

Otrzymano: 08 czerwca 2018 / Zaakceptowano: 15 lipca 2018 / Zamieszczono na WWW: 20 grudnia 2018

*hybrydowe korpusy obrabiarek, polimerobeton,
metoda elementów skończonych, analiza modalna*

Paweł CAŁKA^{1*}
Krzysztof LIS¹

BADANIA WŁAŚCIWOŚCI DYNAMICZNYCH BELEK Z POLIMEROBETONU W KONTEKŚCIE HYBRYDOWYCH KORPUSÓW OBRABIAREK

W artykule przedstawiono badania związane z hybrydowymi korpusami obrabiarek. Badaniom doświadczalnym – eksperymentalnej analizie modalnej został poddany profil stalowy o przekroju prostokątnym, profil stalowy wypełniony polimerobetonem (tworząc hybrydowe połączenie) oraz odlew wykonany w całości z polimerobetonu. Następnie opracowano modele CAD reprezentujące obiekty rzeczywiste i przeprowadzono teoretyczną analizę modalną wykorzystując metodę elementów skończonych oraz oprogramowanie ANSYS. Uzyskane wyniki przeprowadzonych analiz zostały ze sobą porównane i omówione.

1. WPROWADZENIE

Głównym zadaniem korpusu obrabiarki jest spojenie wszystkich elementów maszyny w jedną całość. Korpus obrabiarki musi zapewnić całej maszynie i jej poszczególnym elementom odpowiednią funkcjonalność. Ma bardzo istotny wpływ na parametry całej maszyny. Jest elementem największym masowo i objętościowo. W przypadku np. obrabiarek ciężkich korpus ma decydujący wpływ na wagę obrabiarki. Ma również bardzo istotny wpływ na ostateczną sztywność maszyny i jej zdolność do tłumienia drgań powstających podczas obróbki co z kolei przekłada się na wydajność maszyny i jej możliwości obróbcze. Dlatego korpus obrabiarki jest jednym z najważniejszych elementów całej maszyny.

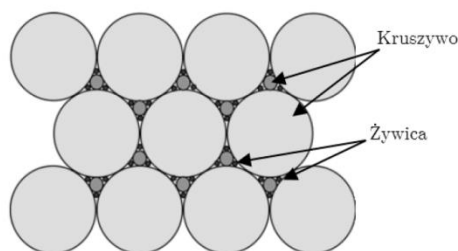
Obróbka HSC (high speed cutting) polega na obróbce elementów przy wykorzystaniu bardzo dużych prędkości obrotowych wrzeciona (nawet do 100 000 obr/min). Ten rodzaj obróbki cechuje się bardzo dużą wydajnością, powstawaniem mniejszych sił skrawania czy lepszym rozpraszaniem ciepła towarzyszącemu obróbce. Uzyskanie odpowiednich parametrów obróbki, w tym dużych posuwów czy stosunkowo małych głębokości skrawania jest możliwe do realizacji. Trudności pojawiają się w utrzymaniu odpowiedniej stabilności całego procesu obróbki, który w dużej mierze jest związany z dynamiką procesu obróbki i właściwościami dynamicznymi obrabiarki. Drgania powstające podczas obróbki mogą mieć bardzo negatywny wpływ na obrabiany przedmiot i narzędzie, co

¹ Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Budowy Maszyn, Gliwice,

* E-mail: pawel.calka@polsl.pl

w konsekwencji może doprowadzić do uszkodzenia przedmiotu obrabianego lub narzędzia. Dlatego od korpusów obrabiarek wymaga się coraz lepszych właściwości dynamicznych ze względu na zapewnienie odpowiedniej stabilności procesu obróbki [1, 2, 3].

W większości przypadków korpusy obrabiarek wykonuje się jako odlewy żeliwne lub stalowe konstrukcje spawane. Korpusy żeliwne cechują się bardzo dobrymi właściwościami tłumienia drgań, z kolei korpusy wykonane jak konstrukcje stalowe – wysoką sztywnością. Na rynku można zauważyć coraz większe zainteresowanie korpusami wykonanymi jako hybrydowe połączenie profili stalowych i polimerobetonu lub w całości wykonane jako korpusy żywiczne. Polimerobeton nazywany inaczej betonem żywicznym, w którym w porównaniu do zwykłego betonu spoiwo w postaci cementu zostało zastąpione żywicą, wykazuje bardzo dobre właściwości tłumienia drgań [4, 5]. Dane materiałowe polimerobetonu w odniesieniu do stali i żeliwa przedstawiono w tab. 1 pochodzą z pracy [3]. Dokładne parametry polimerobetonu w dużej mierze zależne są od rodzaju zastosowanej żywicy czy dokładnej zawartości i gradacji zastosowanego kruszywa [1, 2, 3]. Budowę polimerobetonu pokazano na rys. 1 [6].



