

Analiza przemieszczeń roboczej części frezu podczas frezowania stali

Analysis of milling cutter working part displacements during milling of steel

PAWEŁ TWARDOWSKI
ADAM HAMROL
NATALIA ZNOJKIEWICZ
SZYMON WOJCIECHOWSKI*

Badania miały na celu analizę przemieszczeń części roboczej frezu kulistego w trakcie obróbki zahartowanej stali z różnymi wartościami wysunięcia narzędzia z oprawki. Pomiary przeprowadzono dla przemieszczeń narzędzia w dwóch kierunkach: normalnym oraz posuwowym. Zmierzone siły i drgania oraz parametry chropowatości obrabianej powierzchni.
SŁOWA KLUCZOWE: frezowanie, dynamika, chropowatość powierzchni

The aim of research was focused on analysis of tool displacements during milling of hardened steel, conducted with various overhangs. The measurements of displacements were carried out in feed and feed normal directions. Moreover, the measurements of forces, vibrations and surface roughness' parameters were also conducted.

KEYWORDS: milling, dynamics, surface roughness

Przemieszczenia i drgania mechaniczne frezów w trakcie obróbki to zjawiska, które należy minimalizować, ponieważ mają niekorzystny wpływ na stabilność procesu, dokładność wykonania, jakość powierzchni obrabianej, trwałość narzędzia oraz stan techniczny obrabiarki. Duże znaczenie dla dynamiki procesu skrawania ma przede wszystkim zmienność parametrów geometrycznych warstwy skrawanej – zmienność przekroju warstwy skrawanej w funkcji kąta obrotu frezu. Ma to bezpośredni wpływ na zjawiska nierozzerwalnie towarzyszące procesowi frezowania, takie jak: drgania, siły i przemieszczenia. To z kolei przekłada się na chropowatość obrabianej powierzchni [1]. Znajomość tych zagadnień pozwala na dogłębną ocenę procesu frezowania i – co za tym idzie – dobór odpowiednich parametrów obróbki, by uzyskać zadane efekty technologiczne.

Wielkość przemieszczeń zależy od wielu czynników, a do najważniejszych należą siła całkowita i jej składowe. Pod wpływem działania sił frez odkształca się sprężystość i powoduje powstawanie błędów kształtu [3]. Znajomość składowych siły całkowitej [2] oraz sztywności układu pozwala na oszacowanie wielkości ugięcia i przemieszczeń roboczej części frezu, a dzięki temu – także chropowatości powierzchni obrabianej [4, 5]. Dlatego w pracy skupiono się na opisie tych zjawisk i relacji pomiędzy badanymi wielkościami. Ponadto przedstawiono związki przyczynowo-skutkowe dotyczące wzajemnych relacji.

Zakres i metodyka badań

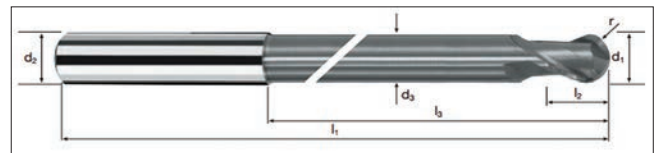
Badania miały na celu analizę przemieszczeń części roboczej frezu kulistego w trakcie obróbki zahartowanej stali przy różnych wartościach wysunięcia narzędzia z oprawki. Pomiary prowadzono dla przemieszczeń narzędzia

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.10.151>

w dwóch kierunkach: normalnym i posuwowym. Mierzono siły i drgania, a po frezowaniu zbadano parametry chropowatości obrabianej powierzchni.

Materiałem obrabianym była stal X155CrVMo12-1 (56HRC). Badania przeprowadzono na frezarce pionowej Avia FND-32F. Realizowano proces frezowania współbieżnego na sucho. Materiał zamocowano w imadle maszynowym 125 mm firmy APX. Do mocowania narzędzi wykorzystano oprawkę ER32.

Zastosowano frezy kuliste o tej samej średnicy i geometrii ostrza, ale o różnych wysięgach (długości części roboczej) (rys. 1, tablica).



Rys. 1. Frez

TABLICA. Podstawowe wymiary zastosowanych frezów

Wysięg z oprawki	d_1 mm	d_3 mm	l_1 mm	l_2 mm	l_3 mm
$L1 = 32$ mm	10	9,2	72	11	31
$L2 = 65$ mm	10	9,2	105	11	64
$L3 = 95$ mm	10	9,2	135	11	94

We wszystkich próbach przyjęto te same parametry frezowania: prędkość obrotową $n = 1400$ obr/min, średnicę efektywną $d_{ef} = 8,83$ mm, prędkość efektywną $v_{ce} = 39$ m/min, posuw na ostrze $f_z = 0,03$ mm/ostrze, dosuw osiowy $a_p = 0,3$ mm, dosuw promieniowy $a_e = 0,3$ mm, grubość warstwy skrawanej $h_{ex} = 0,22$ mm, a zmienny był jedynie wysięg narzędzia z oprawki L . Wykonano dziewięć prób – po trzy próby dla każdego wysunięcia.

