

Jan KOSMOL, Krzysztof LIS, Paweł CAŁKA  
Katedra Budowy Maszyn, Politechnika Śląska, ul. Konarskiego 18a, 44-100 Gliwice  
e-mail: jan.kosmol@polsl.pl, krzysztof.lis@polsl.pl, pawel.calka@polsl.pl

## Eksperymentalna weryfikacja korpusów polimerobetonowych

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono wstępne wyniki badań eksperymentalnych korpusu belki suportowej niewypełnionej i wypełnionej polimerobetonem w postaci odpowiedzi impulsowej i charakterystyk widmowych. Celem tych badań była ocena poprawy niektórych właściwości dynamicznych korpusów obrabiarek, poprzez wypełnienie ich polimerobetonem.

**Słowa kluczowe:** polimerobeton, właściwości dynamiczne, korpus belki suportowej

### EXPERIMENTAL VERIFICATION OF POLYMER CONCRETE FRAMES

**Abstract:** The paper presents preliminary experimental results of a machine tool beam filled up and not filled up with Polymer Concrete (PC) as a transient response and amplitude spectrum. The main goal of the experiments was evaluation of improving selected dynamic properties of machine tool frames through filled them Polymer Concrete.

**Keywords:** Polymer Concrete (PC), dynamic properties, a machine tool beam

### 1. WPROWADZENIE

Rozwój technologii HSC (High Speed Cutting) stawia nowe wymagania konstrukcjom obrabiarek skrawających. W stosunku do tradycyjnych obrabiarek wzrastają wymagania odnośnie sztywności statycznej i dynamicznej, odporności na drgania i oddziaływania cieplne, zużycia energii i kosztów materiałowych, zmniejszania czasu wytworzenia obrabiarki i innych. Wymienione wyżej wymagania są w większym lub mniejszym stopniu związane z zespołami, zwanymi korpusami. Korpusy mają decydujący wpływ na stabilność i powtarzalność wymiarów, na stabilność cieplną (wpływ zmiennej temperatury otoczenia), dynamiczną (tłumienie drgań), na koszt wytworzenia obrabiarki (korpusy nierzadko stanowią 70% i więcej masy obrabiarki), na właściwości dynamiczne.

Dotychczas, podstawowym materiałem w budowie korpusów obrabiarkowych jest żeliwo szare. Głównie z powodu dobrych właściwości tłumiących drgania i stosunkowo niskiego kosztu materiałowego. Spotyka się też

korpusy stalowe (spawane), ale gorsze właściwości tłumiące drgania, wyższy koszt materiałowy, gorsza stabilność wymiarowa ograniczają ich stosowanie do maszyn o niższych wymaganiach dokładnościowych.

Jednym z milowych kroków w rozwoju materiałów do budowy obrabiarek stało się opatentowanie w 1957r przez szwajcarskiego producenta obrabiarek F. Studera materiału nazwanego Polymer Concrete (PC) [1], czyli polimerobetonu, o nazwie własnej Granitan. Można to uznać za początek stosowania nowego materiału w budowie korpusów obrabiarkowych. W późniejszym czasie pojawiły się inne materiały, które kwalifikują się do polimerobetonów. Granitan zawierał ok. 80% cząstek stałych i ok. 20% żywicy. Drugą, znaczącą grupą polimerobetonów to materiał Philly-cast opracowany, przez ITW Philadelphia Resins [1], w którym udział cząstek stałych wynosił ponad 90%. Ponieważ właściwości polimerobetonu zależą od rodzaju cząstek stałych, od ich rozmiarów, od rodzaju żywicy, od względnego udziału cząstek stałych i żywicy, w miarę upływu czasu pojawiały się kolejne odmiany polimerobetonów.

W Tab. 1 przedstawiono najważniejsze własności mechaniczne polimerobetonu w porównaniu do własności żeliwa szarego i stali. Uwzględniono jedynie te cechy, które decydują o właściwościach korpusów.

Z punktu widzenia własności mechanicznych korpusów najistotniejsze są własności tłumienia drgań (logarytmiczny dekrement drgań polimerobetonu ok. 10 razy większy niż stali czy żeliwa) oraz współczynnik przenikalności cieplnej (ok. 40 do 2,5 razy mniejszy niż dla stali czy żeliwa), co oznacza, że polimerobeton jest mało wrażliwy na oddziaływanie temperatury otoczenia.

