

# OPTIMALIZACJA DOCISKU MOCOWANIA PODATNEGO PRZEDMIOTU OBRABIANEGO PODCZAS FREZOWANIA

KRZYSZTOF J. KALIŃSKI<sup>1</sup>, MAREK A. GALEWSKI<sup>2</sup>,  
MICHAŁ R. MAZUR<sup>3</sup>, NATALIA MORAWSKA<sup>4</sup>

*Politechnika Gdańska*

*Wydział Mechaniczny,*

*Katedra Mechaniki i Mechatroniki*

*ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk*

<sup>1</sup> kkalinsk@o2.pl, <sup>2</sup> marek.galewski@pg.edu.pl,

<sup>3</sup> michal.mazur@pg.edu.pl, <sup>4</sup> natalia.morawska@pg.edu.pl

**SŁOWA KLUCZOWE:** frezowanie, drgania, sztywność zamocowania, przedmiot podatny

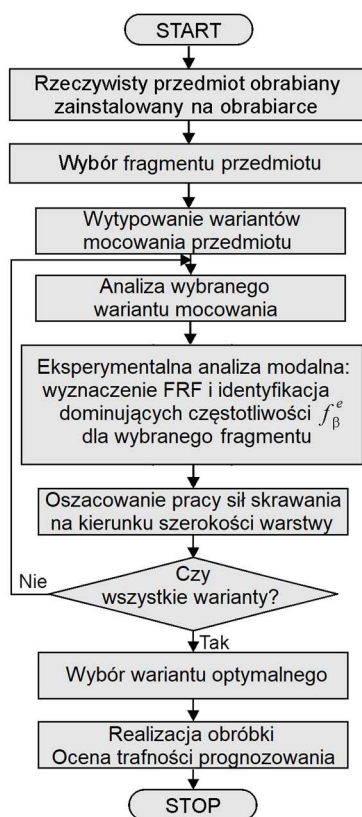
## STRESZCZENIE

Przedstawiono nową metodę nadzorowania drgań podatnego przedmiotu obrabianego podczas frezowania czołowego, polegającą na optymalizacji docisku zamocowania na podstawie szybkiej analizy modalnej. Wymaga ona powtarzalnej zmiany momentu dokręcenia śrub mocujących. Oszacowanie minimalnej pracy sił skrawania na kierunku szerokości warstwy umożliwia prognozowanie optymalnej konfiguracji zamocowania przedmiotu obrabianego. Skuteczność metody potwierdzono, oceniając wartości RMS poziomu drgań w dziedzinie czasu oraz wartości dominujących „szczytów” w widmie amplitudowym, uzyskanych w procesie frezowania.

## 1. Wstęp

Przedmiotem niniejszego artykułu jest metoda poszukiwania warunków minimalizacji poziomu drgań narzędzie-podatny przedmiot obrabiany, z wykorzystaniem optymalnej sztywności zamocowania przedmiotu obrabianego, przy niezmiennych parametrach technologicznych procesu frezowania (rys. 1). Jej skuteczne zastosowanie wymaga zapewnienia powtarzalnych warunków mocowania przedmiotu na stole obrabiarki, np. poprzez możliwość pomiaru momentu dokręcania śrub mocujących kluczem dynamometrycznym. Jest to niezwykle atrakcyjne ekonomicznie

rozwiązanie, gdyż nie wymaga identyfikacji parametrów modelu obliczeniowego, ani symulacji procesu obróbkowego. Dotychczasowe podejście całkowitego luzowania i ponownego zaciskania kolejnych podpór [1, 2] ma mniejsze znaczenie praktyczne, z uwagi na ryzyko niespełnienia warunku powtarzalności mocowania.

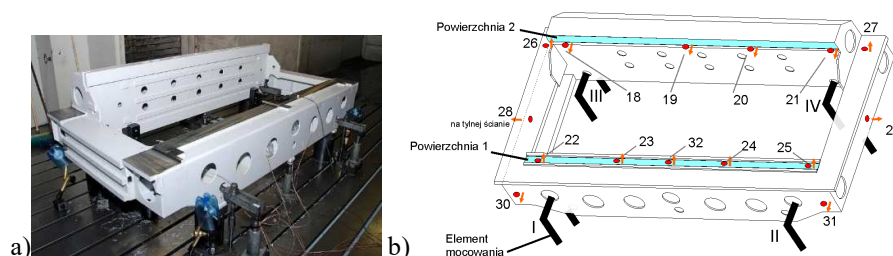


Rys. 1. Nadzorowanie procesu frezowania z wykorzystaniem optymalnej sztywności zamocowania przedmiotu obrabianego

Metoda bazuje na pomiarze charakterystyk impulsowych drgań w wybranym fragmencie przedmiotu obrabianego i wyznaczeniu częstotliwości dominujących szczytów w widmie amplitudowym, w celu określenia optymalnego wariantu mocowania przedmiotu z warunku szacowania minimalnej pracy sił skrawania na kierunku szerokości warstwy skrawanej. Ocena trafności prognozowania możliwa jest dzięki realizacji procesu obróbkowego, zgodnie z określonym wariantem optymalnym mocowania przedmiotu.