Efektywną średnicę skrawania oraz grubość warstwy skrawanej przedstawiono na rys. 2. Materiał obrabiany zamocowano w taki sposób, aby jego powierzchnia znajdowała się pod kątem 45° do osi narzędzia.

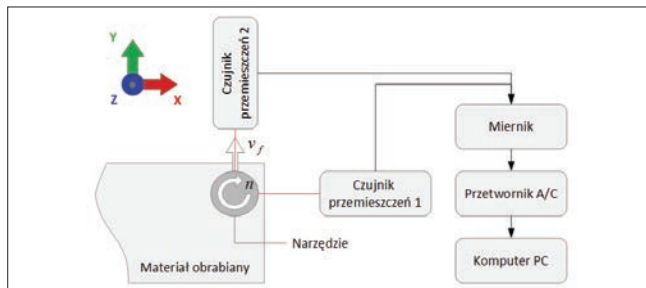
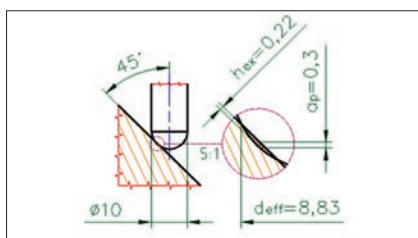
Tor pomiarowy przemieszczeń narzędzia składał się z dwóch czujników optoNCDT ILD1700-10 LL firmy Micro-Epsilon, mierzących przemieszczenia w kierunkach posuwowym i prostopadłym do kierunku posuwowego (rys. 3). Zastosowano czujniki o zakresie pomiarowym 10 mm, które pozwalały na pomiar z dokładnością do $0,5 \mu\text{m}$.

Przyspieszenia drgań oraz składowe siły całkowitej mierzono w trzech kierunkach za pomocą standardowych torów pomiarowych, z wykorzystaniem czujników piezoelektrycznych.

Do pomiaru chropowatości obrabianej powierzchni zastosowano profilografometr firmy Hommel. Pomiaru tego dokonano na odcinku o długości $l_t = 4,8$ mm. Powtarzano go pięć razy dla każdej próby.

* Dr hab. inż. Paweł Twardowski (pawel.twardowski@put.poznan.pl), prof. dr hab. inż. Adam Hamrol (adam.hamrol@put.poznan.pl), mgr inż. Natalia Znojkiwicz (natalia.w.znojkiwicz@doctorate.put.poznan.pl), dr inż. Szymon Wojciechowski (szymon.wojciechowski@put.poznan.pl) – Politechnika Poznańska