Rys. 1. Budowa polimerobetonu [6]
Fig. 1. Structure of mineral cast [6]

Tabela 1. Dane materiałowe [3]
Table 1. Materials data [3]

Właściwości	Jednostka	Polimerobeton	Stal	Żeliwo
Moduł Younga	kN/mm ²	30–40	210	80–120
Wytrzymałość na rozciąganie	N/mm ²	13–15	300	200
Wytrzymałość na ściskanie	N/mm ²	140–170	250–1200	350–450
Gęstość	g/cm ³	2,1–2,4	7,85	7,2
Logarytmiczny dekrement tłumienia drgań		0,02–0,03	0,002	0,003
Współczynnik Poissona		0,25	0,3	0,26

Jedną z najbardziej popularnych metod badania dynamiki układów mechanicznych jest analiza modalna. Analiza modalna pozwala na wyznaczenie częstotliwości drgań własnych i odpowiadających im postaci drgań. Można wyróżnić następujące metody analizy modalnej:

- teoretyczna – podstawą tej metody jest rozwiązanie zagadnienia własnego dla przyjętego modelu strukturalnego stosując zazwyczaj metodę elementów skończonych i odpowiednie oprogramowanie,

- eksperymentalna – polega na wymuszeniu ruchu obiektu np. za pomocą młotka modalnego (metoda impulsowa) – dokonuje się pomiaru wymuszenia i odpowiedzi na zadane wymuszenie,
- eksploatacyjna – metoda bardzo zbliżona do metody eksperymentalnej z różnicą wynikającą z sygnału wymuszającego, w tym przypadku są to np. rzeczywiste siły działające na obiekt podczas jego pracy.

Teoretyczna analiza modalna zawsze wymaga weryfikacji uzyskanych wyników metodą eksperymentalną. Z reguły należy spodziewać się większych lub mniejszych rozbieżności spowodowanych między innymi uproszczeniami w modelowaniu. Są to przede wszystkim idealizujące założenia materiałowe nieuwzględniające tłumienia i nieliniowości, uproszczenia geometryczne modelu nieuwzględniające wszystkich szczegółów, problematyczne w modelowaniu pary kinematyczne i kontakty, które często sprowadzane są do idealnych oraz wiele innych. Umiejętność posługiwania się wspomnianymi uproszczeniami tak, aby miały one znikomy wpływ na jakość przeprowadzonych analiz wymaga doświadczenia i wiedzy, którą można zdobyć jedynie prowadząc badania modelowe zweryfikowane eksperymentem. Celem obydwu analiz jest uzyskanie informacji na temat częstotliwości i postaci drgań własnych obiektów. Ponadto analiza modalna eksperymentalna zwraca jeden parametr więcej w porównaniu z analizą modalną przeprowadzoną z zastosowaniem MES. Jest nim współczynnik tłumienia związany z określoną postacią drgań własnych.

2. EKSPERYMENTALNA ANALIZA MODALNA

Możliwość prostej weryfikacji cech korpusów wykonanych w różnych technologiach sugeruje stosowanie jako obiekt badań elementów o prostych kształtach. Jako pierwszy obiekt zaproponowano belkę imitującą belkę suportową wykonaną jako prostopadłościan. Początkowo badaniom eksperymentalnym został poddany pusty profil stalowy o przekroju prostokątnym oraz identyczny profil stalowy, który został wypełniony polimerobetonem. Wymiary profili wynosiły 120x60 mm, grubość ścianki 3 mm a długość 1400 mm. Następnie wykonano odlew z polimerobetonu o identycznych wymiarach jak badane profile.

Waga pustego profilu stalowego wynosiła około 11,5 kg, profilu wypełnionego polimerobetonem 31 kg, natomiast waga odlewu z samego polimerobetonu 23,5 kg. Badane profile pokazano na rys. 2. Zastosowany polimerobeton składał się żywicy epoksydowej oraz kruszywa o różnej gradacji (0,1 – 5 mm).