W pracy [2] Kosmol przedstawił problematykę stosowania polimerobetonów w budowie korpusów obrabiarek, a w [3] wyniki modelowania MES korpusów hybrydowych. Na przykładzie badań symulacyjnych metodą elementów skończonych pokazał, w sposób porównawczy, jak mogą ulegać zmianom takie właściwości eksploatacyjne korpusów obrabiarek jak sztywność statyczna, częstotli-

ści drgań własnych, podatność dynamiczna, współczynniki tłumienia drgań, masa i koszt wytworzenia korpusu. Rozpatrywany był przykład modelowej belki suportowej tokarki karuzelowej (Rys. 1).

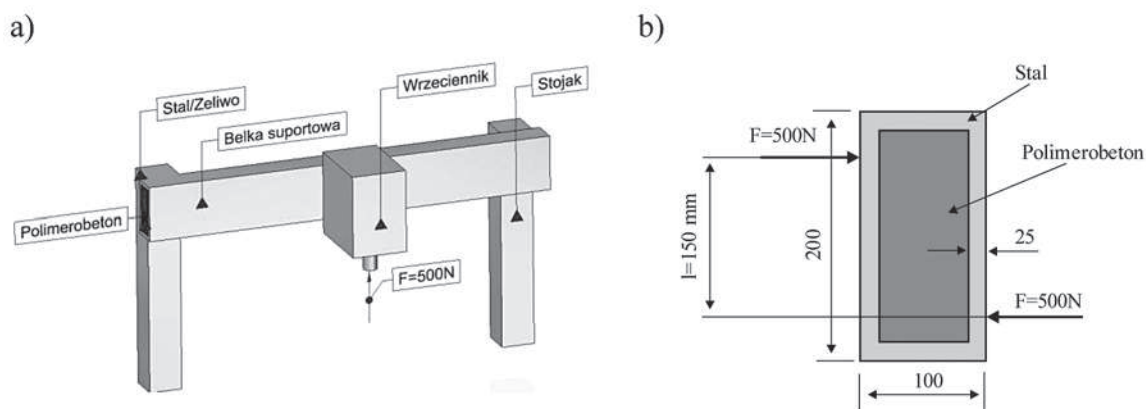
Analizowane były różne struktury belki, które różniły się m.in. udziałem polimerobetonu w całej konstrukcji. Jednym z uzyskanych wyników była zależność podatności dynamicznej belki dla pierwszej częstotliwości rezonansowej od struktury belki. Przedstawiono je na rysunku 2. Struktury oznakowane jako St dotyczą korpusów stalowych, a Zl korpusów żeliwnych. Liczby 5, 10, 15, 25 dotyczą grubości ścianek korpusu a symbol „PC” oznacza Polimerobeton. Wprawdzie podatność dynamiczna dla pierwszej częstotliwości rezonansowej nie musi być najlepszym wskaźnikiem właściwości tłumiących, ale pozwala na jakościową ich ocenę.

Wnioski są dosyć oczywiste: struktury hybrydowe, czyli z udziałem polimerobetonu, cechuje znacznie mniejsza podatność dynamiczna, czyli lepsze tłumienie.

**Tab. 1. Porównanie własności stali, żeliwa i polimerobetonu**

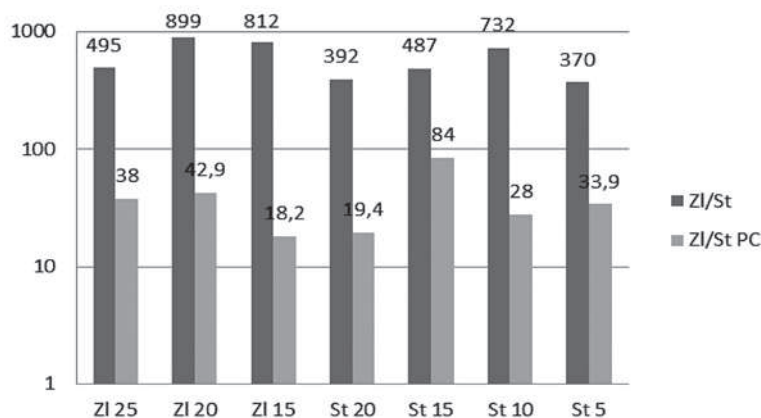
**Tab. 1. Comparison of properties of steel, cast iron and polymer concrete**

