

Optymalizacja wielokryterialna procesu toczenia tytanu

Multi-criterion optimization of the titanium turning

JÓZEF ZAWORA
MIECZYŚLAW MARCINIAK
LUCJAN DĄBROWSKI *

DOI: 10.17814/mechanik.2016.10.396

Przedstawiono budowę doświadczalnego modelu matematycznego procesu toczenia tytanu WT3-1, optymalizację jedno i wielokryterialną wybranych cech procesu. Zacytowano wybrane pozycje literatury, w których m.in. wskazuje się na podstawowe właściwości tytanu i jego stopów oraz charakterystykę ich obróbki.

SŁOWA KLUCZOWE: tytan, optymalizacja wielokryterialna, model matematyczny, optymalne parametry

This article presents the experiment-based mathematical model for turning of the WT3-1 titanium, single- and multi-criterion optimization of the selected process features. The references have been cited; they include indications as to the basic properties of titanium.

KEYWORDS: titanium, multi-criterion optimization, mathematical model, optimum parameters

Tytan i jego stopy stosuje się w przemyśle: lotniczym, kosmicznym, okrętowym, chemicznym oraz w medycynie. Materiały te należą do materiałów trudnoobrabialnych z uwagi na ich cechy [1, 2, 3, 4].

Badania doświadczalne

Doświadczenia wykonano według planowanego eksperymentu [5]. Zastosowano pięciopoziomowy plan dla trzech zmiennych niezależnych i 20 doświadczeń. Przyjęto zmienne niezależne: v_c , f , a_p w następujących zakresach:

- $v_c \in \langle 10,0 - 40,0 \rangle$ m/min – prędkość skrawania,
- $f \in \langle 0,05 - 0,3 \rangle$ mm/obr – posuw,
- $a_p \in \langle 1,0 - 2,5 \rangle$ mm – głębokość skrawania.

Badano następujące wielkości wyjściowe procesu: T [min] – trwałość ostrza, Rz [μ m] – parametr chropowatości wg DIN, F_c [N] – siłę skrawania, F_f [N] – siłę posuwową, F_n [N] – siłę normalną, k_c [N/mm²] siłę właściwą skrawania, P_c [kW] – moc skrawania, Q_v [mm³/s] – wydajność. Badania wykonano na próbkach z tytanu WT3-1 o średnicy $\varphi = 80$ mm i długości $L = 450$ mm. Własności mechaniczne tytanu wg atestu; wytrzymałość na rozciąganie $R_m = 1100$ MPa, wydłużenie $A_5 = 13\%$, twardość 350 HB.

Badania wykonano na tokarce uniwersalnej, użyto oprawki hR171.26-2525.1 z wkładkami typu TNMG160308 z węgla wolframu H20 o promieniu zaokrąglenia głównej krawędzi skrawającej $r_n = 0,02$ mm. Kryterium stępienia $VB = 0,3$ mm. Zużycie ostrza VB mierzono na mikroskopie firmy Zeiss. Parametr Rz mierzono metodą przekroju świetlnego. Składowe siły skrawania mierzono siłomierzem tensometrycznym, dokładny czas t stoperem. Wykonano pomiary zużycia ostrza VB i parametru chropowatości Rz w czasie t . Następnie wykonano pomiary składowych sił skrawania w czasie t w centralnym punkcie planu eksperymentu oraz pomiary składowych sił skrawania dla

warunków obróbki określonych w pozostałych punktach planu eksperymentu przy określonych wartościach zużycia ostrza.

Model matematyczny procesu toczenia tytanu WT3-1

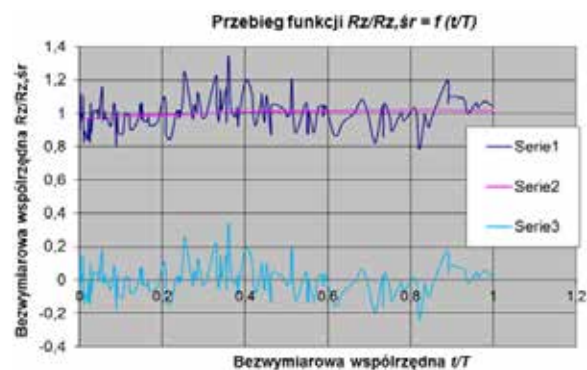
Doświadczalny model matematyczny procesu toczenia tytanu zbudowano, wykorzystując standardowe programy: regresji wielomianowej oraz krokowej regresji wielokrotnej. Za pomocą regresji wielomianowej opracowano krzywą zużycia ostrza VB i bezwymiarowe charakterystyki zmiany parametru chropowatości Rz/Rz_{sr} oraz składowych sił skrawania; $F_c/F_{c,sr}$, $F_f/F_{f,sr}$, $F_n/F_{n,sr}$ w funkcji bezwymiarowej współrzędnej t/T . Charakterystyki te pozwalają na uwzględnienie zmian wielkości wyjściowych w czasie okresu trwałości ostrza T we wszystkich doświadczeniach planu eksperymentu. Ogólną postać tych zależności wyraża wzór 1.

$$\hat{y}_i = a_0 + \sum_{j=1}^r a_j \left(\frac{t}{T} \right)^j \quad (1)$$

gdzie: \hat{y}_i – ogólne oznaczenie wielkości wyjściowych; i – wskaźnik zmiennej y , ($i = VB, Rz/Rz_{sr}, F_c/F_{c,sr}, F_f/F_{f,sr}, F_n/F_{n,sr}$); a_0 – stała; a_j – współczynniki wielomianu (regresji); t – czas obróbki odpowiadający wartości y_i ; T – trwałość ostrza w danym doświadczeniu; j – wskaźnik stopnia wielomianu ($j = 1, 2, \dots, r$).