Eksperymentalna analiza modalna została przeprowadzona wykorzystując swobodne zawieszenia obiektów. Dzięki temu eliminuje się wpływ utwierdzenia i sztywności kontaktowych na wyniki analiz.

Badania przeprowadzono przy dwóch różnych sposobach zawieszenia oraz dwóch różnych kierunkach wymuszenia. Aby imitować swobodne zawieszenie, kierunek wymuszenia jest prostopadły do kierunku działania cięgien podtrzymujących belkę. Sposoby zawieszenia belek i kierunki wymuszenia pokazano na rys. 3.



Rys. 2. Badane profile – profil stalowy, profil stalowy wypełniony polimerobetonem oraz odlew z polimerobetonu
Fig. 2. Steel profile, steel profile filled up with polymer concrete and polymer concrete cast

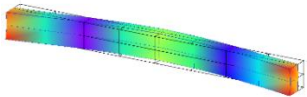
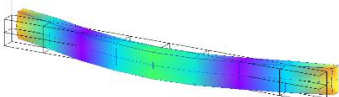
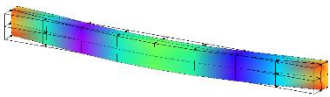


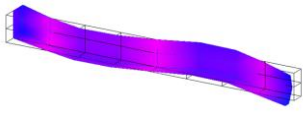
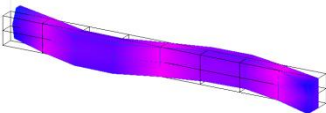
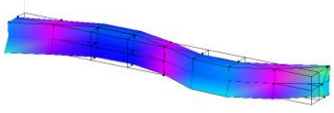
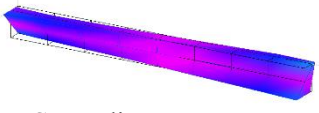
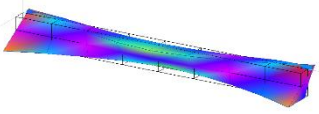
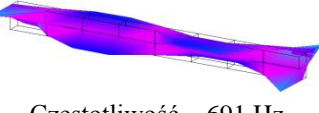
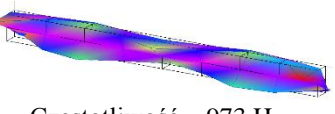
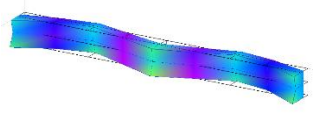
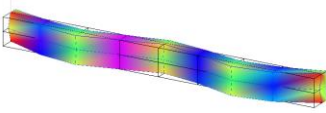
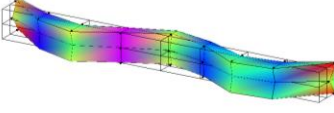
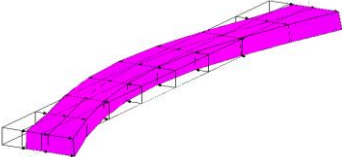
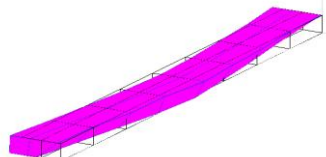
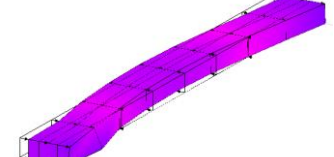
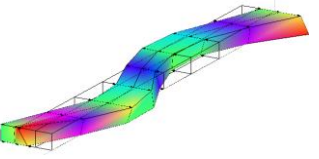
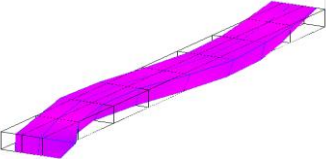
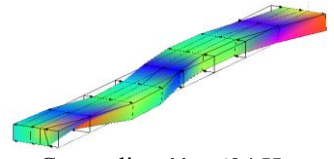
Rys. 3. Swobodne zawieszenie belki, które umownie nazwano jako „poziome” (rysunek po lewej) oraz „pionowe” (rysunek po prawej), strzałka wskazuje kierunek wymuszenia
Fig. 3. Two methods of free suspensions of the beams, the arrow indicates the direction of forced vibration

