

Dr inż. Zbigniew Nowakowski,  
dr inż. Szymon Wojciechowski (Politechnika Poznańska):

## WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE OPRAWEK DO NARZĘDZI Z CHWYTEM WALCOWYM

### Streszczenie

W artykule dokonano analizy właściwości dynamicznych trzech różnych opravek do narzędzi trzpieniowych z chwytami walcowymi. Wykonano test impulsowy w celu wyznaczenia współczynników sztywności i tłumienia badanych opravek. Na podstawie przeprowadzonych badań otrzymano wartości parametrów modalnych. Wielkości te posłużyły do opracowania modelu ugięcia i oszacowania przemieszczeń frezu mocowanego w oprawkach. Badania wykazały, że konstrukcja oprawki wywiera znaczący wpływ na właściwości dynamiczne układu oprawka – narzędzie oraz przemieszczenia promieniowe narzędzia podczas skrawania.

**Słowa kluczowe:** *uchwyty narzędziowe, sztywność dynamiczna, tłumienie drgań, przemieszczenia narzędzia*

## DYNAMICAL PROPERTIES OF TOOLHOLDERS WITH CYLINDRICAL SHANK

### Abstract

In the paper, the analysis of dynamical properties of three various toolholders with cylindrical shank was carried out. The impulse test was conducted in order to determine the stiffness and damping coefficients. On the basis of the research, the modal parameters' values were received. These quantities were applied to the development of end mill's deflection model. The research revealed that construction of toolholder has significant influence on the toolholder-tool system's dynamical properties and tool's radial deflections during machining.

**Keywords:** *toolholder, dynamic stiffness, damping vibrations, tool displacement*

# WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNE OPRAWEK DO NARZĘDZI Z CHWYTEM WALCOWYM

Zbigniew NOWAKOWSKI<sup>1</sup>, Szymon WOJCIECHOWSKI<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Wśród zdecydowanej większości użytkowników narzędzi skrawających panuje pogląd, że za efekty technologiczne obróbki takie jak: dokładność wykonania, struktura geometryczna powierzchni oraz trwałość ostrza odpowiadają parametry skrawania oraz narzędzie skrawające, tzn. geometria i materiał z jakiego jest wykonane. Nie ujmując wagi wymienionym czynnikom, zapomina się często o bardzo ważnym ogniwie łączącym narzędzie z obrabiarką. Ogniwo to w postaci uchwytu narzędziowego jest niejednokrotnie najsłabszym elementem układu OUPN, decydującym o efektach końcowych obróbki. Dobrze dobrany uchwyt narzędziowy pozwala uzyskać małe wartości bicia, dużą sztywność narzędzia i tym samym dokładność wykonania wyrobu [1, 4-5, 10]. Podczas pracy narzędziem o dużym wysięgu i obciążeniu, odpowiedni uchwyt narzędziowy potrafi zapewnić tłumienie drgań powstających w procesie skrawania [7-8, 10]. Niestety pogodzenie dobrych właściwości tłumiących i dużej sztywności konstrukcyjnie jest bardzo trudne [9, 11]. Tym samym trudny jest wybór właściwego uchwytu do konkretnego zadania obróbkowego.

Najliczniejszą grupę uchwytów narzędziowych jeżeli chodzi o różnorodność oferowanych rozwiązań stanowią oprawki mechaniczne na stożkowe tulejki zaciskowe (rozprężne) [6, 8]. W zakresie obróbki z dużymi prędkościami skrawania (HSM), dużą popularnością cieszą się oprawki termo-skurczowe [2-3]. Grupę tę uzupełniają oprawki hydrauliczne, cenione głównie ze dobre właściwości tłumiące drgania [7]. Przedstawiciele każdej z wymienionych grup oprawek, poddano w niniejszej pracy ocenie pod kątem właściwości dynamicznych.