Własności	Jednostki	Stal	Żeliwo szare	Polimerobeton
Gęstość	g/cm <sup>3</sup>	7,85	7,2	2,1 - 2,4
Wytrzymałość na ściskanie	N/mm <sup>2</sup>	250-1200	350-450	140 - 170
Wytrzymałość na zginanie	N/mm <sup>2</sup>	400-1600	150-400	25 - 40
Moduł Younga	kN/mm <sup>2</sup>	210	80-120	30 - 40
Współczynnik przenikalności cieplnej	W/(m*K)	50	50	1,3 - 20
Współczynnik rozszerzalności cieplnej	µm/(m*K)	12	10	12-20
Ciepło właściwe	kJ/(kg*K)	0,45-0,50	0,5	0,9-1,3
Logarytmiczny dekrement tłumienia	-	0,002	0,003	0,02-0,03
Koszt	EUR/dm <sup>3</sup>	7,67	5,11	2,56
Zapotrzebowanie na energię przy wytwarzaniu	MJ/dm <sup>3</sup>	160	120	25



Rys. 1. Widok konstrukcji nośnej tokarki karuzelowej (a) i struktury belki suportowej hybrydowej (b) [3]

Fig. 1. View of the supporting structure vertical lathe (a) and structure of a hybrid support beam (b) [3]



Rys. 2. Wpływ struktury belki suportowej na podatność dynamiczną [ $10^3 \text{ mm/N}$ ]

Fig. 2. Influence of the support beam structure on dynamic susceptibility [ $10^3 \text{ mm/N}$ ]

## 2. ZAŁOŻENIA DO BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Przedmiotem badań przedstawionych w artykule są eksperymenty na modelach hybrydowych i jednolitych. Autorzy chcieli naocznie przekonać się o skuteczności wpływu polimerobetonu na właściwości dynamiczne, a w zasadzie na właściwości tłumiące. Podobnie jak w badaniach symulacyjnych MES, wykonane zostały modele fizyczne belek jednolitych, tj. wykonanych z profili stalowych i belek hybrydowych, tj. wypełnionych polimerobetonem.

Ponadto wzięto pod uwagę belki wykonane tylko z polimerobetonu. Ze względów technicznych, modele belek były wymiarowo mniejsze niż w badaniach symulacyjnych. Polimerobeton został wykonany przez autorów osobiście.

Badania obejmowały analizę modalną belek poddanych wymuszeniom impulsowym. Wzięto pod uwagę dwie konfiguracje belek, tj. podpartych (zawieszonych) obustronnie w poziomie i zawieszonych jednostronnie w pionie.

W pierwszym etapie, badaniom doświadczalnym został poddany profil stalowy o przekroju prostokątnym, wypełniony polimerobe-

tonem oraz profil o identycznym przekroju, który pozostał niewypełniony. Wymiary profili wynosiły 120 x 60 mm, grubości ścianek profili wynosiły 3 mm, a ich długości 1400 mm. Kolejno wykonano w całości odlew z polimerobetonu o wymiarach identycznych jak profil stalowy (120 x 60 x 1400 mm). Waga pustego profilu stalowego wynosiła około 11,5 kg, profilu wypełnionego betonem żywicznym 31 kg, natomiast waga samego odlewu polimerobetonowego około 23,5 kg.

Polimerobeton, który posłużył do wypełnienia profilu w 90% składał się z kruszywa o różnej gradacji (0,1÷5 mm). Wykorzystano mączkę kwarcową, piasek kwarcowy oraz żwirek kwarcowy. Pozostałe 10% odlewu stanowiła żywica epoksydowa wraz z utwardzaczem. Badane profile pokazano na rysunku 3a.

