

	<b>Organizatorzy:</b>  Politechnika Łódzka  Wydział Mechaniczny	<b>XXXVIII NAUKOWA SZKOŁA OBRÓBKI ŚCIERNEJ</b> Łódź - Uniejów 09-11.09.2015	
	• Instytut Obrabiarek i Technologii Budowy Maszyn • Katedra Technologii Maszyn		

## Teoretyczne badania właściwości dynamicznych łóż obrabiarki wykonanych z żeliwa i hybrydowego połączenia żeliwa z odlewem mineralnym

**Theoretical research of dynamic properties of machine tool bodies made of cast iron and hybrid connection of cast iron and mineral cast**

**NORBERT KĘPCZAK  
WITOLD PAWŁOWSKI\***

DOI: 10.17814/mechanik.2015.8-9.370

W artykule przedstawiono teoretyczną analizę modalną dwóch korpusów obrabiarki: jednego wykonanego z żeliwa szarego oraz drugiego wykonanego z hybrydowego połączenia żeliwa i odlewu mineralnego. Analiza została przeprowadzona w celu określenia właściwości dynamicznych dwóch korpusów o podobnych kształtach wykonanych w tradycyjnej oraz nowatorskiej technologii odlewniczej. Dodatkowo przeprowadzono analizę sztywności statycznej konstrukcji obu korpusów. Podczas badań symulacyjnych stwierdzono wzrost sztywności dynamicznej oraz wzrost sztywności statycznej korpusu obrabiarki wykonanego z hybrydowego połączenia żeliwa szarego i odlewu mineralnego.

**SŁOWA KLUCZOWE:** odlew mineralny, odlew żeliwny, korpus obrabiarki, właściwości dynamiczne

*The paper presents a theoretical modal analysis of the two machine tool bodies: one made of gray cast iron and the second made of hybrid connection of cast iron and mineral cast. The analysis was conducted in order to determine the dynamic properties of two bodies of similar shapes made in the traditional and innovative casting technology. In addition, an analysis of the static stiffness of the structure of two bodies was performed. During the simulation studies it was found an increase in dynamic stiffness and increase in static rigidity of the machine tool body made of hybrid connection of cast iron and mineral cast. The results of theoretical studies have confirmed the desirability of using hybrid construction because the dynamic properties of so formed body are more favorable in comparison with the conventional body*

*made of cast iron.*

**KEYWORDS:** *mineral cast, cast iron, machine tool body, dynamic properties*

### Wprowadzenie

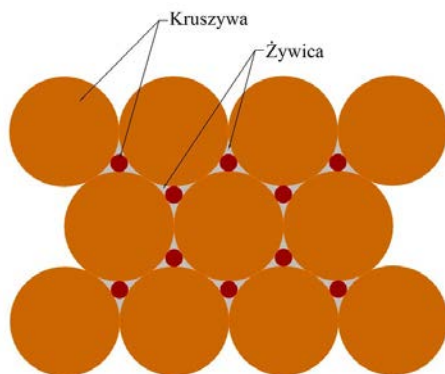
Korpusy są elementami obrabiarek, wiążącymi w jedną całość podstawowe zespoły i mechanizmy. Ich rola polega na utrzymaniu innych części i zespołów w ściśle określonych wzajemnych położeniach. Z reguły obrabiarkę tworzy korpus główny, będący podstawową konstrukcją nośną oraz kilka lub kilkanaście mniejszych korpusów, które przykręcane do niego stanowią całość. Większość korpusów obrabiarkowych jest wykonywanych w postaci odlewów z żeliwa szarego maszynowego bądź żeliwa modyfikowanego [1].

Światowy przemysł ciągle poszukuje nowych rozwiązań konstrukcyjnych, jak i nowych materiałów, które dzięki swoim właściwościom pozwolą na poprawę jakości wytwarzanych produktów, zmniejszą koszty związane z procesem produkcyjnym, zwiększą elastyczność tego procesu itd. [2].