---

<sup>1</sup> Instytut Technologii Mechanicznej Politechniki Poznańskiej, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań

## 2. CEL, ZAKRES, WARUNKI I TECHNIKA BADAŃ

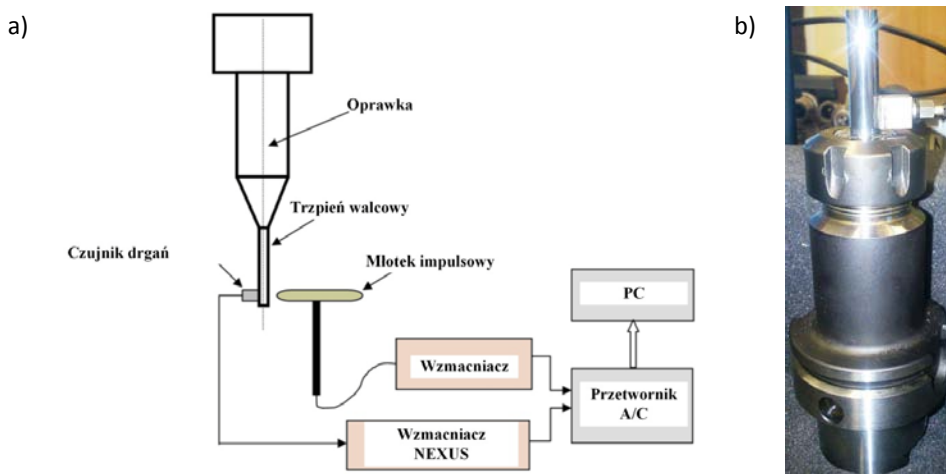
Badania obejmowały wyznaczenie właściwości dynamicznych (parametrów modalnych: masy, współczynnika tłumienia oraz sztywności dynamicznej) narzędzi obrotowych zamocowanych w oprawkach o zróżnicowanej konstrukcji.

W badaniach zastosowano oprawkę zaciskową ER, termo-skurczową oraz hydrauliczną. W oprawkach zamocowano walcowe trzpienie pełnowęglikowe zamiast monolitycznych frezów, co miało na celu ułatwienie oszacowania masy zastępczej narzędzia, niezbędnej do wyznaczenia pozostałych parametrów modalnych. W tabelicy 1 przedstawiono parametry zastosowanych trzpieni walcowych.

Tabela 1. Parametry pełnowęglikowych trzpieni walcowych

Wysięg $l$ [mm]	Średnica $D$ [mm]	Gęstość $\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
37	10	14 000

Parametry modalne badanych narzędzi wyznaczono w oparciu o test impulsowy. Zastosowane stanowisko badawcze (rys. 1) składało się z młotka impulsowego zadającego i rejestrującego siłę wymuszającą, piezoelektrycznego akcelerometru rejestrującego odpowiedź układu w postaci przyspieszeń drgań (połączonego ze wzmacniaczem Nexus), a także przetwornika analogowo-cyfrowego oraz komputera PC wyposażonego w oprogramowanie do analizy właściwości dynamicznych. Częstotliwość próbkowania rejestrowanych sygnałów ustalono na poziomie 20 000 Hz.



Rys. 1. Test impulsowy układu narzędzie-oprawka: a) schemat stanowiska badawczego; b) widok układu trzpień walcowy-oprawka wraz z zamocowanym piezoelektrycznym czujnikiem przyspieszeń drgań

W wyniku przeprowadzonych badań otrzymano wartości częstotliwości własnej  $f_o$  oraz bezwymiarowego współczynnika tłumienia  $\xi$  układu trzpień-oprawka. Pomiarów powtórzono 4-krotnie dla każdego badanego układu, w celu wyznaczenia miar statystycznych (średniej arytmetycznej i rozstępu) uzyskanych wielkości. Otrzymane wartości parametrów:  $f_o$  i  $\xi$  posłużyły do wyznaczenia współczynnika sztywności dynamicznej  $k$  i tłumienia  $c$  badanych układów. W tym celu zastosowano następujące równania:

$$c = 2\pi \cdot f_o \cdot m \cdot \sqrt{\xi}, \quad (1)$$

$$k = 4\pi^2 \cdot f_o^2 \cdot m. \quad (2)$$

W celu rozwiązania równań (1) i (2) należy wyznaczyć również masę zastępczą  $m$  narzędzia. Wartość parametru  $m$  wyznaczono w oparciu o równanie:

$$m = 0,06 \cdot D^2 \cdot \rho \cdot l. \quad (3)$$

Otrzymane w ten sposób parametry modalne posłużyły do oszacowania chwilowych wartości ugięcia frezów kulistych podczas obróbki, zamocowanych w badanych oprawkach. W tym celu zastosowano równania różniczkowe ruchu:

$$m \cdot \ddot{x}(t) + c \cdot \dot{x}(t) + k \cdot x(t) = F_x(t), \quad (4)$$

$$m \cdot \ddot{y}(t) + c \cdot \dot{y}(t) + k \cdot y(t) = F_z(t) \cdot \sin \alpha + F_y(t) \cdot \cos \alpha, \quad (5)$$

gdzie:

- $x(t)$  – chwilowe ugięcie frezu w kierunku prostopadłym do osi obrotu narzędzia i kierunku ruchu posuwowego,
- $y(t)$  – chwilowe ugięcie frezu w kierunku prostopadłym do osi obrotu narzędzia i współliniowym do kierunku ruchu posuwowego,
- $F_x(t)$  – chwilowa wartość siły posuwowej normalnej,
- $F_y(t)$  – chwilowa wartość siły posuwowej,
- $F_z(t)$  – chwilowa wartość siły odporowej,
- $\alpha$  – kąt pochylenia obrabianej powierzchni.

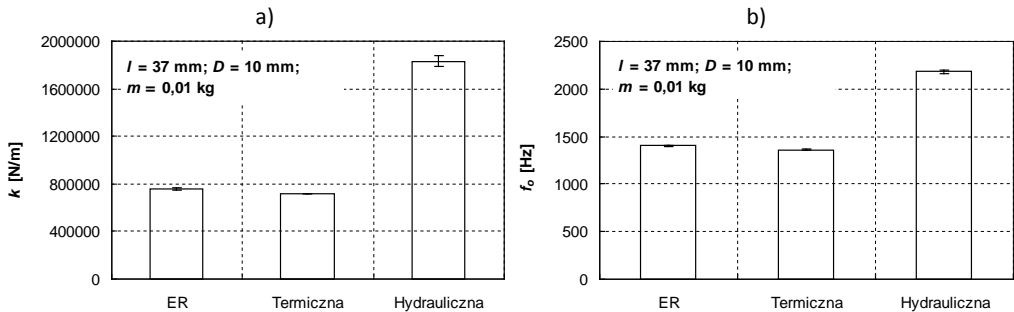
Wartości składowych siły całkowitej:  $F_x(t)$ ,  $F_y(t)$ ,  $F_z(t)$ , występujące w równaniach (4) i (5) wyznaczono na bazie modelu mechanistycznego [12], opracowanego dla procesu frezowania zahartowanej stali stopowej do pracy na gorąco 55NiCrMoV6.

Równania (4) i (5) zostały rozwiązane numerycznie w module **Simulink**, pakietu numerycznego **MathWorks MATLAB**, w oparciu o algorytm Runge-Kutta.

### 3. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

Na rysunku 2 przedstawiono porównanie właściwości dynamicznych badanych układów. Zaobserwowano, że największą wartością współczynnika sztywności dynamicznej  $k$ , a tym samym częstotliwości własnej  $f_0$ , charakteryzowało się narzędzie zamocowane w oprawce hydraulicznej. Różnice w wartościach parametru  $k$ , otrzymanych dla oprawki hydraulicznej, w porównaniu do uzyskanych przy użyciu oprawki zaciskowej ER wynosiły około 240%, natomiast w odniesieniu do oprawki termicznej ponad 255%. Jak wynika z literatury [7], bardzo dobre właściwości dynamiczne oprawek hydraulicznych przekładają się bezpośrednio na mniejsze zużycie i większą trwałość ostrzy narzędzi skrawających.