Eksperyment przeprowadzono z wykorzystaniem swobodnego zawieszenia belek. Powoduje to wprawdzie występowanie dodatkowych postaci drgań niewynikających bezpośrednio z właściwości materiałowych belek, a bardziej ze sztywności zawiesia, ale osłabia wpływ utwierdzenia i sztywności kontaktowej rzeczywistych podpór belek na uzyskane wyniki. Wynikające z takiego podparcia belek postaci drgań będą miały częstotliwości

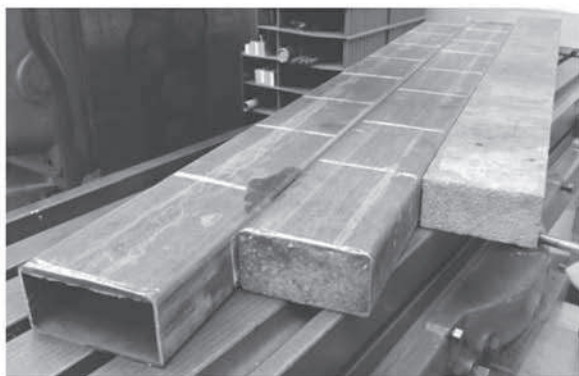
wyrażnie niższe od postaci drgań własnych samych belek, co umożliwi ich wyłączenie z dalszej analizy. Sposób zawieszenia belek w układzie poziomym demonstruje rysunek 3b.

Jak już wspomniano eksperymentalna analiza modalna została przeprowadzona z wykorzystaniem metody impulsowej. Stanowisko do badań składało się z młotka modalnego, trzech czujników drgań oraz oprogramowania „Zintegrowany system do badań obrabiarek w warunkach przemysłowych” opracowanego w Katedrze Budowy Maszyn [5]. Wynikiem przeprowadzonych badań było uzyskanie częstotliwości i postaci drgań własnych belek razem ze współczynnikami tłumienia.

### 3. WYNIKI BADAŃ EKSPERYMENTALNYCH

Wstępne badania były związane wyłącznie z wypełnionym i niewypełnionym profilem stalowym. Wyniki przeprowadzonych badań – uzyskane częstotliwości drgań własnych oraz ich postaci – pochodzą z [4] i zostały przedstawione w Tab. 2 oraz Tab. 3. Następnie eksperymentalnej analizie modalnej został poddany odlew w całości wykonany z polimerobetonu. Wyniki przeprowadzonego badania pokazano w Tab. 4.

a)



b)










Rys. 3. Widok profili: stalowego niewypełnionego, stalowego wypełnionego polimerobetonem i polimerobetonowego (a) oraz widok swobodnego, poziomego zawieszenia odlewu z polimerobetonu (b)

Fig. 3. View of profiles: steel unfilled, steel filled with polymer concrete and polymer-concrete (a) and view of free, horizontal suspension of polymer concrete casting (b)




**Tab. 2. Porównanie uzyskanych postaci drgań, częstotliwości i współczynników tłumienia przy zawieszeniu pionowym [4]**

**Tab. 2. Comparison of the obtained forms of vibrations, frequencies and damping coefficients with the vertical suspension [4]**

Postać drgań	Profil stalowy wypełniony polimerobetonem	Profil stalowy
Pierwsza giętą postać drgań	 <p>Częstotliwość – 164 Hz Współczynnik tłumienia 0,25%<sup>1</sup></p>	 <p>Częstotliwość – 228 Hz Współczynnik tłumienia 0,17%</p>
Druga giętą postać drgań	 <p>Częstotliwość – 444 Hz Współczynnik tłumienia 0,25%</p>	 <p>Częstotliwość – 761 Hz Współczynnik tłumienia 0,08%<sup>1</sup></p>
Pierwsza skrętną postać drgań	-	 <p>Częstotliwość – 511 Hz Współczynnik tłumienia 0,04%</p>
Druga skrętną postać drgań	-	 <p>Częstotliwość – 561 Hz Współczynnik tłumienia 0,07%</p>
Trzecia skrętną postać drgań	-	 <p>Częstotliwość – 691 Hz Współczynnik tłumienia 0,02%</p>

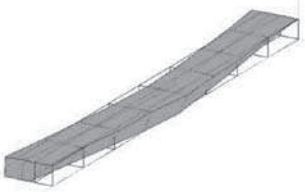
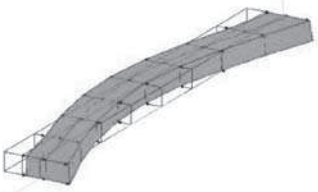
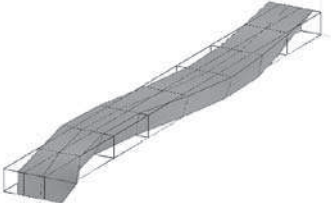
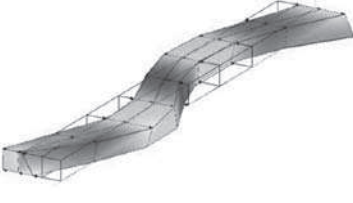