Najnowsze badania oraz trendy rozwojowe pokazują, że istnieje wyraźna tendencja odchodzenia od tradycyjnych odlewów żeliwnych, w kierunku odlewów mineralnych, ze względu na jeszcze lepsze właściwości dynamiczne [3]. Odlew mineralny (PC – polymer concrete, polimerobeton) jest to złożony materiał składający się z drobnych ziaren nieorganicznych kruszyw, takich jak bazalt, spodumen, popiół lotny, żwir rzeczny, piasek, kreda itd. połączonych ze sobą żywicą (najczęściej epoksydową) [4]. Stosunek objętościowy wypełniacza (kruszyw) do spoiwa (żywicy) wynosi około 9÷1 [2]. Na rysunku 1 przedstawiono przykładową strukturę odlewu mineralnego uwzględniającą wielkości ziaren kruszyw. W zależności od zastosowanych kruszyw rozmiary ziaren w odlewie mineralnym mogą mieć wielkość

\* Mgr inż. Norbert Kępczak (norbert.kepczak@p.lodz.pl)  
Dr hab. inż. Witold Pawłowski (witold.pawlowski@p.lodz.pl)

od dziesiątych części mikrometrów do około dziesięciu milimetrów [4].



Rys. 1. Przykładowa struktura odlewu mineralnego uwzględniająca wielkości ziaren [3]

Zależnie od rodzaju i wymiaru użytych kruszyw oraz ilości żywicy utwardzenie odlewu mineralnego może trwać od kilku minut do kilku godzin. W zależności od wymagań dotyczących osiągniętej precyzji, tolerancji wymiarowych, chropowatości powierzchni odlewy mineralne można wykonywać w formach drewnianych, plastikowych, metalowych, żeliwnych lub kombinowanych [3].

Zdolność do tłumienia drgań jest jednym z ważniejszych parametrów determinujących właściwości dynamiczne maszyn i ma znaczny wpływ na możliwości obróbkowe maszyny technologicznej. Zwykle części maszyn wykonywane są z odlewów żeliwnych, które posiadają wysoki współczynnik tłumienia drgań. Jednakże procesy odlewania wymagają otwartej struktury i małych grubości ścianek, ze względu na możliwość powstania jam skurczowych, co skutkuje niskimi częstotliwościami rezonansowymi. Odlewy mineralne pozwalają na stosowanie zamkniętych struktur o grubszych ściankach, co prowadzi do uzyskania wyższych częstotliwości rezonansowych [6].

### Analiza dynamiki

Teoretyczna analiza modalna przeprowadzona za pomocą symulacyjnego modułu programu Autodesk Inventor umożliwia otrzymanie postaci drgań własnych oraz odpowiadających im częstotliwości własnych. W procedurze analitycznej twórcy oprogramowania nie uwzględnili informacji na temat wartości współczynników tłumienia dla poszczególnych postaci drgań. Moduł ten może być zastosowany w celu identyfikacji postaci drgań własnych oraz ich częstotliwości, co w analizie teoretycznej jest wystarczające na wstępnym etapie oceny konstrukcji.

W celu przeprowadzenia teoretycznej analizy modalnej na samym początku wykonano eksperymentalne badania właściwości wytrzymałościowych próbek z odlewu mineralnego, tak aby móc określić parametry niezbędne do zamodelowania materiału odlewu mineralnego w programie Autodesk Inventor. Najważniejszymi parametrami były wytrzymałość na rozciąganie, wytrzymałość na ściskanie, moduł Young'a, oraz współczynnik Poissona. Wyniki badań zamieszczono w tabeli 1 [7].

Tab. 1. Właściwości mechaniczne odlewu mineralnego [7]

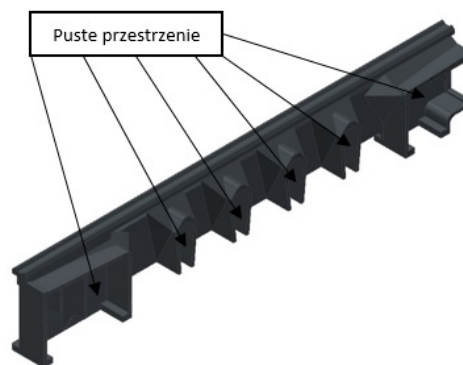
Właściwości	Wartość
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	18,42
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	106,60
Moduł Young'a [MPa]	29738
Współczynnik Poissona	0,222