## 2. Obiekt badań

Obiektem badań był testowy przedmiot obrabiany 449250, zainstalowany na portalowym centrum obróbkowym MIKOMAT 20V w PHS HYDROTOR S.A. w Tucholi (rys. 2a). Badano drgania względne w umownym punkcie styku narzędzia z przedmiotem podczas frezowania czołowego powierzchni o długości  $l_d = 1778$  mm każda, w kierunku szerokości warstwy skrawanej.



Rys. 2. Testowy przedmiot obrabiany: a) mocowanie na stole obrabiarki, b) schemat uproszczony, zaznaczone położenia akcelerometrów i podpór

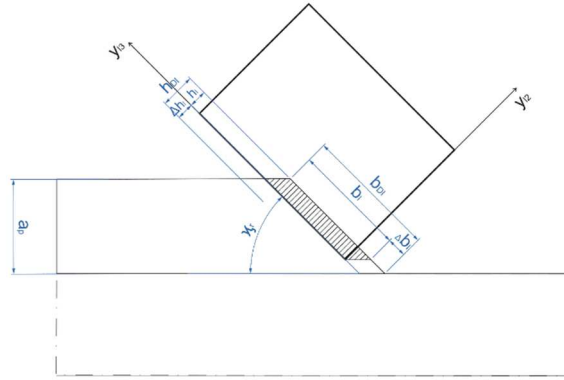
W celu określenia dominujących częstotliwości drgań dla różnych wariantów mocowania oraz doboru optymalnych warunków mocowania przedmiotu na stole obróbkowym należy zarejestrować dane pomiarowe, uzyskane z testów modalnych. Akcelerometry (AkT18 – AkT25, AkT32) rozmieszczono wzdłuż powierzchni 1 i 2, na wewnętrznych stronach ścian elementu (rys. 2b).

Zmiany pomiędzy kolejnymi konfiguracjami podpór polegały na dokręcaniu wybranych śrub mocujących (I – IV) identycznym momentem, mierzonym kluczem dynamometrycznym. Pozostałe podpory nie zostały zaznaczone (rys. 2b), a wartości ich momentów dokręcenia nie ulegały zmianie.

## 3. Minimalizacja pracy sił skrawania na kierunku szerokości warstwy

Niniejsze opracowanie znacząco różni się od powszechnie spotykanych w literaturze światowej [3-7], gdzie w celu poszukiwania warunków optymalnego stanu drgań bierze się pod uwagę zjawiska obserwowane na kierunku grubości warstwy skrawanej. Podejście to jest skuteczne w przypadku dominacji drgań samowzbudnych typu *chatter* [8, 9]. Minimalizując pracę sił skrawania na kierunku grubości warstwy [10], można otrzymać warunek Liao-Younga [11]. Natomiast, podczas frezowania czołowego przedmiotów wielkogabarytowych drgania *chatter* występują niezwykle rzadko, a ponadto – dominującym kierunkiem drgań jest kierunek szerokości warstwy skrawanej, co ma również istotny wpływ na jakość wykonania wyrobu.

Uwzględniono zmienną w czasie grubość  $h_l(t)$  i szerokość  $b_l(t)$  warstwy skrawanej (rys. 3).



Rys. 3. Geometria warstwy skrawanej w procesie frezowania czółowego

W odróżnieniu od dotychczasowych rozważań [10, 12] przyjęto 3-wymiarowy model proporcjonalny dynamiki procesu skrawania, który można przedstawić jako:

$$F_{yl1}(t) = \begin{cases} k_{dl}b_l(t) \cdot h_l(t), & b_l(t) > 0 \wedge h_l(t) > 0 \\ 0, & b_l(t) \leq 0 \vee h_l(t) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$F_{yl2}(t) = \begin{cases} \mu_{2l}k_{dl}b_l(t) \cdot h_l(t), & b_l(t) > 0 \wedge h_l(t) > 0 \\ 0, & b_l(t) \leq 0 \vee h_l(t) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

$$F_{yl3}(t) = \begin{cases} \mu_{3l}k_{dl}b_l(t) \cdot h_l(t), & b_l(t) > 0 \wedge h_l(t) > 0 \\ 0, & b_l(t) \leq 0 \vee h_l(t) \leq 0 \end{cases} \quad (3)$$