<sup>1</sup>W artykule przyjęto podawać wartość względną tłumienia w %, tj. odniesioną do krytycznej wartości bezwymiarowego współczynnika tłumienia  $\alpha=1$ . Takie podejście jest często spotykane w literaturze dotyczącej eksperymentalnej analizy modalnej, np. T. Uhl. Komputerowo wspomagana identyfikacja modeli konstrukcji mechanicznych. WNT, Warszawa, 1997r.



Czwarta skrętna postać drgań	-	 <p>Częstotliwość – 973 Hz Współczynnik tłumienia 0,07%</p>
Trzecia giętna postać drgań	 <p>Częstotliwość – 848 Hz Współczynnik tłumienia 0,31%</p>	 <p>Częstotliwość – 821 Hz Współczynnik tłumienia 0,14%</p>






**Tab. 3. Porównanie uzyskanych postaci drgań, częstotliwości i współczynników tłumienia przy zawieszeniu poziomym [4]**

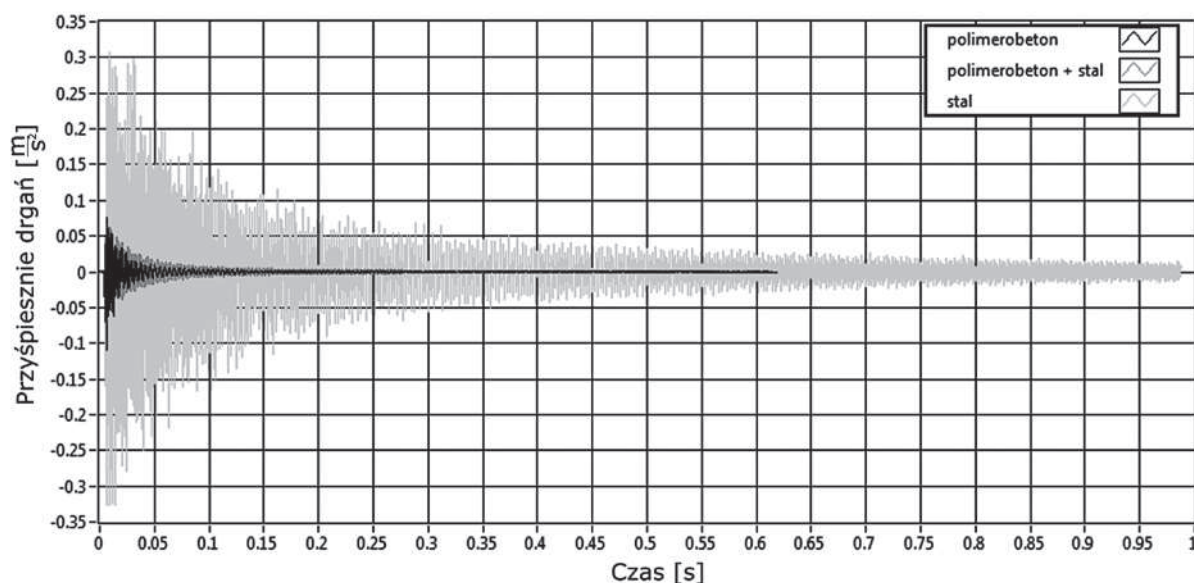
**Tab. 3. Comparison of obtained vibrations, frequencies and damping coefficients with the horizontal suspension [4]**

Postać drgań	Profil stalowy wypełniony polimerobetonem	Profil stalowy
Pierwsza giętna postać drgań	 <p>Częstotliwość – 291 Hz Współczynnik tłumienia 0,13%</p>	 <p>Częstotliwość – 387 Hz Współczynnik tłumienia 0,06%</p>
Druga giętna postać drgań	 <p>Częstotliwość – 766 Hz Współczynnik tłumienia 0,34%</p>	 <p>Częstotliwość – 980 Hz Współczynnik tłumienia 0,06%</p>
Trzecia giętna postać drgań	 <p>Częstotliwość – 849 Hz Współczynnik tłumienia 0,33%</p>	Brak – najprawdopodobniej poza zakresem częstotliwościowym przeprowadzonej analizy