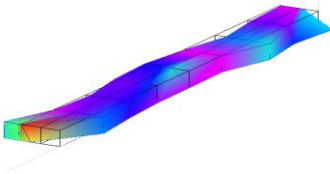
Eksperymentalna analiza modalna została przeprowadzona wykorzystując młotek modalny – metodę impulsową. Badania przeprowadzono wykorzystując oprogramowanie „Zintegrowany system do badań obrabiarek w warunkach przemysłowych” opracowany w Katedrze Budowy Maszyn Politechniki Śląskiej [7]. Wynikiem przeprowadzonych badań było uzyskanie postaci drgań własnych z odpowiadającymi im częstotliwościami oraz procentowymi współczynnikami tłumienia. Uzyskane wyniki badań zostały przedstawione w tabeli 2 – część wyników pochodzi z [8].

Tabela 2. Uzyskane częstotliwości drgań własnych, odpowiadające im formy drgań oraz współczynniki tłumienia uzyskane z zastosowaniem eksperymentalnej analizy modalnej [8]

Table 2. Obtained natural frequencies, their forms and damping coefficients from experimental modal analysis [8]

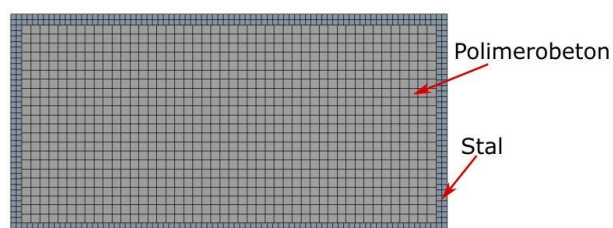
Zawieszenie pionowe			
Postać drgań	Profil stalowy	Profil stalowy wypełniony polimerobetonem	Odlew z polimerobetonu
Pierwsza postać drgań giętnych	 Częstotliwość – 228 Hz Tłumienie 0,17%	 Częstotliwość – 164 Hz Tłumienie 0,25%	 Częstotliwość – 115 Hz Tłumienie 0,86%

Druga postać drgań giętych	 Częstotliwość – 761 Hz Tłumienie 0,08%	 Częstotliwość – 444 Hz Tłumienie 0,25%	 Częstotliwość – 315 Hz Tłumienie 0,8%
Pierwsza postać drgań skrętnych	 Częstotliwość – 511 Hz Tłumienie 0,04%	Brak – postać silnie stłumiona lub poza zakresem częstotliwościowym przeprowadzonej analizy	Brak – postać silnie stłumiona lub poza zakresem częstotliwościowym przeprowadzonej analizy
Druga postać drgań skrętnych	 Częstotliwość – 561 Hz Tłumienie 0,07%	Brak – postać silnie stłumiona lub poza zakresem częstotliwościowym przeprowadzonej analizy	Brak – postać silnie stłumiona lub poza zakresem częstotliwościowym przeprowadzonej analizy
Trzecia postać drgań skrętnych	 Częstotliwość – 691 Hz Tłumienie 0,02%	Brak – postać silnie stłumiona lub poza zakresem częstotliwościowym przeprowadzonej analizy	Brak – postać silnie stłumiona lub poza zakresem częstotliwościowym przeprowadzonej analizy
Czwarta postać drgań skrętnych	 Częstotliwość – 973 Hz Tłumienie 0,07%	Brak – postać silnie stłumiona lub poza zakresem częstotliwościowym przeprowadzonej analizy	Brak – postać silnie stłumiona lub poza zakresem częstotliwościowym przeprowadzonej analizy
Trzecia postać drgań giętych	 Częstotliwość – 821 Hz Tłumienie 0,14%	 Częstotliwość – 848 Hz Tłumienie 0,31%	 Częstotliwość – 608 Hz Tłumienie 0,96%
<i>Zawieszenie poziome</i>			
Postać drgań	Profil stalowy	Profil stalowy wypełniony polimerobetonem	Odlew z polimerobetonu
Pierwsza postać drgań giętych	 Częstotliwość – 387 Hz Tłumienie 0,06%	 Częstotliwość – 291 Hz Tłumienie 0,13%	 Częstotliwość – 227 Hz Tłumienie 0,9%
Druga postać drgań giętych	 Częstotliwość – 980 Hz Tłumienie 0,06%	 Częstotliwość – 766 Hz Tłumienie 0,34%	 Częstotliwość – 604 Hz Tłumienie 0,74%