Na rysunku 2 przedstawiono izometryczny widok korpusu, który został poddany analizie. Jest to korpus obrabiarki produkowany przez firmę Koluszki Foundry and Machinery. Jego wymiary to 300mm x 300mm x 2000mm. Korpus jest wykonany z żeliwa szarego. Technologia odlewania nakłada ograniczenia konstrukcyjne polegające m.in. na budowie elementu odlewane go z możliwie jednolitą grubością ścian i żeber. Zastosowanie zróżnicowanej grubości i zmiennych przekrojów elementów może powodować powstanie niekorzystnych zjawisk podczas odlewania lub stygnięcia odlewu takich jak np. jamy skurczowe. Stanowi to znaczne ograniczenie technologiczne skutkujące koniecznością dostosowania kształtu elementu konstrukcyjnego do wymogów procesu odlewania.

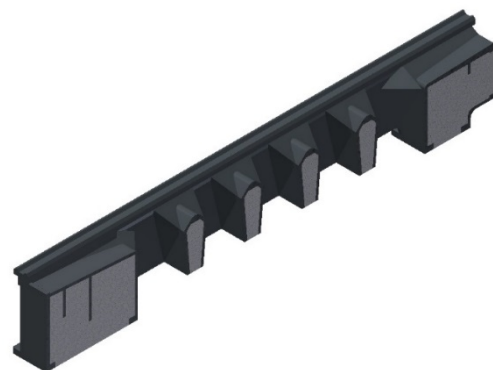


Rys. 2. Izometryczny widok korpusu

Z tego powodu korpus ten w przekroju posiada pewne wolne przestrzenie (rysunek 3), które w dalszej części analizy zostały wypełnione materiałem odlewu mineralnego w celu stworzenia korpusu hybrydowego (rysunek 4).



Rys. 3. Przekrój korpusu z wolnymi przestrzeniami



Rys. 4. Przekrój korpusu z wypełnionymi przestrzeniami

Wypełnienie żeliwnego korpusu cementem polimerowym ma na celu poprawę właściwości dynamicznych tak skonstruowanego korpusu hybrydowego, ponieważ można ocze-

kiwać korzystnych zmian wskutek zastosowania materiału o znacznie wyższym od żeliwa współczynniku tłumienia drgań. Te właściwości są również zmieniane wskutek zwiększenia masy korpusu oraz poprawienia współczynnika sztywności statycznej takiego hybrydowego korpusu. Wszystkie te zmiany mają na celu podwyższenie częstotliwości drgań własnych dla podstawowych postaci, co jest wysoko pożądane za względu na funkcję, jaką pełni korpus obrabiarki i wpływ jego właściwości dynamicznych na wyniki procesu obróbki.

W celu uzyskania odpowiedzi na pytanie o to czy i w jakim stopniu wypełnienie korpusu żeliwnego materiałem odlewu mineralnego wpłynie na zmianę właściwości dynamicznych hybrydowego korpusu przeprowadzono modalne badania teoretyczne na podstawie modeli 3D wybranego korpusu obrabiarki. Badania zostały przeprowadzone za pomocą analitycznego modułu systemu Autodesk Inventor, który do rozwiązania zagadnienia własnego wykorzystuje metodę elementów skończonych (MES).

Podczas badań przeprowadzono teoretyczną analizę modalną dla pierwszych dwudziestu postaci i częstotliwości drgań własnych korpusu. Właściwości mechaniczne obu zastosowanych podczas analizy materiałów zostały przedstawione w tabeli 2.