Tab. 4. Porównanie uzyskanych postaci drgań, częstotliwości i współczynników tłumienia odlewu z polimerobetonu dla zawieszenia poziomego i pionowego

Tab. 4. Comparison of obtained forms of vibrations, frequencies and damping coefficients of polymer concrete casting for horizontal and vertical suspension

Postać drgań	Zawieszenie pionowe	Zawieszenie poziome
Pierwsza giętna postać drgań	 <p>Częstotliwość – 115 Hz Współczynnik tłumienia 0,86%</p>	 <p>Częstotliwość – 227 Hz Współczynnik tłumienia 0,9%</p>
Druga giętna postać drgań	 <p>Częstotliwość – 315 Hz Współczynnik tłumienia 0,8%</p>	 <p>Częstotliwość – 604 Hz Współczynnik tłumienia 0,74%</p>
Trzecia giętna postać drgań	 <p>Częstotliwość – 608 Hz Współczynnik tłumienia 0,96%</p>	Brak – najprawdopodobniej poza zakresem częstotliwościowym przeprowadzonej analizy

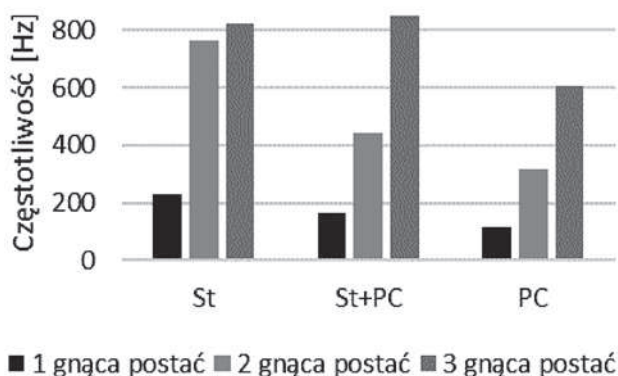


Rys. 4. Porównanie sygnałów drganiowych odpowiedzi obiektów pobudzonych wymuszeniem impulsowym  
Fig. 4. Comparison of vibration signals of response of objects stimulated of impulse coercion

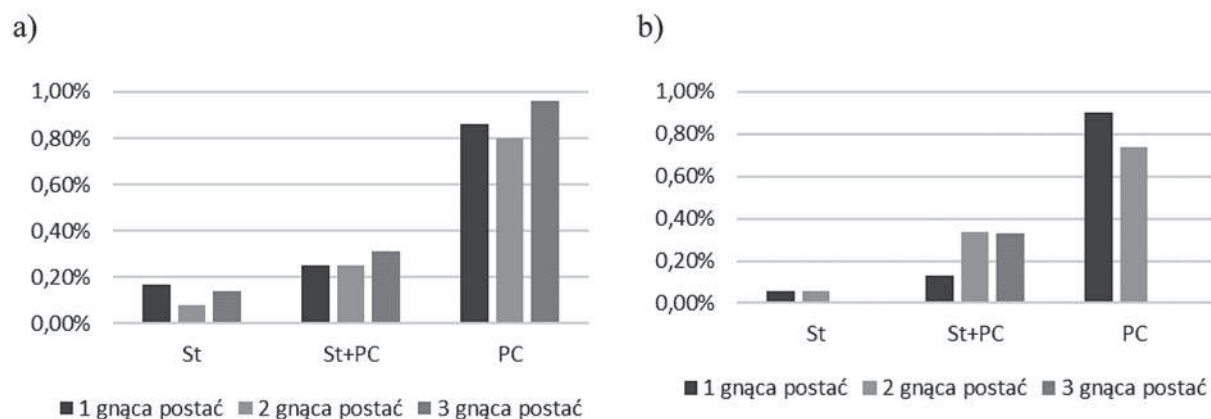
Rysunek 4 przedstawia przykładowy przebieg sygnałów przyspieszenia drgań uzyskanych z trójosiowego akcelerometru, jako odpowiedzi obiektów pobudzonych wymuszeniem impulsowym. Aby umożliwić obiektywne porównanie sygnałów drganiowych ich wartości zostały podzielone przez amplitudy sił wymuszających drgania obiektów