Ponieważ na kierunku szerokości warstwy pracę wykonuje siła  $F_{yl3}$ , wpływ pozostałych składowych pominięto. Jeżeli obserwujemy drgania harmoniczne narzędzie-przedmiot obrabiany o amplitudzie  $\Delta b_l^0$  i częstości kołowej  $\omega_\alpha$ , co skutkuje zmienną w czasie szerokością warstwy:

$$\Delta b_l = \Delta b_l^0 \sin(\omega_\alpha t), \quad (4)$$

to otrzymamy towarzyszącą tym drganiom składową nr  $\alpha$  siły skrawania:

$$F_{yl3\alpha} = \mu_{3l}k_{dl}f_z \cos\left(\frac{2\pi n}{60}t\right) \cdot [b_{Dl} - \Delta b_l^0 \sin(\omega_\alpha t)]. \quad (5)$$

Jeśli praca siły skrawania (5) w czasie jednego okresu drgań o częstotliwości kołowej  $\omega_\alpha$  wynosi:

$$\begin{aligned}
 L_\alpha &= \int_0^{\frac{2\pi}{\omega_\alpha}} \mu_{3l} k_{dl} f_z \cos\left(\frac{2\pi n}{60} t\right) \cdot [b_{Dl} - \Delta b_l^0 \sin(\omega_\alpha t)] \cdot \Delta b_l^0 \omega_\alpha \cos(\omega_\alpha t) dt = \\
 &= \mu_{3l} k_{dl} f_z b_{Dl} \Delta b_l^0 \omega_\alpha \int_0^{\frac{2\pi}{\omega_\alpha}} \cos\left(\frac{2\pi n}{60} t\right) \cos(\omega_\alpha t) dt - k_{dl} f_z (\Delta b_l^0)^2 \omega_\alpha \cdot \\
 &\frac{1}{2} \int_0^{\frac{2\pi}{\omega_\alpha}} \cos\left(\frac{2\pi n}{60} t\right) \sin(2\omega_\alpha t) dt \quad (6)
 \end{aligned}$$

to pracę, wykonaną przez wszystkie składowe siły skrawania  $i_\alpha$  w czasie trwania procesu obróbkowego  $T$  opisuje wyrażenie:

$$\begin{aligned}
 L &= \frac{T \mu_{3l} k_{dl} f_z}{2\pi} \sum_{\alpha=1}^{i_\alpha} \left\{ b_{Dl} \Delta b_{l\alpha}^0 f_\alpha^2 \frac{\frac{\pi n}{30}}{\left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2 - \omega_\alpha^2} \cdot \sin\left(\frac{4\pi^2 n}{60 \omega_\alpha}\right) + \right. \\
 &\left. + (\Delta b_l^0)^2 \cdot \frac{\omega_\alpha^3}{4\omega_\alpha^2 - \left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2} \left[ \cos\left(\frac{4\pi^2 n}{60 \omega_\alpha}\right) - 1 \right] \right\} \quad (7)
 \end{aligned}$$

Można je znacznie uprościć, pomijając czynniki niezależne od składowej  $\alpha$  oraz jeśli  $\Delta b_{l\alpha}^0 \leq 0,5 \cdot b_{Dl}$  to dominującą rolę spełnia jedynie pierwszy składnik sumy w wyrażeniu (7). I tak, minimalizacja funkcji celu (8), z której wynika oszacowanie minimalnej pracy siły skrawania na kierunku szerokości warstwy, umożliwia prognozowanie optymalnej konfiguracji zamocowania przedmiotu obrabianego:

$$\bar{L} \cong \sum_{\alpha=1}^{i_\alpha} b_{Dl} f_\alpha^2 \frac{\frac{\pi n}{30}}{\left(\frac{n}{60}\right)^2 - f_\alpha^2} \cdot \sin\left(\frac{2\pi n}{60 f_\alpha}\right) \quad (8)$$

W tab. 1 przedstawiono wartości funkcji celu (8) dla powierzchni 1 przy różnych wartościach momentów dokręcenia śrub mocujących, wyznaczone na podstawie 7 dominujących częstotliwości drgań własnych w amplitudowym widmie przemieszczeń. Minimalną wartość siły skrawania na kierunku szerokości warstwy uzyskano przy dokręceniu wszystkich czterech śrub mocujących momentem 50 Nm (wartość pogrubiono), zaś maksymalną – przy dokręceniu momentem 110 Nm (wartość podkreślono).

