

SPOSOBY POPRAWY WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNYCH OBRABIAREK CIĘŻKICH

Jan Kosmol^{1a}, Krzysztof Lehigh¹

¹Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska

^ajan.kosmol@polsl.pl

Streszczenie

W artykule przedstawiono wyniki modelowania metodą elementów skończonych korpusu ciężkiej frezarki. Celem modelowania było znalezienie takiej struktury obrabiarki lub zastosowanie korpusu hybrydowego, który pozwoliłby na znaczące obniżenie poziomu drgań w istniejącej obrabiarence. W istniejącej ciężkiej frezarce zaobserwowano występowanie drgań, których poziom nie gwarantuje osiągnięcia zadowalającej jakości powierzchni obrabianej i które ograniczają możliwość pełnego wykorzystania zainstalowanej mocy. Przeanalizowano możliwe do wprowadzenia zmiany konstrukcyjne oraz ewentualne wypełnienie korpusu polimerobetonem. Kryterium oceny jakości obrabiarki była odległość częstotliwości rezonansowej od częstotliwości wymuszeń dynamicznych od sił skrawania oraz obniżenie amplitudy drgań wymuszonych w obszarze częstotliwości rezonansowych.

Słowa kluczowe: korpus, polimerobeton, rezonans, MES

EXPLOITATION PROPERTIES IMPROVEMENT OF HEAVY MACHINE TOOLS

Summary

The paper presents some results of modeling of heavy machine tool frames using Finite Element Method. The main goal of the modeling was finding such a structure of the machine tool or application of hybrid frame, which make possibly on significantly decreases of vibration level in existed machine tool. In the existed heavy milling machine tool a high level of vibration was observed which makes inaccessible to achieve satisfied quality of cutting surface and which doesn't allowed to use full installed power. Possible variations of design changes were analyzed and application of hybrid frame was verified. The main criterions of machine tool quality were the distance between the resonance frequency and the excited frequency of dynamic cutting forces and decreasing of excited magnitude of displacement in the field of resonance frequency.

Keywords: frame, hybrid, polymer concrete, resonance, FEM

1. WPROWADZENIE

Obrabiarki ciężkie należą do maszyn technologicznych, które zasadniczo wytwarza się jednostkowo lub małoseryjnie. Taki sposób wytwarzania ma istotny wpływ na ich projektowanie i konstruowanie. Na ogół prototyp obrabiarki ciężkiej jest pierwszym i ostatnim egzemplarzem wytworzonym w przedsiębiorstwie. Koszt wytworzenia obrabiarki ciężkiej jest tak wysoki, że nie ma ekonomicznie uzasadnionej potrzeby wytworzenia prototypu doświadczalnego, na którym można by zweryfikować poczynione założenia i sprawdzić poprawność dzia-

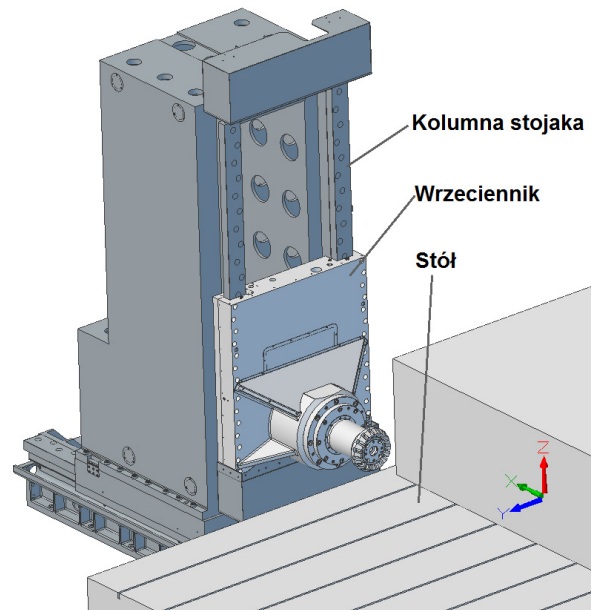
łania. Jedyną drogą do oszacowania rzeczywistych właściwości takiej obrabiarki są badania symulacyjne, najczęściej bazujące na metodzie elementów skończonych. Jednak i w tym przypadku możliwości oceny tych właściwości, jeszcze na etapie projektowania, są ograniczone, ponieważ szczegółowe informacje, np. o połączeniach, masach, sztywnościach, są możliwe do oszacowania po wykonaniu dokumentacji konstrukcyjnej wykonawczej. Wtedy jednak jest już na ogół za późno na jakieś radykalne zmiany, ponieważ przeprowadzenie