Trzecia postać drgań giętnych	Brak – postać silnie stłumiona lub poza zakresem częstotliwościowym przeprowadzonej analizy	 <p>Częstotliwość – 849 Hz Tłumienie 0,33%</p>	Brak – postać silnie stłumiona lub poza zakresem częstotliwościowym przeprowadzonej analizy
-------------------------------	---	--	---

3. TEORETYCZNA ANALIZA MODALNA

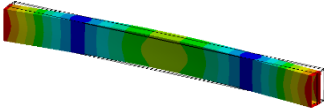
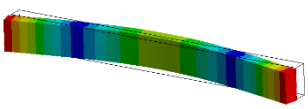
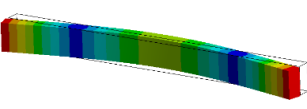
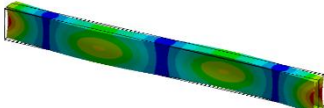
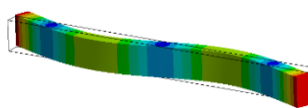
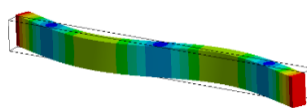
Teoretyczna analiza modalna została przeprowadzona z wykorzystaniem metody elementów skończonych i oprogramowania ANSYS 13. Na początku opracowano modele CAD reprezentujące belki, które zostały poddane eksperymentalnej analizie modalnej. Po zaimportowaniu do środowiska ANSYS poddano je dyskretyzacji. Kontakt pomiędzy polimerobetonem i stalą przyjęto jako „związany” (w ANSYS - typ *Bonded*). Na modele nie nałożono żadnych innych warunków brzegowych. Model profilu stalowego z polimerobetonem po dyskretyzacji pokazano na rys. 4.

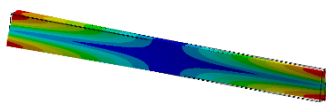
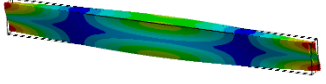
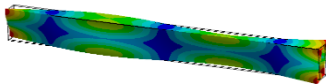
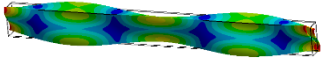
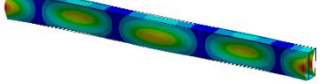
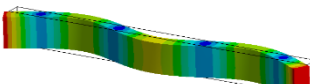
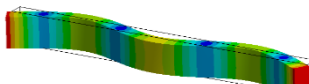
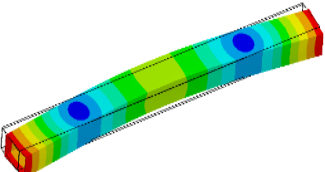
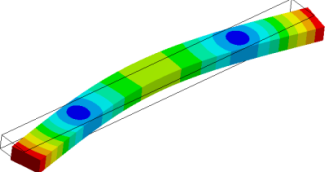
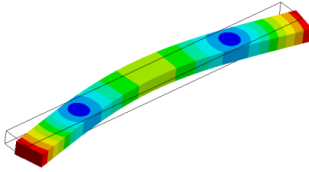
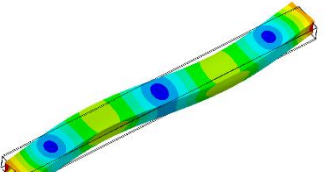
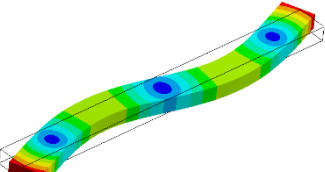
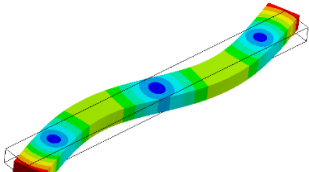


Rys. 4. Model profilu stalowego wypełnionego polimerobetonem po dyskretyzacji
Fig. 4. Model of steel profile filled up with polymer concrete after discretization

Tabela 3. Częstotliwości drgań własnych oraz odpowiadające im postacie drgań uzyskane na drodze teoretycznej analizy modalnej z wykorzystaniem oprogramowania ANSYS

Table 3. Natural frequencies and their forms from theoretical modal analysis using ANSYS software