Podobnie jak dla powierzchni 1, w tab. 2 przedstawiono wartości funkcji celu (8) dla powierzchni 2 przy różnych wartościach momentów dokręcenia śrub mocujących, wyznaczone na podstawie 7 dominujących częstotliwości drgań własnych w amplitudowym widmie przemieszczeń.



Tab. 1. Wartości funkcji celu (8) dla powierzchni 1

Moment dokręcenia [Nm]	n [obr/min]	$b_D$ [mm]	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	$f_4$ [Hz]	$f_5$ [Hz]	$f_6$ [Hz]	$f_7$ [Hz]	$\bar{L}$ [mm rad/s]
50	1300	1	133,0	173,6	224,5	240,5	261,5	314,0	385,0	<b>-541,997</b>
70	1300	1	133,5	174,0	226,5	248,0	263,0	315,5	365,0	-540,690
90	1300	1	133,5	175,0	231,5	250,5	265,0	317,0	371,0	-536,570
110	1300	1	133,5	175,5	235,0	252,0	265,0	318,5	373,0	<u>-534,426</u>
130	1300	1	134,0	172,5	234,5	251,5	265,5	318,5	372,6	-535,717

Tab. 2. Wartości funkcji celu (8) dla powierzchni 2

Moment dokręcenia [Nm]	n [obr/min]	$b_D$ [mm]	$f_1$ [Hz]	$f_2$ [Hz]	$f_3$ [Hz]	$f_4$ [Hz]	$f_5$ [Hz]	$f_6$ [Hz]	$f_7$ [Hz]	$\bar{L}$ [mm rad/s]
50	484	1	64,5	70,5	82,5	144,5	173,0	268,5	311,5	<b>-115,797</b>
70	484	1	66,0	70,0	84,5	145,0	175,5	270,5	314,5	-114,082
90	484	1	67,5	70,0	86,5	147,0	176,0	273,5	316,5	-112,399
110	484	1	67,5	71,0	87,5	149,0	174,5	275,5	318,0	<u>-111,900</u>
130	484	1	68,5	70,0	89,0	150,0	177,0	277,5	319,0	<u>-110,643</u>

Z powyższych rozważań wynika, iż prognozowany optymalny warunek mocowania przedmiotu na stole obrabiarki wynika z dokręcenia śrub mocujących momentem 50 Nm. W tak wyznaczonym zamocowaniu o optymalnej sztywności można obrabiać obie powierzchnie.

#### 4. Proces frezowania czołowego

W celu dokonania oceny trafności prognozowania optymalnych warunków mocowania przedmiotu, rejestrowano sygnały przyspieszeń drgań podczas procesu frezowania czołowego powierzchni korpusu 449250. Następnie uzyskano przebiegi przemieszczeń, poprzez 2-krotne całkowanie zarejestrowanych sygnałów.

Obróbka frezowania powierzchni 1 i 2 prowadzona była wg technologii stosowanej w PHS HYDROTOR S.A. Dla powierzchni 1 przyjęto: głębokość skrawania  $a_p=1$  mm, prędkość obrotową narzędzia  $n=1300$  obr/min, prędkość posuwu  $v_f=600$  mm/min. Zastosowano głowicę frezową firmy Sandvik o średnicy  $D=44$  mm i liczbie ostrzy  $z=4$ . Dla powierzchni 2 przyjęto: głębokość skrawania  $a_p=1$  mm, prędkość obrotową narzędzia  $n=484$  obr/min, prędkość posuwu  $v_f=840$  mm/min. Zastosowano głowicę frezową firmy Sandvik o średnicy  $D=125$  mm i liczbie ostrzy  $z=11$ .

Wyniki RMS przemieszczeń drgań zestawiono w tab. 3 – 4. Przedstawiono w nich uśrednione wartości RMS dla całych przebiegów. W przypadku



powierzchni 1 jest to średnia arytmetyczna, gdyż wartości pochodzą z fragmentów przebiegu o tej samej długości. W przypadku powierzchni 2 jest to średnia ważona, ponieważ czujniki na długości powierzchni nie były rozmieszczone równomiernie.