Rys. 2. Przekrój warstwy skrawanej



Rys. 3. Schemat toru pomiarowego przemieszczeń

Analiza wyników

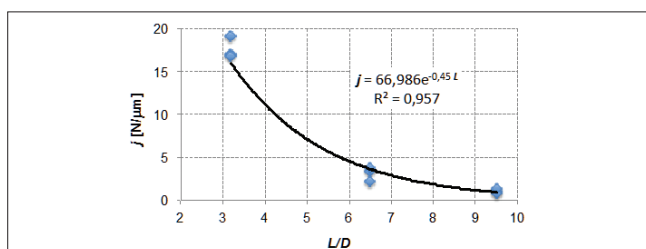
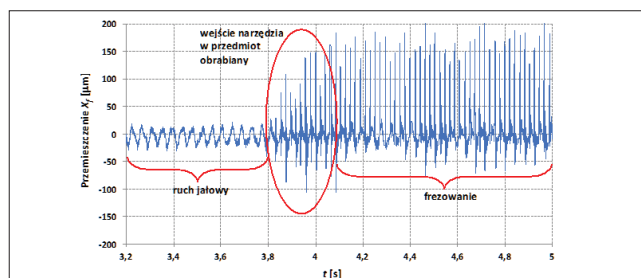
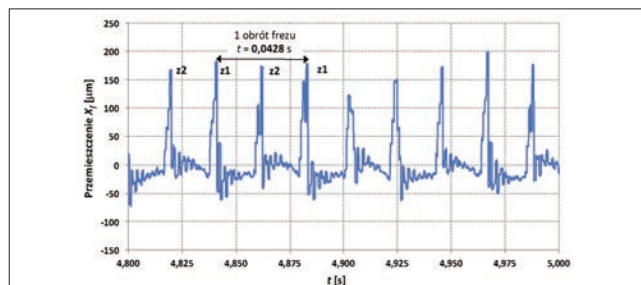
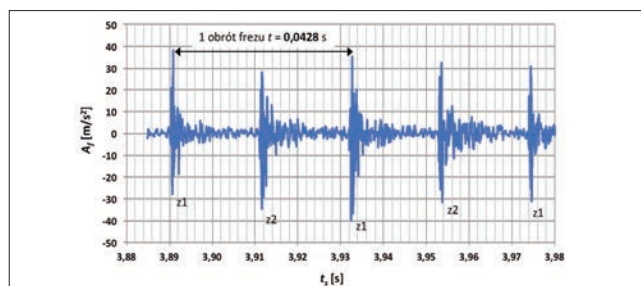
Na rys. 4 przedstawiono wykres zmian sztywności statycznej w zależności od średnicy frezu D i wysunięcia frezu z oprawki L . Przy najmniejszym wysunięciu $L_1 = 32$ mm sztywność narzędzia jest największa – ok. $j = 17$ N/ μ m. Natomiast dla maksymalnego wysunięcia $L_3 = 95$ mm sztywność statyczna jest siedemnastokrotnie mniejsza. Oznacza to, że wpływ wysunięcia frezu z oprawki na sztywność statyczną jest bardzo duży, a to z kolei ma decydujące znaczenie dla wartości przemieszczeń roboczej części frezu.

Na rys. 5 i 6 zaprezentowano zmianę przemieszczeń X_f (w kierunku posuwowym) w funkcji czasu skrawania t dla wysunięcia $L_3 = 95$ mm, przy czym na rys. 6 pokazano wycinek czasu z rys. 5.

Z przebiegów wynika, że zmiany przemieszczeń w czasie dla kierunku posuwowego mają charakter impulsowy. Jest to widoczne zwłaszcza na rys. 6, na którym zaznaczono czas trwania jednego obrotu frezu i opisano poszczególne ostrza. Podobne zależności zaobserwowano dla drugiego kierunku – posuwowego normalnego Y_{fn} . Impulsowy charakter zmian potwierdzają również przebiegi drgań, przykładowo pokazane na rys. 7.

Zastosowany frez kulisty miał dwa ostrza, czyli kąt podziałki międzyostrzowej wynosi $\psi_z = 180$. Po uwzględnieniu głębokości skrawania łąco wyznaczyć kąt pracy narzędzia, który w tym przypadku wynosi $\psi = 1,20$.

Oznacza to, że przez większość czasu ostrza nie pracują. Skoro jeden obrót frezu trwa $t = 0,0428$ s, to czas pracy dwóch ostrzy dla jednego obrotu wynosi $t = 0,00028$ s, co stanowi 0,67% czasu jednego obrotu. Taki sam charakter przebiegu mają składowe siły całkowitej. W przypadku przyspieszeń drgań wymuszenie, czyli wejście ostrza w materiał obrabiany i wyjście z niego, trwa bardzo krótko

Rys. 4. Sztywność statyczna w funkcji średnicy frezu D i wysunięcia frezu z oprawki L Rys. 5. Przebieg zmienności przemieszczeń w funkcji czasu dla wysunięcia L_3 Rys. 6. Wycinek przebiegu zmienności przemieszczeń w funkcji czasu dla wysunięcia L_3 Rys. 7. Przyspieszenia drgań dla kierunku posuwowego A_f w funkcji czasu skrawania t_s

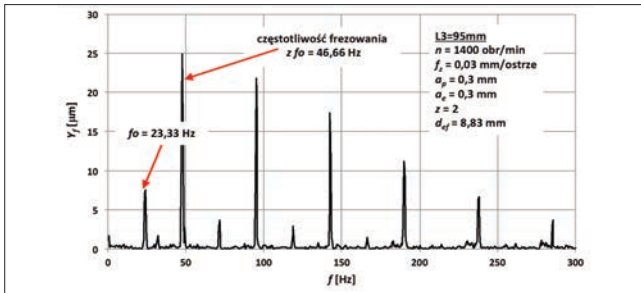
i przez 99,33% czasu potrzebnego na wykonanie jednego obrotu dominują drgania swobodne. Można to odnieść do całego procesu – tzn. dla frezowania powierzchni na drodze skrawania L_f dominują drgania swobodne i tylko chwilowo drgania wymuszone.