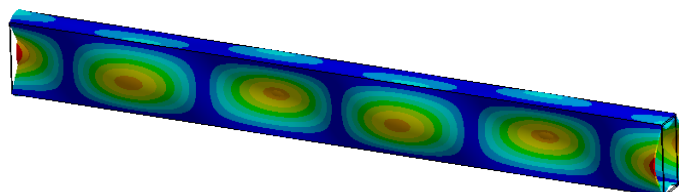
Zawieszenie pionowe			
Postać drgań	Profil stalowy	Profil stalowy wypełniony polimerobetonem	Odlew z polimerobetonu
Pierwsza zginająca postać drgań	 <p>Częstotliwość – 222 Hz</p>	 <p>Częstotliwość – 160 Hz</p>	 <p>Częstotliwość – 113 Hz</p>
Druga zginająca postać drgań	 <p>Częstotliwość – 542 Hz</p>	 <p>Częstotliwość – 434 Hz</p>	 <p>Częstotliwość – 307 Hz</p>

Pierwsza skręcająca postać drgań	 Częstotliwość – 522 Hz	Brak – postać drgań nie ujawniła się w badaniu eksperymentalnym	Brak – postać drgań nie ujawniła się w badaniu eksperymentalnym
Druga skręcająca postać drgań	 Częstotliwość – 579 Hz	Brak – postać drgań nie ujawniła się w badaniu eksperymentalnym	Brak – postać drgań nie ujawniła się w badaniu eksperymentalnym
Trzecia skręcająca postać drgań	 Częstotliwość – 707 Hz	Brak – postać drgań nie ujawniła się w badaniu eksperymentalnym	Brak – postać drgań nie ujawniła się w badaniu eksperymentalnym
Czwarta skręcająca postać drgań	 Częstotliwość – 985 Hz	Brak – postać drgań nie ujawniła się w badaniu eksperymentalnym	Brak – postać drgań nie ujawniła się w badaniu eksperymentalnym
Trzecia zginająca postać drgań	 Częstotliwość – 824 Hz	 Częstotliwość – 829 Hz	 Częstotliwość – 593 Hz
<i>Zawieszenie poziome</i>			
Postać drgań	Profil stalowy	Profil stalowy wypełniony polimerobetonem	Odlew z polimerobetonu
Pierwsza zginająca postać drgań	 Częstotliwość – 380 Hz	 Częstotliwość – 287 Hz	 Częstotliwość – 221 Hz
Druga zginająca postać drgań	 Częstotliwość – 963 Hz	 Częstotliwość – 751 Hz	 Częstotliwość – 585 Hz

Każdy model został poddany analizie modalnej w zakresie częstotliwościowym do 1000 Hz. W tabeli 3 przedstawiono uzyskane postacie drgań własnych i odpowiadające im częstotliwości. Uwzględniono w niej jedynie postacie, które ujawniły się również w analizie eksperymentalnej. Jak wspomniano wcześniej teoretyczna analiza modalna nie daje możliwości wyznaczenia wartości współczynnika tłumienia badanego obiektu.

4. PODSUMOWANIE

W przypadku profilu stalowego – w teoretycznej analizie modalnej ujawniło się dodatkowo kilka postaci drgań (nieprzedstawionych w tabeli 3) związanych z drganiami ścianek profilu. Przykładowa postać drgań ścianek profilu stalowego została przedstawiona na rys. 5.



Rys. 5. Przykładowa postać drgań ścianek profilu stalowego
Fig. 5. Example of natural form vibration of walls steel profile

Tabela 4 przedstawia porównanie uzyskanych częstotliwości drgań z przeprowadzonej teoretycznej i eksperymentalnej analizy modalnej badanych belek.

Tabela 4. Porównanie uzyskanych częstotliwości drgań własnych uzyskanych z przeprowadzonych analiz
Table 4. Comparison of obtained natural frequencies from performed analysis

Profil stalowy			
	Analiza teoretyczna [Hz]	Analiza eksperymentalna [Hz]	Różnica [Hz]
Zawieszanie „pionowe”	222	228	6
	522	511	11
	542	761	219
	579	561	18
	707	691	16
	824	921	97
	985	973	12
Zawieszanie „poziome”	380	387	7
	963	980	17
Profil stalowy wypełniony polimerobetonem			
	Analiza teoretyczna [Hz]	Analiza eksperymentalna [Hz]	Różnica [Hz]
Zawieszanie „pionowe”	160	164	4
	434	444	10
	829	848	19
Zawieszanie „poziome”	287	291	4
	751	766	15