badania symulacyjnych, np. MES, także wymaga znacznej ilości czasu, a trudno oczekiwać, że producent będzie w tym czasie bezproduktywnie oczekiwał na wyniki takich badań. W rezultacie do typowych sytuacji należy wytworzenie maszyny na podstawie dokumentacji opracowanej na bazie własnych doświadczeń i dotychczasowych, znanych rozwiązań technicznych. Nierzadko tak wytworzony egzemplarz maszyny nie zawsze spełnia poczynione założenia, a czasami uniemożliwia jego użytkowanie. Tak się dzieje, kiedy w projektowanej maszynie zachodzi konieczność zastosowania nowych, dotąd niesprawdzonych praktycznie rozwiązań konstrukcyjnych. W odniesieniu do obrabiarek taka sytuacja występuje coraz częściej za sprawą ogólnej tendencji rozwojowej tych maszyn, spotykanej pod akronimem HSC (High Speed Cutting). Technologia HSC wiąże się ściśle ze znacznie wyższymi parametrami kinematycznymi (prędkości obrotowe wrzecion, prędkości posuwu suportów), które to parametry przyczyniają się do występowania zjawisk dotąd niedostrzegalnych w obrabiarkach LSC (Low Speed Cutting). Należą do nich przede wszystkim drgania wymuszone o częstotliwościach nawet kilkakrotnie wyższych od dotychczas spotykanych (proporcjonalnie do prędkości obrótowych), znacznie większe ilości ciepła powstające w parach kinematycznych, takich jak łożyska, prowadnice, siły i moce skrawania. Niejednokrotnie powstaje sytuacja, kiedy dopiero podczas użytkowania obrabiarki ujawniają się skutki obróbki HSC, które dyskwalifikują maszynę do dalszego użytkowania. Wtedy producent maszyny staje przed problemem, który został zasygnalizowany w tytule artykułu: sposoby poprawy właściwości eksploatacyjnych obrabiarek ciężkich. Trzeba od razu zaznaczyć, że do rzadkości należy sytuacja, w której można dokonać radykalnej zmiany istniejącej konstrukcji. W niniejszym artykule przedstawiono na przykładzie jednej obrabiarki ciężkiej możliwości, jakie stoją przed użytkownikiem lub producentem obrabiarki. Przedstawiono to na przykładzie pewnych działań symulacyjnych i eksperymentalnych.

2. OBIEKT BADAŃ

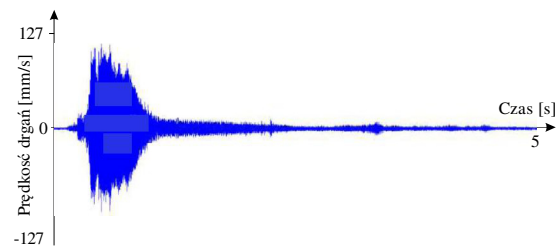
Obiektem badań, który znalazł się w sytuacji niedostatecznych właściwości eksploatacyjnych, była ciężka frezarka, przeznaczona do obróbki przedmiotów o dużej twardości, z dużą wydajnością skrawania (z dużymi przekrojami warstwy skrawanej). Na rys. 1 przedstawiono poglądowy model CAD takiej maszyny.

Jest to frezarka o bramowej konstrukcji stojaka, w której wrzeciennik wykonuje ruchy robocze w kierunku osi Z (ruch pionowy), a przedmiot spoczywa na stole, wykonując ruch posuwu w osi Y. Stojak wraz z wrzeciennikiem wykonuje ruch ustawczy w kierunku osi X.