Ten mechanizm determinuje impulsowy charakter przemieszczeń roboczej części frezu, co jest wyraźnie widoczne na charakterystykach amplitudowo-częstotliwościowych (rys. 8), gdzie dominują dwie częstotliwości. Pierwsza to częstotliwość podstawowa, pochodząca od prędkości obrotowej $n = 1400$ obr/min (częstotliwość podstawowa $f_0 = n/60 = 23,33$ Hz). Druga, o dominującej amplitudzie, to częstotliwość procesu frezowania, czyli częstotliwość podstawowa pomnożona przez liczbę ostrzy z ($z \cdot f_0 = 46,44$ Hz). Kolejne prążki to harmoniczne tych dwóch częstotliwości.

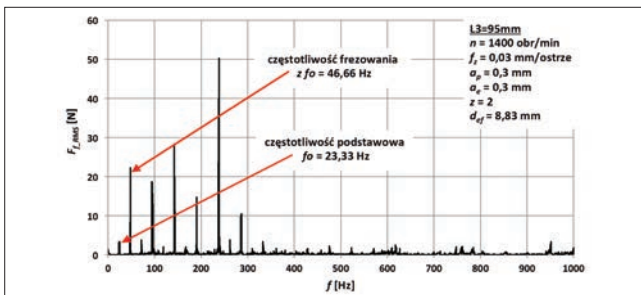
Nieco inaczej prezentują się charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe w przypadku sił (rys. 9) i drgań. Częstotliwościami dominującymi z punktu widzenia wartości amplitud są składowe harmoniczne. Nie oznacza to jednak, że zmianie uległ impulsowy charakter wymuszeń dynamicznych, który niekorzystnie wpływa na trwałość ostrza i chropowatość powierzchni obrabianej.

W celu przedstawienia wykresów fazowych przemieszczeń dla badanych przypadków wszystkie sygnały poddano filtracji cyfrowej – w ten sposób pozbyto się wysokoczęstotliwościowych składowych zakłócających przebieg przemieszczeń. Zastosowano filtr dolnoprzepustowy o nastawie $f_d = 200$ Hz, aby otrzymać przebiegi tylko od procesu frezowania. W pierwszej kolejności przeanalizowano przemieszczenia na biegu luzem – wyniki pokazano na rys. 10.

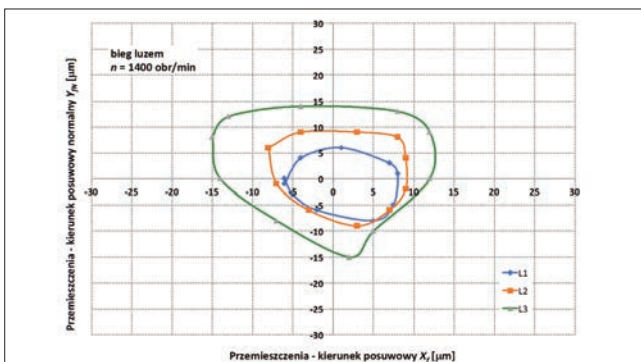
Największe wartości przemieszczeń osiągnął frez o wysunięciu $L_3 = 95$ mm i dla kierunku posuwowego była to wartość $X_f = 27$ μm , a dla kierunku posuwowego normalnego $Y_{fN} = 29$ μm . Podobne wnioski można wysunąć z analizy przemieszczenia podczas frezowania (rys. 11). Potwierdza się zależność, że im bardziej sztywne narzędzie tym mniejsze ugięcie frezu i przemieszczenia oraz – co za tym idzie – mniejsze błędy kształtu i parametry chropowatości (rys. 12). Różnice w parametrach chropowatości są bardzo duże pomiędzy frezem pracującym przy wysięgu $L_1 = 32$ mm a frezem o wysięgu $L_3 = 95$ mm – dla parametru R_{max} różnice w parametrach chropowatości są aż siedmiokrotne.