Tab. 2. Właściwości mechaniczne zastosowanych materiałów

	Żeliwo*	Odlew mineralny
Wytrzymałość na rozciąganie [MPa]	997	18
Wytrzymałość na ścislenie [MPa]	-	106
Moduł Young'a [GPa]	168	30
Współczynnik Poissona [-]	0,29	0,22
Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	7,15	2,30

\* właściwości mechaniczne żeliwa zostały podane z biblioteki materiałów programu Autodesk Inventor 2015

Bardzo ważnym aspektem podczas przeprowadzania analizy było odpowiednie narzucenie warunków brzegowych. Jednym z nich było odebranie stopni swobody (zamocowanie korpusu). Korpus po lewej, jak i prawej stronie posiada otwory montażowe, za pomocą których jest przykręcany do podłoża. I właśnie na tych otworach zostały narzucone wiązania nieruchome (rysunek 5), które odebrały wszystkie stopnie swobody korpusu względem podłoża zarówno dla korpusu żeliwnego, jak i dla korpusu hybrydowego.



Rys. 5. Miejsca zamocowania korpusu

Kolejnym bardzo ważnym aspektem były ustawienia siatki elementów skończonych. Mniejsze wartości parametrów siatki skutkują większą ilością węzłów i elementów. Czas generowania był dłuższy, ale otrzymane wyniki, poprzez zagęszczenie siatki, są dokładniejsze. Na rysunkach 6 i 7

widoki siatek elementów skończonych nałożonych na konstrukcję żeliwną oraz hybrydową. Korpus żeliwny został podzielony na 407740 węzłów i 231853 elementy, natomiast korpus hybrydowy na 475499 węzłów i 277603 elementy.



Rys. 6. Widok siatki elementów skończonych dla konstrukcji żeliwnej



Rys. 7. Widok siatki elementów skończonych dla konstrukcji hybrydowej

Po zdefiniowaniu wszystkich niezbędnych ustawień przeprowadzono symulację. Wyniki analizy zamieszczono w tabeli 3. Postaci drgań oznaczono odpowiednio F1 ÷ F20.

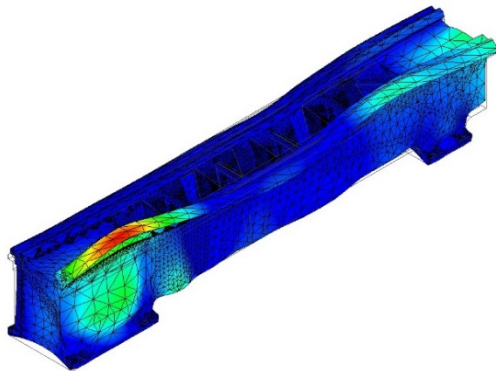
Tab. 3. Wyniki teoretycznej analizy modalnej

Postać	F1	F2	F3	F4	F5
Korpus żeliwny	188,6 Hz	333,0 Hz	363,9 Hz	476,5 Hz	510,4 Hz
Korpus hybrydowy	195,0 Hz	355,9 Hz	409,4 Hz	425,0 Hz	473,1 Hz
Postać	F6	F7	F8	F9	F10
Korpus żeliwny	510,4 Hz	592,9 Hz	764,8 Hz	861,1 Hz	901,9 Hz
Korpus hybrydowy	631,8 Hz	666,3 Hz	782,5 Hz	860,6 Hz	978,6 Hz
Postać	F11	F12	F13	F14	F15
Korpus żeliwny	1016,3 Hz	1078,9 Hz	1107,3 Hz	1135,6 Hz	1197,6 Hz
Korpus hybrydowy	988,6 Hz	1048,6 Hz	1084,5 Hz	1257,4 Hz	1266,0 Hz
Postać	F16	F17	F18	F19	F20
Korpus żeliwny	1257,9 Hz	1267,0 Hz	1356,9 Hz	1383,3 Hz	1438,0 Hz
Korpus hybrydowy	1336,3 Hz	1503,0 Hz	1556,2 Hz	1600,3 Hz	1648,6 Hz