Rys. 1. Model CAD ciężkiej frezarki

Cechą wyróżniającą tę obrabiarkę od innych, konstrukcyjnie podobnych, są warunki skrawania: głębokość skrawania do 10 mm, posuw ponad 5 mm, posuw na ostrze ok. 0,45 mm a przekrój wióra prawie 10 mm². Przykładowy fragment przebiegu procesu skrawania z takimi parametrami obrazuje rys. 2.

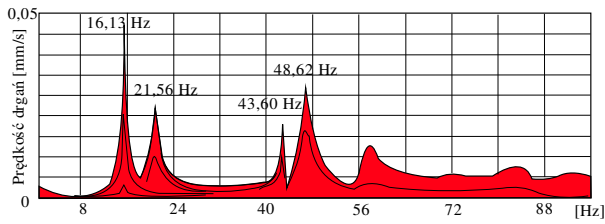


Rys. 2. Prędkość drgań w górnej strefie kolumny [9]

Przykładowy przebieg prędkości drgań mierzony w górnej strefie stojaka w kierunku Y (kierunek ruchu przedmiotu obrabianego) obrazuje problem, o którym wspomniano wcześniej. Poziom drgań w pewnym obszarze obróbki gwałtownie rośnie, sygnalizując powstanie drgań samowzbudnych. Jest on kilkanaście razy większy niż w obszarach, które zakwalifikowano jako „dobra jakość”.

W takiej, jak na rys. 2 sytuacji, powstaje pytanie: co można zrobić, aby uniknąć podobnego stanu procesu skrawania?

Dysponując pomiarami jak na rys. 2, można, wykorzystując przekształcenie FFT, wyznaczyć charakterystykę widmową, która umożliwi przynajmniej identyfikację częstotliwości dominujących w sygnale pomiarowym. Na rys. 3 przedstawiono przykładowy wynik takiego przekształcenia w postaci charakterystyki widmowej.



Rys. 3. Charakterystyka widmowa uzyskana na podstawie zmierzonych prędkości drgań w kierunkach X, Y, Z

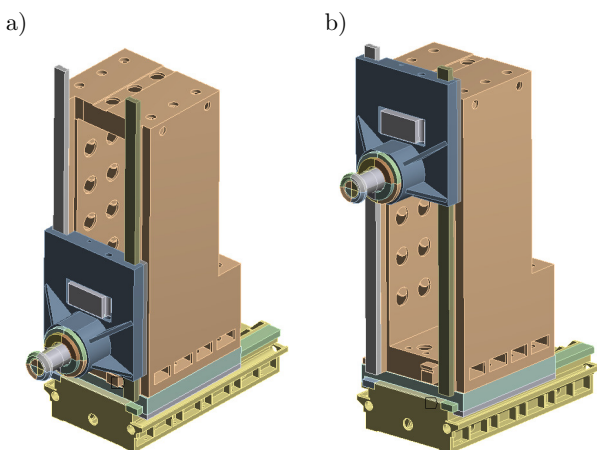
Z charakterystyki na rys. 3 można wstępnie wyznaczyć częstotliwości, z którymi drgają zespoły obrabiarki, będące w rezonansie lub w stanie drgań samowzbudnych. Mogą one posłużyć do ewentualnej weryfikacji modelu MES. W tym przykładzie są to przede wszystkim: 16,13 - 21,56 - 43,60 - 48,62 Hz.

3. MODELOWANIE OBIEKTU BADAŃ

Odpowiedź na wyżej postawione pytanie wymaga modelowania matematycznego, w tym przykładzie modelowania MES. W pierwszym etapie tego modelowania należy uwiarygodnić taki model, wyznaczając cechy drgań własnych i odnosząc je do zidentyfikowanych na rys. 3. To pozwoli na wstępną ocenę modelu.

Z uwagi na wymiary geometryczne obiektu, jego masę, ruchliwość i czas, jaki ma do dyspozycji badacz, model musi zostać znacząco uproszczony. W maszynach klasy obrabiarki najtrudniejszym zagadnieniem jest modelowanie kontaktów, zwłaszcza zespołów ruchomych (przesuwnych). Takich zespołów jest zazwyczaj kilka albo i kilkanaście. W pierwszym podejściu do modelowania MES pomija się modelowanie kontaktów, również z uwagi na bardzo długi czas obliczeń. Dopiero w następnych krokach, kiedy rozbieżności pomiędzy wynikami symulacji a np. wynikami eksperymentu są zbyt duże, model się udokładnia.