Dla przykładu podano zależność (wzór 2) i przebieg charakterystyki zmiany $Rz/Rz_{sr} = f(t/T)$, rys. 1. Wartości średnie są wartościami średnimi z okresu trwałości ostrza w danym doświadczeniu. Funkcja jest opracowana na podstawie danych ze wszystkich doświadczeń po uporządkowaniu danych względem bezwymiarowej współrzędnej t/T .

$$\frac{R_z}{R_{z, sr}} = 0,969 + 9,12 \frac{t}{T} - 0,071 \left(\frac{t}{T} \right)^2 \quad (2)$$



Rys. 1. Zmiana wartości Rz/Rz_{sr} w funkcji stosunku czasu obróbki do trwałości t/T , gdzie: Serie 1 – wartości rzeczywiste z pomiarów, Serie 2 – model statystyczny, Serie 3 – reszty regresyjne

Funkcje regresji wielu zmiennych opracowane programem krokowej regresji wielokrotnej (firmy IBM) reprezentujące wielkości wyjściowe procesu:

* Dr hab. inż. Józef Zawora, dr hab. inż. Mieczysław Marciniak, dr hab. inż. Lucjan Dąbrowski (ld@meil.pw.edu.pl) – Politechnika Warszawska

$$\ln(T) = (-27,6+24,5v_c-4,8v_c^2-1,3f^2-1,4v_c f-2,9v_c a_p-4,2a_p) \quad (3)$$

$$R_z = -0,95+2,73a_p+0,003v_c^2+185,27f^2-0,08v_c a_p-5,964fa_p \quad (4)$$

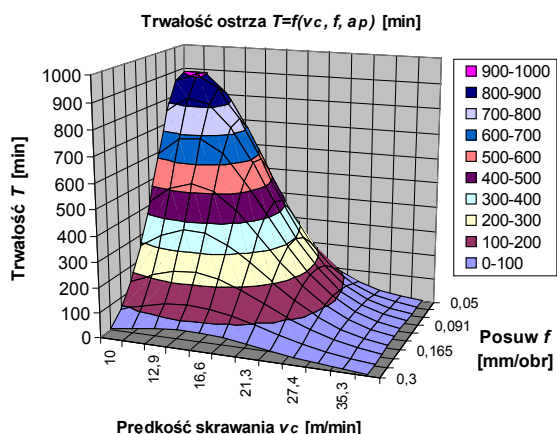
$$F_c = -172+16v_c+857f+82a_p-0,35v_c^2-3559f^2-19a_p^2+1792v_c a_p \quad (5)$$

$$F_f = 128-5,1v_c-730,2f-73a_p+29v_c f+2,92v_c a_p+417,1f a_p \quad (6)$$

$$\ln(F_n) = -69+599,5f+344a_p+0,12v_c^2-82,1a_p^2-3v_c a_p+187fa_p \quad (7)$$

$$k_c = 3963+63v_c-15673f-552a_p-1,4v_c^2+21252f^2+2001fa_p \quad (8)$$

$$P_c = 0,03926-0,104a_p-0,00012v_c^2-2,133f^2+0,036v_c a_p + 0,00541 v_c f + 0,574fa_p, \quad Q_v = a_p f v_c \quad (9), (10)$$



Rys. 2. Trwałość ostrza w funkcji prędkości skrawania v_c i posuwu f

Adekwatność równań regresji testowano testem F – Fischera-Snedecora na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Istotność współczynników w równaniach regresji testowano testem t – Studenta na tym samym poziomie istotności.

Optymalizacja jedno- i wielokryterialna

Zastosowano optymalizację wielokryterialną z ograniczeniami [6]. Nadrzędne kryterium optymalizacji wielokryterialnej zastąpiono zbiorem zadań cząstkowych. Przyjęte kryterium optymalizacji wielokryterialnej ujmuje poszukiwanie parametrów obróbki, które zapewnią spełnienie następujących celów cząstkowych: możliwie największą wydajność i trwałość ostrza oraz możliwie najmniejszą moc skrawania i chropowatość powierzchni. Ograniczenia procesu to: siły dopuszczalne, minimalna trwałość, moc itp. Do wyznaczenia wartości nadrzędnego kryterium optymalizacji wielokryterialnej niezbędna jest znajomość wartości optymalnych pojedynczych funkcji celów w sensie maksimów i minimów. Do tego zadania opracowano własne programy optymalizacji jedno- i wielokryterialnej, w których wykorzystano zasadę systematycznego przeszukiwania. Wyniki obliczeń dla optymalizacji jednokryterialnej przedstawiono w tabl. I.