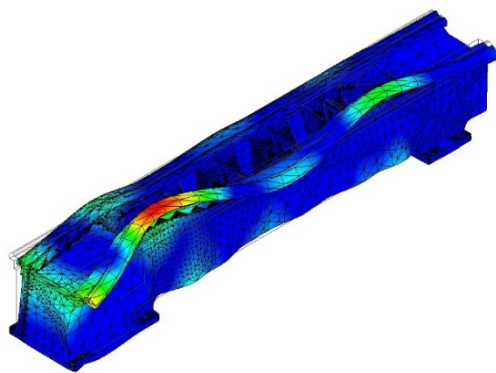
Jak wynika z tabeli dla analizowanych postaci drgań własnych nastąpiło podwyższenie częstotliwości swobodnych wskutek wypełnienia wskazanych luk materiałem odlewu mineralnego. Dla porównania przedstawiono na rysunkach 8 i 9 a także 10 i 11 odpowiednie postaci drgań swobod-



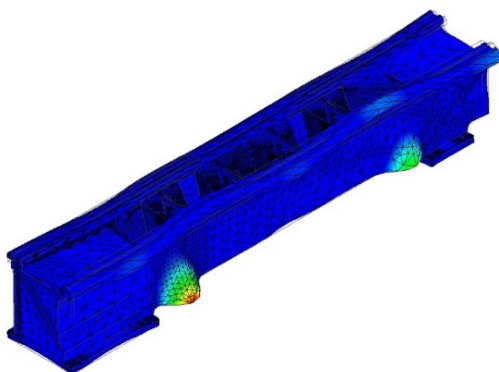
nych obu korpusów, a także ich częstotliwości, z czego można wnioskować, że w przypadku korpusu hybrydowego nastąpiło zwiększenie sztywności dynamicznej konstrukcji, gdyż nastąpiło podwyższenie częstotliwości drgań swobodnych.



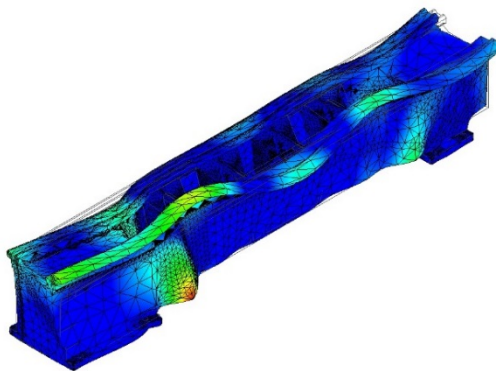
Rys. 8. F12 korpusu żeliwnego – częstotliwość 1078,9 Hz