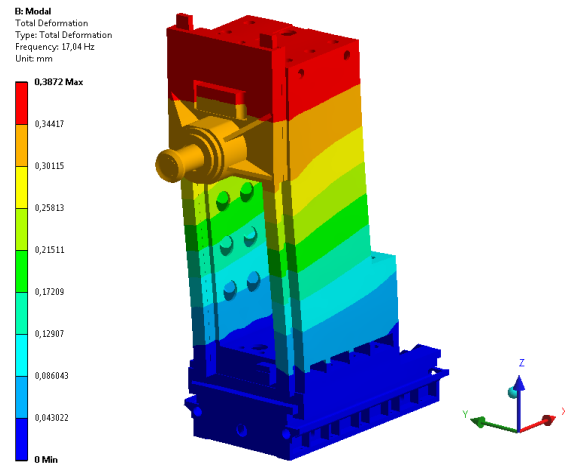
Badania symulacyjne prowadzono w systemie Ansys. Na rys. 4 przedstawiono model geometryczny MES obiektu badań.



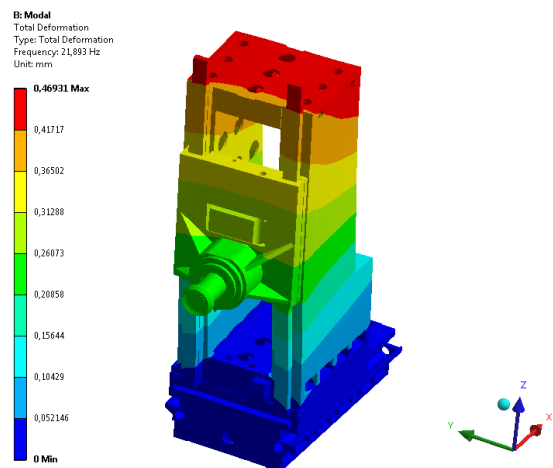
Rys. 4. Model geometryczny MES obiektu badań z wrzeciennikiem w dolnym położeniu: a) dolnym, b) górnym

Z uwagi na ruchliwość wrzeciennika badania symulacyjne należy prowadzić dla kilku wariantów położenia wrzeciennika (rys. 4).

a)



b)



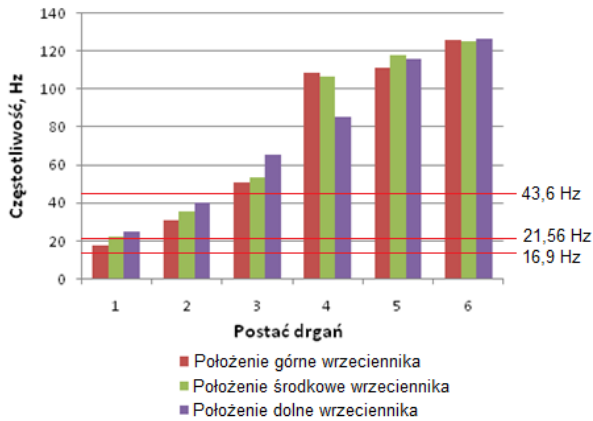
Rys. 5. Przykładowe pierwsze postaci drgań własnych: wrzeciennik w położeniu: a) górnym 17,0 Hz, b) środkowym 21,9 Hz

Warunki brzegowe zdefiniowano jako połączenia sztywne w obszarach kontaktu korpusu z łóżem oraz wrzeciennika z korpusem. Natomiast obciążenie od sił skrawania przyłożono w postaci siły skupionej i momentu na wrzecionie.

Ponieważ ocenę poprawności modelowania przeprowadzono na podstawie charakterystyk widmowych, w dalszym ciągu wyznaczono postaci drgań własnych i ich częstotliwości. Na rys. 5 przedstawiono przykładowe postaci drgań własnych dla wrzeciennika w położeniu górnym i środkowym.