Badania wykazały (rys. 2), że różnice w sztywności dynamicznej  $k$  oprawek: zaciskowej ER i termicznej są niewielkie i wynoszą około 5%. Relatywnie dużą wartość sztywności dynamicznej  $k$  oprawki zaciskowej ER należy upatrywać w szeregu połączeń stykowych pomiędzy tulejką rozprężną a korpusem oprawki.

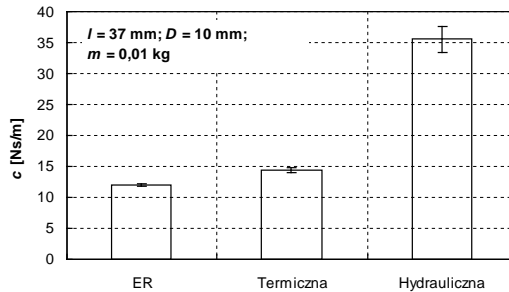


Rys. 2. Porównanie właściwości dynamicznych badanych układów narzędzie-oprawka:  
a) współczynnika sztywności dynamicznej  $k$ , b) częstotliwości własnej  $f_0$

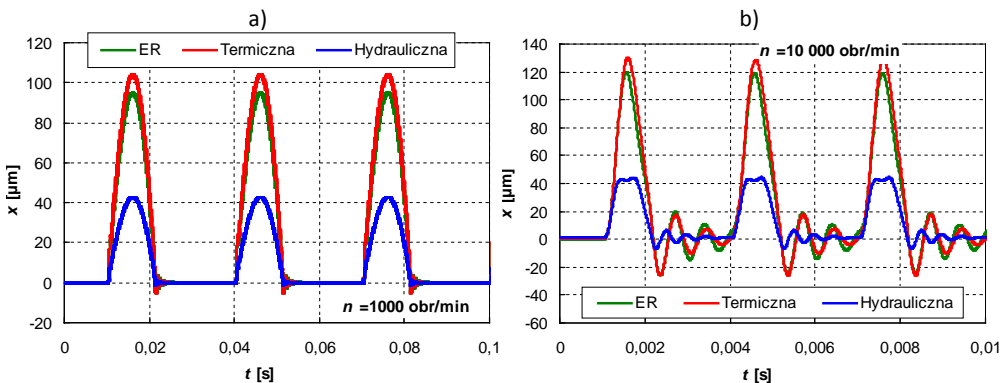
Rysunek 3 wskazuje, że narzędzie zamocowane w oprawce hydraulicznej posiada również większą wartość współczynnika tłumienia  $c$ , w porównaniu do wartości osiągniętych dla pozostałych badanych oprawek. Różnice w wartości współczynnika tłumienia  $c$  wynosiły odpowiednio: 250% w porównaniu do wartości otrzymanych dla oprawki termicznej i około 300% w odniesieniu do wartości dla oprawki zaciskowej ER. Pewnym zaskoczeniem, trudnym do wytłumaczenia jest relatywnie duży współczynnik tłumienia  $c$  oprawki termicznej, w porównaniu do oprawki zaciskowej ER.

Otrzymane wartości parametrów modalnych ( $m$ ,  $c$ ,  $k$ ) dla badanych układów trzpień-oprawka zastosowano w modelu symulującym ugięcia frezu kulistego podczas obróbki powierzchni pochylonej względem osi narzędzia (rys. 4-5). Dobrano wartość kąta pochylecia obrabianej powierzchni  $\alpha = 30^\circ$ , ponieważ w tym zakresie liczba ostrzy czynnych jest mniejsza od jedności [12] i w związku z tym występuje przery-

wany charakter pracy ostrza – istotny w aspekcie analizy tłumienia drgań. Badania symulacyjne wykazały, że w przypadku oprawki hydraulicznej, chwilowe wartości ugięcia części roboczej frezu są nawet 3-krotnie mniejsze od wartości uzyskanych dla dwóch pozostałych oprawek.