Rys. 9. F16 korpusu hybrydowego – częstotliwość 1336,3 Hz

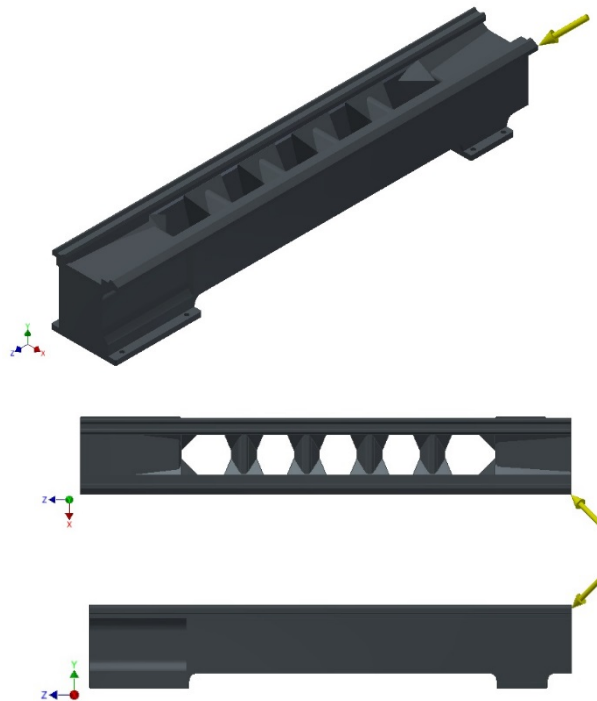


Rys. 10. F19 korpusu żeliwnego – częstotliwość 1383,3 Hz



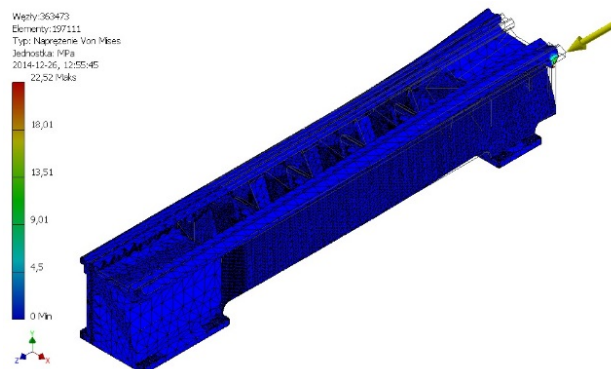
Rys. 11. F17 korpusu hybrydowego – częstotliwość 1503,0 Hz

Następnie przeprowadzono dodatkowe badania statyczne w celu stwierdzenia czy również nastąpiło podwyższenie sztywności statycznej konstrukcji. Każdy z korpusów został obciążony siłą 500N wzdłuż każdej z trzech osi, jak pokazano na rysunku 12. Zastosowano identyczny sposób podparcia jak i takie same parametry siatki elementów skończonych. Analizie został poddany stan naprężeń i odkształceń korpusu pod wpływem statycznej siły.

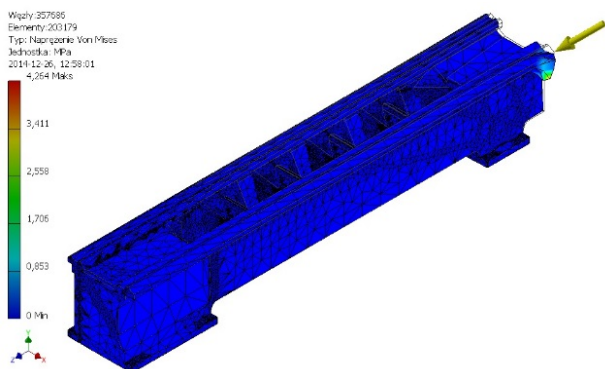


Rys. 12. Obciążenie korpusu siłą

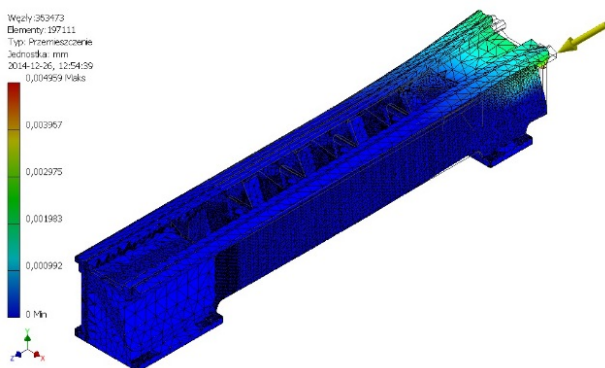
Jak wynika z rysunków 13, 14, 15 oraz 16 w przypadku korpusu hybrydowego wykonanego z połączenia żeliwa i odlewu mineralnego zarówno naprężenia jak i przemieszczenia były znacznie mniejsze niż w przypadku konstrukcji z tradycyjnego odlewu żeliwnego. Dla korpusu żeliwnego naprężenia wyniosły 22,52 MPa, a przemieszczenia 5  $\mu\text{m}$ , natomiast w przypadku konstrukcji hybrydowej naprężenia ukształtowały się na poziomie 4,26 MPa, a odkształcenia 3  $\mu\text{m}$  w tych samych warunkach obciążenia. Na tej podstawie można stwierdzić, że nastąpiło podwyższenie statycznej sztywności całej konstrukcji.