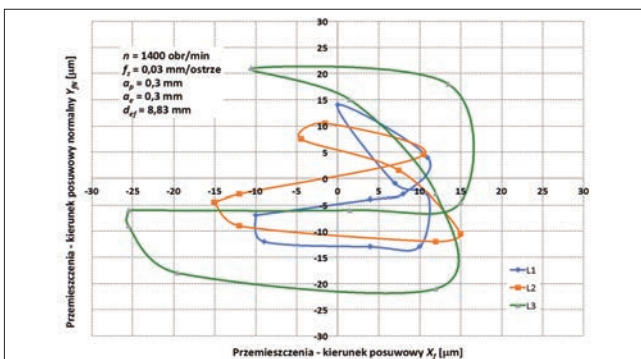
Rys. 8. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa przemieszczeń w kierunku posuwowym



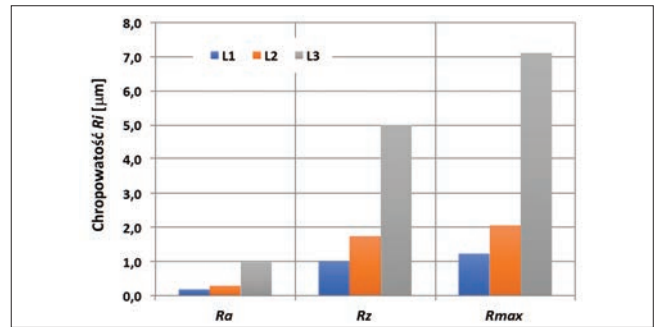
Rys. 9. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa składowej F_f



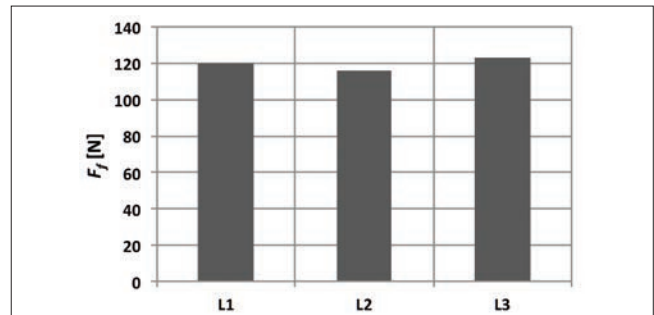
Rys. 10. Wykresy przemieszczeń na biegu luzem w układzie X-Y obrabiarki (kierunek posuwowy i posuwowy normalny)



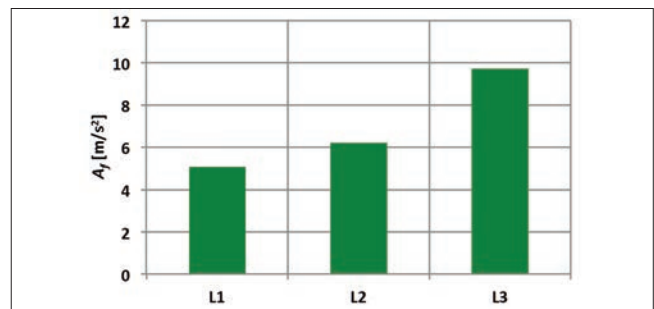
Rys. 11. Wykresy przemieszczeń podczas frezowania w układzie X-Y obrabiarki (kierunek posuwowy i posuwowy normalny)



Rys. 12. Parametry chropowatości dla badanych wysięgów frezów



Rys. 13. Składowa posuwowa dla różnych wysięgów frezów



Rys. 14. Przyspieszenia drgań dla kierunku posuwowego dla różnych wysięgów frezów

Wysunięcie frezu nie zmienia natomiast znacząco wartości badanych amplitud sił (rys. 13), ale ma istotny wpływ na poziom drgań w badanych kierunkach (rys. 14).

Podsumowanie

Zmiana sztywności frezów kulistych poprzez zmianę długości wysunięcia z oprawki ma istotny wpływ na przemieszczenia roboczej części frezu. Przekłada to się bezpośrednio na wartości amplitud drgań, a przez to – na parametry chropowatości obrabianej powierzchni. Nie ma to z kolei wpływu na wartości amplitud sił. Głębokie kieszenie należy obrabiać frezami o największej możliwej średnicy w celu zapewnienia jak największej sztywności narzędzia.

LITERATURA

- Costes J.P., Moreau V. „Surface roughness prediction in milling based on tool displacements”. *Journal of Manufacturing Processes*. 13 (2011): s. 133–140.
- Fontaine M., Devillez A., Moufki A., Dudzinski D. „Predictive force model for ball-end milling”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 46 (2006): s. 367–380.
- Kim G., Kim B., Chu C. „Estimation of cutter deflection and form error in ball-end milling processes”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 43 (2003): s. 917–924.
- Lamikiz A., Lo'pez De Lacalle L., Sa'nchez J., Salgado M. „Cutting force estimation in sculptured surface milling”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. 44 (2004): s. 1511–1526.
- Omar O., El-Wardany T., Ng E., Elbestawi M. „An improved cutting force and surface topography”. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47 (2007): s. 1263–1275.