Rys. 3. Porównanie współczynnika tłumienia  $c$  badanych układów narzędzie-oprawka

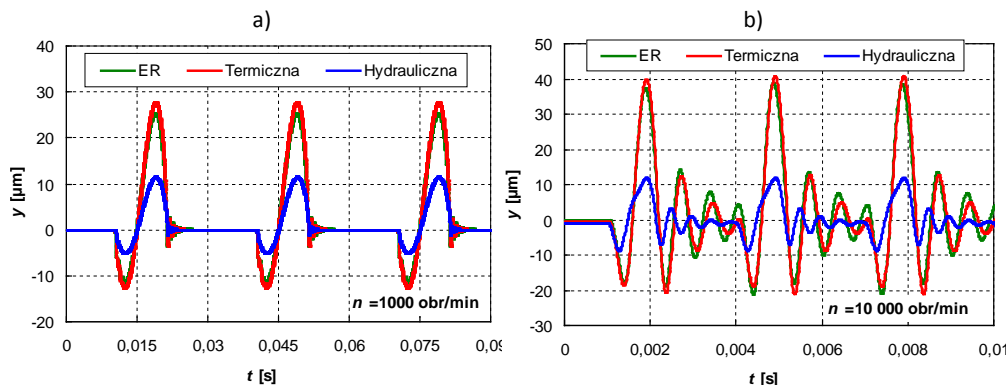


Rys. 4. Zamodelowane przebiegi czasowe ugięcia w kierunku  $x$  węglkowych frezów kulistych, zamocowanych w badanych oprawkach, podczas obróbki stali 55NiCrMoV6 (~56 HRC). Parametry skrawania:  $a_p=0,2$  mm,  $f_z=0,04$  mm/ostrze,  $\alpha = 30^\circ$ : a)  $n=1000$  obr/min, b)  $n=10\ 000$  obr/min

Zależność tę zaobserwowano niezależnie od dobranej wartości prędkości obrotowej i kierunku rozpatrywanego ugięcia. W przypadku narzędzi zamocowanych w oprawce termicznej i hydraulicznej różnice w amplitudach ugięcia frezów są niewielkie i wynikają z porównywalnej sztywności dynamicznej badanych układów.

Dla narzędzia zamocowanego w oprawce hydraulicznej, wzrost prędkości obrotowej z 1000 obr/min do 10 000 obr/min wywołał jedynie około 10% wzrost ugięcia narzędzia (w kierunku  $y$ ), natomiast w przypadku pozostałych oprawek różnice te dochodziły nawet do około 45%. Obserwacja ta potwierdza zasadność użycia oprawek hydraulicznych (ze złączem interface – HSK) w zakresie obróbki z dużymi prędko-

kośćmi skrawania (HSM). Należy przy tym zaznaczyć, że omawiane w pracy przemieszczenia frezu (ugięcia) wynikają wyłącznie z oddziaływań siłowych. Efektywne przemieszczenie narzędzia w czasie pracy uwzględnia również błędy geometryczne narzędzia i oprawki, rozumiane ogólnie jako bicie narzędzia.



Rys. 5. Zamodelowane przebiegi czasowe ugięcia w kierunku y węglkowych frezów kulistych, zamocowanych w badanych oprawkach, podczas obróbki stali 55NiCrMoV6 (~56 HRC). Parametry skrawania:  $a_p=0,2$  mm,  $f_z=0,04$  mm/ostrze,  $\alpha = 30^\circ$ : a)  $n=1000$  obr/min, b)  $n=10\ 000$  obr/min

Ze względu na relatywnie dużą wartość współczynnika tłumienia  $c$  narzędzia zamocowanego w oprawce hydraulicznej, wykazano również krótszy czas wygaszania drgań wywołanych obróbką przerywaną (rys. 4b-5b), w porównaniu do otrzymanego po zastosowaniu dwóch pozostałych oprawek. Należy podkreślić, że krótki czas wygaszenia drgań wywołany tłumieniem  $c$  może wpłynąć na minimalizację przemieszczeń ostrza skrawającego względem obrabianej powierzchni, a w ten sposób na poprawę parametrów struktury geometrycznej powierzchni (SGP) oraz zwiększenie stabilności procesu frezowania.