Tab. 3. Wartości RMS [mm] przemieszczeń drgań podczas frezowania powierzchni 1 dla różnych mocowań podpór

Moment dokręcenia śrub [Nm]	AkT22	AkT23	AkT32	AkT24	AkT25	Wartość średnia
50	0,001120	0,001478	0,002107	0,001570	0,000634	<b>0,001382</b>
70	0,001326	0,002009	0,002774	0,002042	0,000876	0,001805
90	0,001036	0,002121	0,002893	0,002068	0,000734	0,001770
110	0,001058	0,002555	0,003381	0,002154	0,000674	<u>0,001964</u>
130	0,000620	0,001949	0,002624	0,001678	0,000480	0,001470

Tab. 4. Wartości RMS [mm] przemieszczeń drgań podczas frezowania powierzchni 2 dla różnych mocowań podpór

Moment dokręcenia śrub [Nm]	AkT18	AkT19	AkT20	AkT21	Wartość średnia
50	0,005174	0,003868	0,003921	0,003786	<b>0,004183</b>
70	0,006694	0,004766	0,004426	0,003712	0,004847
90	0,008143	0,005357	0,004804	0,003204	0,005269
110	0,007835	0,006329	0,006198	0,003002	<u>0,005675</u>
130	0,007206	0,005682	0,005300	0,003276	0,005303

## 5. Wnioski

Uzyskane wyniki pomiarów drgań narzędzie-przedmiot w procesie frezowania czołowego potwierdzają trafność prognozowania optymalnych warunków mocowania przedmiotu z wykorzystaniem warunku minimalizacji pracy sił skrawania na kierunku szerokości warstwy skrawanej.

Potwierdzono skuteczność proponowanej metody nadzorowania drgań podczas frezowania przedmiotów wielkogabarytowych, z wykorzystaniem optymalnej sztywności zamocowania przedmiotu obrabianego w trybie *off-line*.



## Bibliografia

- [1] Kaliński K. J., Galewski M. A., Mazur M. R., Morawska N.: Optimisation of clamping stiffness during milling of high-dimensional structures with use of techniques of experiment-aided virtual prototyping. W: Actual Problems of Modern Science (editors: J. Musiał, O. Polishchuk, R. Sorokaty). Khmelnytsky-Ukraine: Khmelnytsky National University 2017, s. 495-502.
- [2] Kaliński K. J., Galewski M. A., Mazur M. R., Morawska N.: Optymalizacja sztywności zamocowania podczas frezowania przedmiotów wielkogabarytowych z wykorzystaniem wirtualnego prototypowania wspomaganego eksperymentem. W: Projektowanie mechatroniczne. Zagadnienia wybrane. Red. M. Mańka. Kraków: Katedra Robotyki i Mechatroniki AGH 2017, s. 67-74.
- [3] Tomków J.: Wibrostabilność obrabiarek. Warszawa: WNT 1997.
- [4] Mané I., Gagnol V., Bouzgarrou B. C., Ray P.: Stability-based spindle speed control during flexible workpiece high-speed milling. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2007, 48, s. 184–194.
- [5] Kaliński K. J., Galewski M.A.: Chatter vibration surveillance by the optimal-linear spindle speed control. Mechanical Systems and Signal Processing 2011, 25, s. 383-399
- [6] Kaliński K. J., Galewski M. A.: Optimal spindle speed determination for vibration reduction during ball-end milling of flexible details. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2015, 92, s. 19-30.
- [7] Munoa J., Beudaert X., Dombovari Z., Altintas Y., Budak E., Brecher C., Stepan G.: Chatter suppression techniques in metal cutting. CIRP Annals - Manufacturing Technology 2016, 65, s. 785–808.
- [8] Soliman E., Ismail F.: Chatter suppression by adaptive speed modulation. International Journal of Machine Tools and Manufacture 1997, 37, s. 355–369.
- [9] Quintana G., Ciurana J.: Chatter in machining processes: a review. International Journal of Machine Tools and Manufacture 2011, 51, s. 363-376.
- [10] Kaliński K. J.: Nadzorowanie procesów dynamicznych w układach mechanicznych. Gdańsk: Wyd. Pol. Gd. 2012, 248 s. ISBN 978-83-7348-448-1.
- [11] Liao Y. S., Young Y. C.: A New On-line Spindle Speed Regulation Strategy for Chatter Control. International Journal of Machine Tools & Manufacture 1996, 35, 6, s. 651–660.
- [12] Kaliński K. J., Galewski M. A., Mazur M., Chodnicki M.: Modelling and simulation of a new variable stiffness holder for milling of flexible details. Polish Maritime Research 2017, 24, s. 115-124.

## Podziękowania

Prace badawcze zrealizowano we współpracy z PHS HYDROTOR S.A. w Tucholi w ramach projektu TANGO1/266350/NCBR/2015.