Odlew z polimerobetonu			
	Analiza teoretyczna [Hz]	Analiza eksperymentalna [Hz]	Różnica [Hz]
Zawieszanie „pionowe”	113	115	2
	307	315	8
	593	608	15
Zawieszanie „poziome”	221	227	6
	585	604	19

Przeprowadzone badania pokazują zalety stosowania polimerobetonu w budowie korpusów obrabiarek. Eksperymentalna analiza modalna potwierdziła dużo lepsze właściwości dynamiczne polimerobetonu w stosunku do stali (tabela 2). Współczynniki tłumienia drgań profilu wypełnionego lub całego odlewu z polimerobetonu dla poszczególnych postaci są nawet kilkukrotnie większe niż dla profilu stalowego. Dodatkową zaletą jest eliminacja drgań własnych ścianek profilu czy drgań skrętnych w zakresie częstotliwościowym przeprowadzonych badań.

Różnice w uzyskanych częstotliwościach drgań pomiędzy analizą teoretyczną, a doświadczalną są stosunkowo małe, dzięki swobodnemu zawieszeniu badanych belek. Brak połączeń stykowych pozwolił uniknąć problemów przy badaniach symulacyjnych. Odzwierciedlenie kontaktów w programach korzystających z MES jest bardzo problematyczne. Zauważona duża różnica w częstotliwości dla jednej postaci (219 Hz) może wynikać z błędnie zinterpretowanej postaci zakłóconej drganiami ścianek (rys. 5). Interpretacja wyników eksperymentalnej analizy modalnej konstrukcji z profili stalowych ze względu na słabe tłumienie drgań jest dużo bardziej problematyczna. Problemy pojawiają się również podczas jej przeprowadzania. Postaci drgań własnych jest z reguły dużo więcej (drgania ścianek widoczne na rys. 5 i drgania skrętne). Często odpowiadające im częstotliwości lub ich harmoniczne są do siebie zbliżone, co utrudnia jednoznaczny identyfikację tych postaci. Ponadto czasy potrzebny do całkowitego wytłumienia drgań dla takich konstrukcji są długie, co skutkuje koniecznością zastosowania długich czasów rejestracji sygnałów w trakcie przeprowadzania eksperymentalnej analizy modalnej. Badania takie wówczas są czasochłonne.

LITERATURA

- [1] DOLINŠEK S., ŠUŠTARŠIČ B., KOPAČ J., 2001, *Wear mechanisms of cutting tools in high-speed cutting processes*, *Wear*, 250, 349–356.
- [2] ERBE T., KRÓL J., THESKA R., 2008, *Mineral casting as material for machine base-frames of precision machines*, Twenty-third Ann. Meeting of the American Soc. for Prec. Eng. and Twelfth ICPE, Portland, Oregon.
- [3] KOSMOL J., 2016, *Projektowanie hybrydowych korpusów obrabiarek*, *Mechanik*, 8-9, 904–913.
- [4] PROLONGO S.G., ROSARIO G., UREÑA A., 2006, *Comparative study on the adhesive properties of different epoxy resin*, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 26, 125–132.
- [5] SUH J.D., LEE D.G., 2008, *Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high-speed CNC milling machine*, *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 4, 113–121.
- [6] CAŁKA P., 2017, *Porównanie właściwości dynamicznych belki nośnej wykonanej jako odlew żeliwny i hybrydowe połączenie konstrukcji stalowej z odlewem mineralnym*, *Modelowanie Inżynierskie*, 62, 12–17.

- [7] LIS K., SOKOŁOWSKI A., 2009, *Zintegrowany system do badań obrabiarek w warunkach przemysłowych – wybrane tory pomiarowe*, Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, 1, Politechnika Śląska, 39–58.
- [8] CAŁKA P., LIS K., 2017, *Eksperymentalna analiza modalna profilu stalowego wypełnionego polimerobetonem*, STAL Metale & Nowe Technologie, 9–10, 33–37.

RESEARCH OF DYNAMICS PROPERTIES IN THE CONTEXT OF HYBRID MACHINE BODY

This paper presents research related to hybrid machine body. Experimental modal analysis was carried out on steel profile, steel profile filled up with polymer concrete (making hybrid connection) and polymer concrete cast. Then CAD models representing real objects were created. Theoretical modal analysis using software ANSYS 13 was performed and obtained results compared.

Keywords: *hybrid machine body, polymer concrete, finite element method, modal analysis*