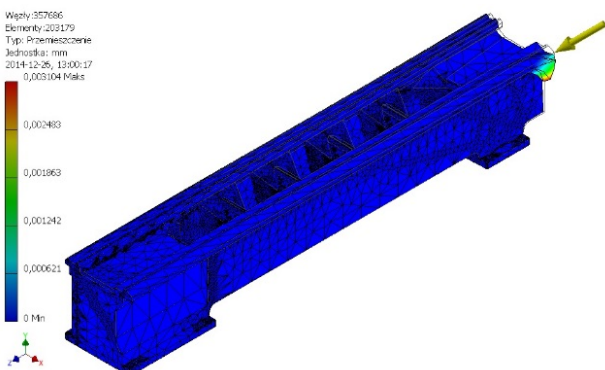
Rys. 13. Naprężenia korpusu żeliwnego



Rys. 14. Napięcia korpusu hybridowego



Rys. 15. Przemieszczenia korpusu żeliwnego



Rys. 16. Przemieszczenia korpusu hybridowego

## Wnioski

Przeprowadzono numeryczne badania właściwości dynamicznych oraz analizę statycznych właściwości wytrzymałościowych dwóch korpusów obrabiarki. Pierwszy z nich został w całości wykonany z żeliwa, natomiast drugi został wykonany z połączenia żeliwa z odlewem mineralnym. Przebadano pierwszych dwadzieścia postaci oraz częstotliwości drgań swobodnych obu korpusów. W przypadku korpusu hybridowego nastąpiło podwyższenie częstotliwości drgań swobodnych od 3,2% (przy niskich częstotliwościach) do 12,8% (przy wysokich częstotliwościach). Dodatkowe badania statyczne wykazały, że nastąpiło usztywnienie całej konstrukcji poprzez zastosowanie wypełnienie wolnych przestrzeni odlewem mineralnym. Zarówno badania dynamiczne jak i statyczne potwierdzają tezę sformułowaną na podstawie analizy literatury, że zastosowanie odlewu mineralnego wpływa na poprawę właściwości dynamicznych konstrukcji.

Podczas badań teoretycznych zastosowano metodę elementów skończonych w celu analizy hybridowego korpusu składającego się z dwóch materiałów konstrukcyjnych. Na granicy tych materiałów występuje kontakt, którego mo-

del został przyjęty jako tzw. kontakt spojony. To stanowi pewne uproszczenie, gdyż model kontaktu żeliwa i odlewu mineralnego wymaga identyfikacji doświadczalnej. Taka identyfikacja objęła właściwości materiałów konstrukcyjnych. Pomimo przyjętych uproszczeń zastosowanych w symulacjach komputerowych należy zauważyć, że podczas badań wystąpiła jednoznaczna zależność wskazująca na poprawę właściwości dynamicznych korpusu hybridowego w odniesieniu do korpusu wykonanego wyłącznie z żeliwa. Ten wniosek wymaga weryfikacji doświadczalnej, która będzie stanowił kolejny etap badań nad stworzeniem korpusu obrabiarki o znacznie lepszych właściwościach użytkowych.

## LITERATURA

1. Kwapisz L., Froncki W. „Zagadnienia wybrane z konstrukcji obrabiarek”, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź, 1994.
2. Bruni C., Forcellese A., Gabrielli F., Simoncini M. “Hard Turning of an Alloy Steel on a Machine Tool with a Polymer Concrete Bed”, *Journal of Materials Processing Technology*, pp.493-499, 2007.
3. Kępczak N., Pawłowski W. “Application of Mineral Casting for Machine Tools Beds”, *Mechanics and Mechanical Engineering*. Vol. 17, No. 3 (2013) 5-15, pp. 3-7, 2013.
4. Haddad H., Al Kobaisi M. “Optimization of the Polymer Concrete Used for Manufacturing Bases for Precision Tool Machines”. *Composites: Part B*, pp. 3061-3068, 2012.
5. Erbe T., Król J., Theska R., “Mineral Casting as Material for Machine Base-frames of Precision Machines”. *Twenty-third Annual Meeting of the American Society for Precision Engineering and Twelfth ICPE*, October, Portland, Oregon, 2008.
6. Cortés F., Castillo G., “Comparison Between the Dynamical Properties of Polymer Concrete and Grey Cast Iron for Machine Tool Applications. Elsevier, *Materials and Design* 28, pp. 1461-1466, 2006.
7. Kępczak N., Pawłowski W., Błażejowski W. „The Study of the Mechanical Properties of the Mineral Cast Material”, *Archives of Mechanical Technology and Automation*, pp. 25-32, 2014.