Na podstawie takich badań, jak przedstawionych na rys. 5, zidentyfikowano 6 pierwszych postaci drgań dla trzech położenia wrzeciennika: górnego, środkowego i dolnego. Na rys. 6 zobrazowano rozkład częstotliwości drgań własnych. Posłużył do oceny modelu MES obiektu badań.

Z porównania z wynikami badań eksperymentalnych (rys. 3) stwierdzono, że dużą zgodność modelowania i eksperymentu dają pierwsze postaci drgań w górnym (17,0 Hz - symulacja i 16,9 Hz - eksperyment) i środkowym (21,9 Hz - symulacja i 21,56 Hz - eksperyment) położeniu wrzeciennika, natomiast w dolnym położeniu takiej zgodności nie ma.



Rys. 6. Rozkład pierwszych 6 częstotliwości drgań własnych; liniami ciągłymi oznaczono częstotliwości drgań występujących na rys. 3.

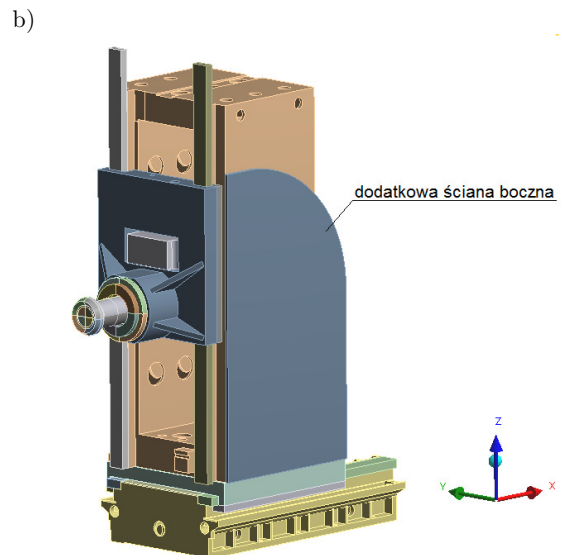
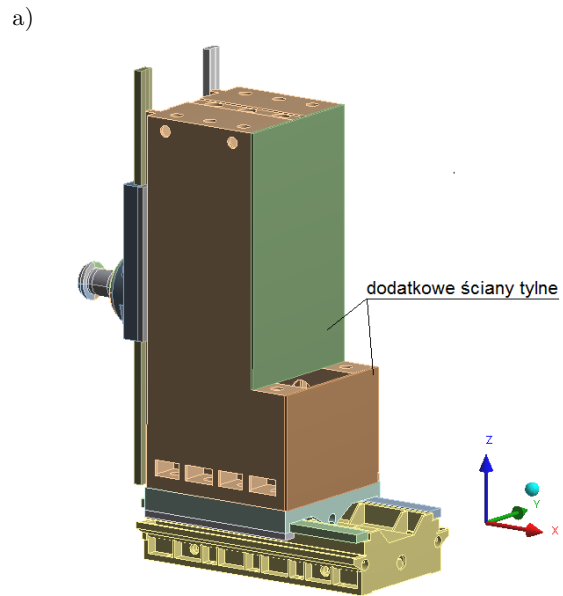
Ponieważ nadmierne drgania (rys. 2) powstawały dla górnego i środkowego położenia wrzeciennika, uznano, że model MES może posłużyć do dalszej analizy i oceny ewentualnych zmian konstrukcyjnych.

4. SPOSOBY POPRAWY WŁAŚCIWOŚCI EKSPLOATACYJNYCH

W sytuacji, kiedy obiekt (obrabiarka) już istnieje i została uruchomiona możliwość zmiany (poprawy), właściwości eksploatacyjnych (w tym przypadku dynamicznych) jest niewiele, mianowicie:

- wprowadzenie takich zmian konstrukcyjnych, które nie zmieniają konstrukcji oryginalnej, a są możliwe do praktycznego wdrożenia,
- zastosowanie środków technicznych podnoszących właściwości tłumiące, czyli intensywniej rozpraszające energię drgań.