TABLICA I. Wyniki optymalizacji jednokryterialnej

Optymalne wartości wielkości wyjściowych i odpowiadające im parametry obróbki				
Lp.	Wartości maksymalne	v_c	f	a_p
1.	$T = 834,585$ min	14,848	0,103	2,227
2.	$R_z = 18,082$ μm	40,000	0,300	2,500
3.	$P_c = 0,535$ kW	40,000	0,300	2,500
4.	$Q = 500,000$ mm ³ /s	23,333	0,050	1,000
Lp.	Wartości minimalne	v_c	f	a_p
1.	$T = 5,000$ min	25,455	0,267	2,424
2.	$R_z = 2,51$ μm	29,000	0,050	1,000
3.	$P_c = 0,264$ kW	10,000	0,050	1,030
4.	$Q_v = 8,333$ mm ³ /s	10,000	0,050	1,000

Do wyznaczenia optymalnych parametrów obróbki procesu toczenia tytanu zastosowano wielokryterialną optymalizację korelacyjno-wagową [6], wykorzystując pojęcie bezwymiarowej oceny wielkości OPT , opisanej zależnością:

$$OPT = \left\{ \sum_{i=1}^n W_i \frac{\alpha_i \cdot |Y_{\max,i} - Y_i|}{Y_{\max,i} - Y_{\min,i}} \right\}_{\max} \quad (11)$$

gdzie: W_i – waga każdego z poszczególnych jednocelowych kryteriów optymalizacyjnych ($i = 1, 2, 3, \dots, n$); α – współczynnik; $\alpha = +1$ – dla wielkości maksymalizowanej, $\alpha = -1$ – dla wielkości minimalizowanej; Y_i – bieżąca wartość optymalizowanego parametru użytkowego procesu, kwantowana z określonym przyrostem; $Y_{\max,i}$ ($Y_{\min,i}$) – wartość maksymalna (minimalna); n – liczba optymalizowanych parametrów procesu.

Wartość globalnej oceny OPT może się zmieniać w granicach:

$$0 < OPT < \sum_{i=1}^n W_i \quad (12)$$

Poszukiwany optymalny zbiór parametrów obróbki v_c , f , a_p przy określonym wariancie realizacji celów jednostkowych, to taki, przy którym wyrażenie OPT osiąga wartość maksymalną. Zakładając, że wszystkie wielkości użytkowe procesu toczenia są równoprawne (jednocenne) i są tak samo ważne, co jest równoznaczne z nadaniem im wag $W_i = 1$, gdzie $i = 1, 2, 3, \dots, n$ otrzymano następujący zbiór parametrów optymalnych – tabl. II.

TABLICA II. Wyniki optymalizacji wielokryterialnej dla przyjętego wariantu kryterium nadrzędnego

Wariant: $Q_{v\max}, T_{\max}, P_{c\min}, R_{z\min}$ Parametry optymalne: ($OPT_{\max} = 2,854$) $v_c = 14,55$ m/min, $f = 0,053$ mm/obr, $a_p = 2,091$	
Lp.	Optymalne wartości wielkości użytkowych
1.	$Q_{vx} = 26,624$ mm ³ /s
2.	$T_x = 831,837$ min
3.	$P_{cx} = 0,075$ kW
4.	$R_{zx} = 2,78$ μm
Parametry nieoptymalne (najgorsze): ($OPT_{\min} = 0,758$) $v_c = 23,03$ m/min, $f = 0,3$ mm/obr, $a_p = 2,485$	
Lp.	Nieoptymalne wartości wielkości użytkowych
1.	$Q_{vn} = 286,134$ mm ³ /s
2.	$T_n = 5,118$ min
3.	$P_{cn} = 0,531$ kW
4.	$R_{zn} = 14,99$ μm

Podsumowanie

Proces toczenia tytanu i jego stopów jest trudny do badania z uwagi na brak stabilności procesu. Zbudowany model matematyczny, jak również algorytmy optymalizacji jedno- i wielokryterialnej mogą być użyte do budowy postprocesorów technologicznych w systemach CAM.

LITERATURA

- Laskowski P., Habrat W., Krupa K., Sieniawski J. „Toczenie wykończeniowe stopu tytanu Ti-Al-4V z zastosowaniem HCP”. *Stal, Metale i Nowe Technologie*. Nr 11–12 (2013): s. 56–62.
- Malecka J. „Stopy tytanu na osnowie faz międzymetalicznych TiAl(γ) i Ti₃Al(α_2)”. *Mechanik*. Nr 10 (2013): s. 888–890.
- Oczoł K.E. „Kształtowanie ubytkowe tytanu i jego stopów w przemyśle lotniczym i technice medycznej”. Część I, *Mechanik*. Nr 9 (2008): s. 888–890. Część II, *Mechanik*. Nr 10 (2008): s. 753–756.
- Mańczak K. „Technika planowania eksperymentu”. WNT, Warszawa 1976.
- Pogorzelski W. „Teoria systemów i metody optymalizacji”. OWPW, Warszawa 1996.