#### 4. PODSUMOWANIE

Wypełniony profil oraz odlew w całości wykonany z polimerobetonu cechuje się dużo niższymi częstotliwościami drgań własnych w porównaniu do pustego profilu stalowego (Rys. 5 – przykładowo przy zawieszeniu pionowym). Najniższymi częstotliwościami drgań własnych



Rys. 5. Porównanie częstotliwości drgań własnych: St – profil stalowy, St+PC – profil stalowy wypełniony polimerobetonem, PC – belka z polimerobetonem  
 Fig. 5. Comparison of natural frequencies: St - steel profile, St + PC - steel profile filled with polymer concrete, PC - polymer concrete beam



Rys. 6. Porównanie uzyskanych wartości współczynnika tłumienia<sup>1 d</sup> dla zawieszenia pionowego (a) i dla zawieszenia poziomego (b) belki: St – profil stalowy, St+PC – profil stalowy wypełniony polimerobetonem, PC – belka z polimerobetonu  
 Fig. 6. Comparison of obtained values of damping coefficient for vertical suspension (a) and for horizontal suspension (b) of the beam: St - steel profile, St + PC - steel profile filled with polymer concrete, PC - polymer concrete beam



cechuje się belka wykonana w całości jako odlew, pierwsze częstotliwości drgań własnych giętych dla zawieszenia pionowego profilu wypełnionego są około 29% wyższe od odlewu.

Zastosowanie polimerobetonu powoduje również brak występowania postaci skrętnych w przeprowadzonych analizach (zakres analizy do 1 kHz).

W odniesieniu do korpusów obrabiarek jest bardzo istotną zaletą ich stosowania, ponieważ im mniej postaci drgań własnych tych mniejsze prawdopodobieństwo wystąpienia drgań rezonansowych.

Porównanie uzyskanych wartości współczynnika tłumienia<sup>1</sup> dla poszczególnych postaci drgań i belek zostały przedstawione na rysunku 6.

Belka wykonana w całości jako odlew cechuje się dużo większym tłumieniem drgań w porównaniu do niewypełnionego i wypełnionego profilu stalowego dla każdej z uzyskanych postaci drgań. Wypełnienie profilu powoduje zwiększenie (nawet dwukrotnie) tłumienia drgań. Wartość współczynnika tłumienia drgań odlewu z polimerobetonu jest prawie siedmiokrotnie większa niż dla profilu stalowego (zawieszenie poziome – pierwsza postać drgań).

Uzyskane wyniki badań świadczą o słuszności stosowania polimerobetonu w budowie korpusów obrabiarek. Wypełnione profile stalowe oraz odlewy z polimerobetonu cechują się dużo lepszymi właściwościami dynamicznymi od stali. Nawet kilkukrotnie większa wartość współczynnika tłumienia pokazuje jak dobrze polimerobeton tłumí powstające drgania.

## LITERATURA

1. Kreienbuhl R.: *Epoxy Concrete for Better Machine Basis: A 20 Year Review of Incentives for Replacing Cast Iron*. Polymers in Concrete (paper not published).
2. Kosmol J.: *Zastosowanie polimerów w budowie korpusów obrabiarek*. Przetwórstwo Tworzyw. Nr 1 (175) / 23, 2017, s. 33-45.
3. Kosmol J.: *Modelowanie hybrydowych korpusów obrabiarek*. Modelowanie Inżynierskie Nr 62, t. 31, 2017, s. 49-55.
4. Całka P., Lis K.: *Eksperymentalna analiza modalna profilu stalowego wypełnionego polimerobetonem*. STAL Metale & Nowe Technologie, wydanie nr 9-10/2017, s. 33-37.
5. Sokołowski A., Lis K.: *Zintegrowany system do badań obrabiarek w warunkach przemysłowych – wybrane torry pomiarowe*. Prace Naukowe Katedry Budowy Maszyn, nr 1, Politechnika Śląska, 2009, s. 39-58.

Data wpłyńcia artykułu do redakcji: 16-01-2018

Data akceptacji publikacji do druku: 09-02-2018