Z dotychczasowych badań własnych MES (niepublikowanych), zwłaszcza odkształceń statycznych pod działaniem sił symulujących siły skrawania, wynika, że „słabym” ogniwem jest struktura korpusu w płaszczyźnie ZY. Sztywność statyczna w kierunku Y jest ok. 5 – 6 razy mniejsza niż w kierunku X, stąd propozycja wzmocnienia struktury korpusu w płaszczyźnie ZY. Na rys. 7 przedstawiono dwa sposoby rekonstrukcji korpusu.



Rys. 7. Sposoby rekonstrukcji korpusu w postaci dodatkowej ściany: a) tylnej, b) bocznej

W celu oceny skuteczności rekonstrukcji korpusu przeprowadzono analizę modalną modelu MES korpusu. W tabl. 1 przedstawiono częstotliwości drgań własnych uzyskane z analizy modalnej modelu MES po rekonstrukcji korpusu, jak na rys. 7a.

Tab. 1. Częstotliwości drgań własnych uzyskane z analizy modalnej modelu MES po rekonstrukcji korpusu jak na rys. 7a.

Postać drgań	Częstotliwość drgań własnych, Hz		
	Położenie wrzeciennika		
	górne	środkowe	dolne
1	20,2	25,1	30,1
2	30,4	34,7	38,6
3	62,8	65,4	75,4
4	121,5	112,2	89,8
5	123,4	130,5	127,8
6	138,2	131,6	143,0

Rekonstrukcja wg rys. 7a prowadzi do podwyższenia częstotliwości drgań własnych, rzędu 18 – 20%. Podobnie rzecz wygląda dla rekonstrukcji wg rys. 7b.

Natomiast na rys. 8 przedstawiono charakterystyki widmowe uzyskane z analizy modalnej modelu MES. Na rysunku zaznaczono także obszar wymuszeń dynamicznych wynikający z narzędzia skrawającego, tj. z jego prędkości obrotowej i liczby ostrzy oraz z obrotów silnika napędowego. Wniosek z tej ilustracji jest dosyć oczywisty: drgania rezonansowe korpusu, zwłaszcza o częstotliwości 20,5 Hz i 34,0 Hz, znajdują się w obszarze wymuszeń, wywołanych dynamicznymi zmianami siły skrawania od narzędzia skrawającego (frezu), tj. od jego prędkości obrotowej i liczby ostrzy oraz od prędkości obrotowej wału silnika.

Ewentualna rekonstrukcja korpusu jak na rys. 7 w świetle analizy MES przeprowadzonej dla zrekonstruowanego korpusu pozwala na następujące sformułowania:

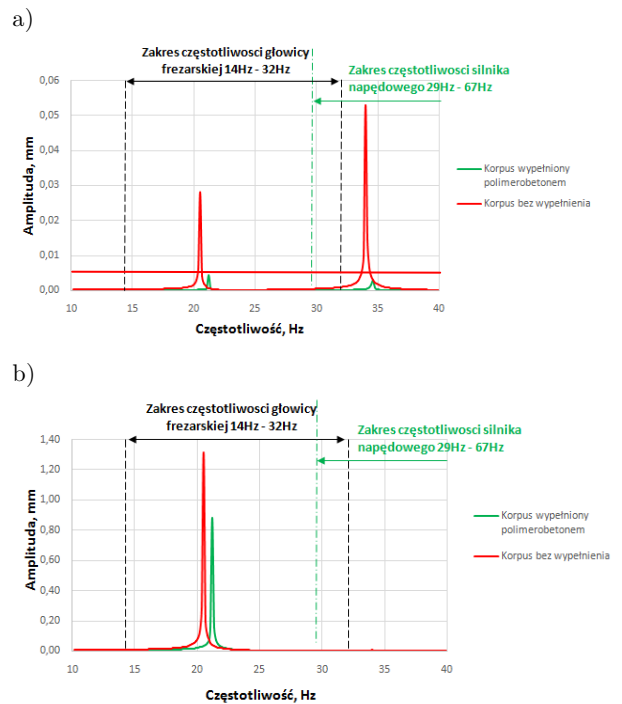
- rekonstrukcja wg rys. 7a prowadzi do poniesienia pierwszych częstotliwości drgań własnych: 20,2 Hz (położenie górne), 25,1 Hz (położenie środkowe),
- rekonstrukcja wg rys. 7b prowadzi do poniesienia pierwszych częstotliwości drgań własnych do wartości 22,7 Hz (położenie środkowe).