#### 4. PODSUMOWANIE

Na podstawie przeprowadzonych badań doświadczalnych i symulacyjnych sformułowano wnioski końcowe:

- najlepsze właściwości, z punktu widzenia tłumienia drgań i sztywności dynamicznej posiada narzędzie zamocowane w oprawce hydraulicznej; wartości współczynnika sztywności dynamicznej  $k$  i tłumienia  $c$  stanowią 250-300% wartości otrzymanych dla pozostałych badanych oprawek,
- badania symulacyjne wykazały, że podczas skrawania chwilowe wartości ugięcia części roboczej frezu zamocowanego w oprawce hydraulicznej są nawet 3-krotnie mniejsze od wartości uzyskanych dla dwóch pozostałych oprawek; zastosowanie oprawki hydraulicznej umożliwia ustabilizowanie

- amplitud drgań narzędzia na względnie stałym poziomie, w szerokim zakresie stosowanej prędkości skrawania,
- otrzymane wyniki mogą stanowić punkt wyjścia do dalszych badań, mających na celu weryfikację doświadczalną właściwości dynamicznych zastosowanych oprawek, poprzez pomiar drgań narzędzia podczas obróbki, analizę parametrów ukształtowanej struktury geometrycznej powierzchni, oraz w zakresie zróżnicowanej smukłości układu narzędzie-oprawka.

#### LITERATURA

- [1] AGAPIOU J., RIVIN E.I., XIE C., *Toolholder/spindle interfaces for CNC machine tools*, Annals of the CIRP, vol. 44/1/1995, s. 383-386.
- [2] BAIER S., Part II: *Spindles and Their Relationship to High-Speed Toolholders*, Mold Making Technology, 9/1/2003.
- [3] HANSEN P., *High-Speed Collet Toolholder Or Shrink-Fit Tooling*, Mold Making Technology, 4/1/2006.
- [4] KEITH J., *How to Choose the Right Toolholder*, Mold Making Technology, 12/1/2007.
- [5] MAURI E., ENDO H., HASHIMOTO M., KATO S., TSUJI A., *Joining Characteristics of a Tapered Coupling Joint*, JSME International Journal, Series C, vol. 40, no. 4, 1997, s. 759-767.
- [6] NOWAKOWSKI Z., *Mechaniczne systemy mocowania trzpieniowych narzędzi skrawających*. Mechanik, nr 8-9/2012, s.661-663, ver. na CD.
- [7] NOWAKOWSKI Z., *Systemy mocowania narzędzi trzpieniowych z chwytem walcowym*, [w:] Obróbka Skrawaniem. Współczesne Problemy, 4, pod red. B. Kruszyńskiego, Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny, Łódź 2010, s. 191-199.
- [8] NOWAKOWSKI Z., *Wybrane problemy eksploatacyjne mechanicznych systemów mocowania narzędzi skrawających*. Mechanik, nr 8-9/2013, s.499-507/715, ver. na CD.
- [9] RIVIN E.I., *Tooling structure: Interface between cutting edge and machine tool*, Annals of the CIRP, vol. 49/2/2000, s. 591-634.
- [10] RIVIN E.I., *Trends in Tooling for CNC Machine Tools: Machine System Stiffness, Stiffness and Damping in Mechanical Design* (Reprinted from ASME Manufacturing Review, vol. 4, 1991), published in 1991 by CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [11] STEPHENSON D.A., AGAPIOU J.S., *Metal Cutting Theory and Practice - Second Edition*, published in 2006 by CRC Press, Taylor & Francis Group.
- [12] WOJCIECHOWSKI S., *The estimation of cutting forces and specific force coefficients during finishing ball end milling of inclined surfaces*. International Journal of Machine Tools & Manufacture 89 (2015), s. 110-123.