednio z załączonym i wyłączonym modulem sterowania adaptacyjnego. Próbę przeprowadzono dla dwóch nominalnych wartości posuwów minutowych $f_i=1\text{m/min}$ oraz 2m/min . Pozostałe parametry obróbkowe były następujące: głębokość skrawania $a_p=5\text{mm}$, prędkość obrotowa wrzeciona $n=9000\text{ obr/min}$, prędkość skrawania $v_c=350\text{m/min}$.

Frezowanie realizowano narzędziem pełnowęglkowym firmy Sandvik Coromant o średnicy 12mm i liczbie ostrzy $z=3$.

Składowe siły frezowania rejestrowano za pomocą trzyskładkowego siłomierza piezoelektrycznego firmy Kistler natomiast przebieg czasowy sygnału obciążenia napędu głównego (wrzeciona) rejestrowano za pomocą systemu ARTIS.

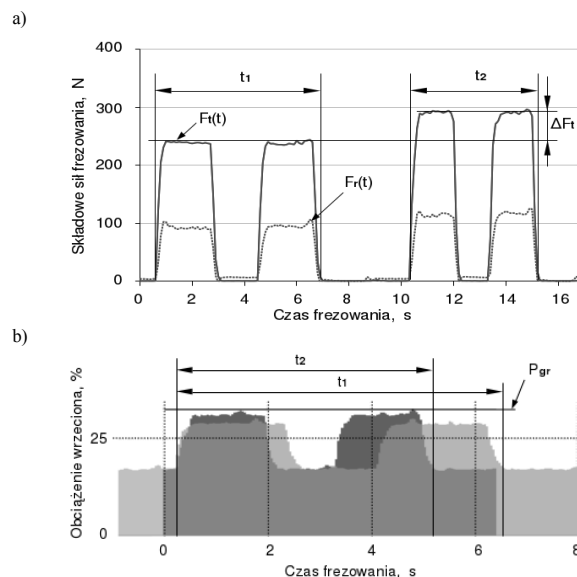
5. Analiza wyników badań

Na rys. 4 i 5 przedstawiono przebiegi wybranych wartości procesu zarejestrowanych podczas przeprowadzonych prób frezowania. Układ adaptacyjny ARTIS rejestrował wartości obciążenia wrzeciona występujące w danym cyklu obróbkowym, a w kolejnych cyklach obróbkowych na podstawie uprzednio wyznaczonych wartości zmieniał wartość posuwu w zakresie 80%-150% wartości nominalnej. W konsekwencji uzyskano istotne skrócenie czasu obróbki.

Czas obróbki z wyłączonym układem adaptacyjnym t_1 jest zawsze większy od czasu obróbki z załączonym układem t_2 .

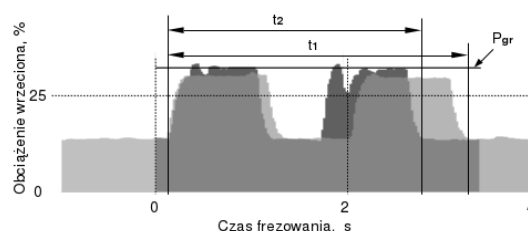
Dla przedstawionego przypadku czas obróbki przedmiotu testowego z załączonym układem adaptacji dla posuwu nominalnego o wartości 1m/min (t_1), został zredukowany o 24% (rys. 5).

Dla próby z posuwem nominalnym $f_i=2\text{m/min}$ skrócenie czasu obróbkowego (t_1) było mniejsze i osiągnęło wartość ok. 15% (rys. 6). Wynikało to z faktu, iż podczas pracy z wyższymi wartościami posuwu wartości obciążenia wrzeciona osiągały wartości przyjęte już jako graniczne dla wybranego typu narzędzia (P_{gr}). Dla takiego przypadku układ adaptacyjny ograniczał wartość posuwu do wartości bezpiecznej (rys. 6) zapobiegając możliwości katastroficznego uszkodzenia ostrzy frezu, ale jednocześnie wydłużając czas trwania procesu.



Rys. 5. Przebiegi wartości: a) składowych sił frezowania: F_t – siła styczna, F_r – siła promieniowa, b) obciążenia wrzeciona dla wartości posuwu nominalnego $f_i=1\text{m/min}$

Fig. 5. Experimental results: a) cutting force value: F_t – tangential force, F_r – radial force, b) spindle load with nominal feed value $f_i=1\text{m/min}$



Rys. 6. Przebieg obciążenia wrzeciona dla posuwu nominalnego o wartości $f_i=2\text{m/min}$

Fig. 6. Spindle load with nominal feed value $f_i=2\text{m/min}$

6. Podsumowanie

W powszechnym dążeniu do zwiększenia efektywności obróbki, przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiego bezpieczeństwa prowadzenia procesu układy adaptacyjne stosowane w obróbce skrawaniem stanowią ważny czynnik pozwalający z jednej strony maksymalnie wykorzystać czas pracy obrabiarki a z drugiej, dzięki nadzorowaniu warunków pracy narzędzia zapobiec jego niekontrolowanemu zużyciu. Uzyskane wyniki przeprowadzonych badań świadczą o potrzebie dalszego rozwijania tego typu rozwiązań pozwalających nie tylko poprawić efektywność obróbki, ale również znacząco zwiększyć bezpieczeństwo procesu skrawania.

7. Literatura

- [1] Budak E.: Improving Productivity and Part Quality in Milling of titanium Based Impellers by Chatter Suppression and Force Control. Manufacturing Engineering Development, Pratt and Whitney Canada. January 5, 2000.
- [2] Erdim H., Lazoglu I., Ozturk B.: A solid model-based off-line adaptive controller for feed rate scheduling for milling process. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 747–757.
- [3] Klopuyan J., Lee Y.S.: Material engagement analysis of different endmills for adaptive feedrate control in milling processes. International Journal of Machine Tools & Manufacture 46 (2006) 747–757.
- [4] Dokumentacja techniczna do systemu ARTIS.
- [5] Oczko K. E.: Obróbka wysokowydajna - (HPC). Mechanik11/ 2004, s. 701-709.