Porównując te wartości częstotliwości z rys. 3, można stwierdzić, że taka rekonstrukcja prowadzi do „odsunięcia się” od częstotliwości rezonansowych, co powinno skutkować obniżeniem poziomu drgań w trakcie pracy obrabiarki.

Z drugiej jednak strony, z powodu „bliskiego sąsiedztwa” pierwszej i drugiej postaci drgań (rys. 3), podwyższenie pierwszej częstotliwości z 17,0 Hz (dla konstrukcji oryginalnej) do 20,2 Hz (dla konstrukcji wzmocnionej) niekoniecznie przyczyni się do zmniejszenia poziomu drgań obrabiarki w trakcie jej pracy. Dlatego też taka propozycja poprawy właściwości dynamicznych nie wydaje się najszybsza.

Druga droga poprawy właściwości dynamicznych, z zastosowaniem środków technicznych podnoszących właściwości tłumiące, wydaje się bardziej realna. W ostatnich latach spotyka się coraz więcej prób zastosowania polimerobetonu w konstrukcjach korpusowych [1],[2],[3],[4],[6],[7],[8]. Plusem tego rozwiązania jest radykalne poprawienie właściwości rozpraszania energii drgań. Kosmol [5] przeprowadził badania symulacyjne MES dla klasycznego modelu belki suportowej tokarki karuzelowej, porównując m.in. właściwości tłumiące tradycyjnego korpusu żeliwnego i tzw. korpusu hybrydowego, tj. korpusu stalowego wypełnionego polimerobetonem. Można mówić o kilkakrotnym zmniejszeniu poziomu drgań dla tego ostatniego. Również technolo-

giczny aspekt takiego rozwiązania umożliwia jego zastosowanie w już istniejących obrabiarkach (korpusach).



Rys. 8. Charakterystyki widmowe korpusu w kierunku osi X (a) i Y (b): **Amplituda** – dotyczy przemieszczeń drgań, **Częstotliwość** – dotyczy wymuszeń od prędkości obrotowej wrzeciona i liczby ostrzy

W ramach prowadzonych badań symulacyjnych MES stojaka frezarki (rys. 1) wyznaczono charakterystyki dynamiczne korpusu wypełnionego polimerobetonem. Na rys. 8 przedstawiono charakterystyki widmowe korpusu w kierunku osi X i Y, niewypełnionego i wypełnionego polimerobetonem w postaci amplitudy przemieszczeń, spowodowanych dynamiczną siłą skrawania 1 kN.

Wpływ efektywniejszego tłumienia w korpusie wypełnionym polimerobetonem widać przede wszystkim w kierunku osi X (rys. 8a), gdzie amplituda drgań w rezonansie zmalała ok. 6-krotnie. Poziomą linią na rys. 8a zaznaczono odkształcenia wywołane statycznie działającą siłą skrawania 1 kN. Wydaje się, że w pewnych sytuacjach ta droga poprawy właściwości dynamicznych jest najbardziej efektywna.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono pewne praktyczne metody poprawy właściwości dynamicznych istniejących obrabiarek, których właściwości eksploatacyjne są niezadowalające, a nawet znacząco ograniczone odnośnie do możliwości wykorzystania zainstalowanych mocy i parametrów kinematycznych. Takie sytuacje mogą mieć miejsce zwłaszcza w przypadku produkcji jednostkowej, np. obrabiarek ciężkich.

Punktem wyjścia do podjęcia skutecznych działań naprawczych jest jakaś informacja o stanie dynamicz-

nym obrabiarki, np. charakterystyka widmowa w procesie skrawania w obszarze zbyt dużych drgań. Bez takiej wiedzy wybór metody poprawy właściwości dynamicznych jest w zasadzie nieefektywny.

Metoda rekonstrukcji jest zazwyczaj trudniejsza i nie zawsze efektywna. Jej zastosowanie istotnie zależy od relacji obszaru wymuszeń dynamicznych i częstotliwości rezonansowych obrabiarki. Tak jak w rozpatrywanym przypadku jej zastosowanie nie mogło przynieść znaczącej poprawy w działaniu obrabiarki.

Metoda podniesienia właściwości tłumiących jest na ogół zawsze efektywna, jakkolwiek nie zawsze wystarczająco. Znaczny wzrost tłumienia pozwala na działanie obrabiarki w warunkach występowania rezonansu. Do oceny stopnia efektywności takiej metody pozostaje w zasadzie tylko MES. Ocena na drodze symulacji komputerowej stopnia zmniejszenia amplitudy drgań wymuszonych w obszarach częstotliwości rezonansowych może dać wskazówkę odnośnie do praktycznego zastosowania tej symulacji.

W rozpatrywanym przypadku ciężkiej frezarki wyniki symulacji były na tyle obiecujące, że zarekomendowano jej praktyczne zastosowanie. Wprawdzie nie ma zbyt

wielu wyników badań z zastosowania polimerobetonu (dobrym przykładem ich zastosowania są informacje zawarte w [2] i [3], dotyczące poprawy własności dynamicznych w łożu obrabiarki), ale jakość przedmiotu obrabianego poprawiła się na tyle, że obrabiarka jest aktualnie wykorzystywana w taki sposób, tzn. z takimi parametrami obróbki, dla których została zaprojektowana.

Do zalet metody należy także stosunkowo prosta technicznie metoda jej aplikacji, co w obrabiarkach ciężkich staje się najważniejszym kryterium wyboru metody.

Istnieje jeszcze jedna metoda uniknięcia niekorzystnych skutków nadmiernych drgań, tj. zmiana parametrów obróbki w taki sposób, aby wymuszenia znalazły się poza strefą rezonansową. Można np. tak zmienić prędkość obrotową wrzeciona, albo liczbę ostrzy głowicy frezarskiej, aby częstotliwość drgań wymuszonych znacząco różniła się od częstotliwości rezonansowych. Przeciwni takiej metodzie są użytkownicy obrabiarki, ponieważ na ogół wiąże się to z obniżeniem wydajności obróbki. Nie po to zamawiano obrabiarkę o odpowiednio dużej mocy, aby później z niej nie skorzystać.

Literatura

1. Bedi R., Chandra R., Singh S.: Mechanical properties of polymer concrete. "Journal of Composites" 2013, p. 1-12.
2. Kępczak N., Pawłowski W., Błażejowski W.: The study of the mechanical properties of the mineral coat material. "Archives of Mechanical Technology and Automation" 2014, Vol. 34, No. 2, p. 25-32.
3. Kępczak N., Pawłowski W.: Teoretyczne badania właściwości dynamicznych łoż obrabiarki wykonanych z żeliwa i hybrydowego połączenia żeliwa z odlewem mineralnym. „Mechanik” 2015, nr 8-9, s. 199-203.
4. Kosmol J.: Zastosowanie polimerobetonów w budowie korpusów obrabiarek. „Przetwórstwo Tworzyw” 2017, nr 1 (175), s. 33-45.
5. Kosmol J.: Modelowanie hybrydowych korpusów obrabiarek. „Modelowanie Inżynierskie” 2017, nr 62, t. 31, s. 49-55.
6. Piratelli A., Levy F.: Behavior of granite-epoxy composite beams subjected to mechanical vibrations. "Materials Research" 2010, Vol. 13, No. 4, p. 1-10.
7. Prażmo J., Sobczak R.: Analiza możliwości wykorzystania polimerobetonu, jako materiału do budowy korpusów obrabiarek wodno-ściernych. Waterjet.org.pl.
8. Salje E., Gerloff H., Meyer J.: Comparison of machine tool elements made of polymer concrete and cast iron. "Annals of the CIRP" 1988, Vol. 37/1/, p. 381-384.
9. Vibration analysis services. www.4XDiagnosics.com.



Artykuł dostępny na podstawie licencji Creative Commons Uznanie autorstwa 3.0 Polska.
<http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/pl>