

Autoreferat

1. Imię i nazwisko.

Paweł Dunaj

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.

2.1. Doktor nauk inżyneryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna; podmiot nadający stopień: Rada Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie; rok uzyskania: 2019; temat rozprawy: „Modelowanie właściwości dynamicznych stalowo-polimerobetonowych korpusów maszyn technologicznych” (rozprawa obroniona z wyróżnieniem). Promotor: dr hab. inż. Marcin Chodźko, prof. ZUT; promotor pomocniczy: dr inż. Michał Dolata. Recenzenci rozprawy: prof. dr hab. inż. Krzysztof Kaliński (Politechnika Gdańska), dr hab. inż. Krzysztof Mendrok, prof. AGH. (Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie).

2.2. Magister inżynier, kierunek studiów: mechanika i budowa maszyn; specjalizacja: komputerowo wspomagane projektowanie i wytwarzanie; podmiot nadający tytuł zawodowy: Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie; rok uzyskania: 2015; temat pracy magisterskiej: „Zastosowanie wybranej metody syntezy modalnej do predykcji właściwości dynamicznych obrabiarki” (praca obroniona z wyróżnieniem). Promotor: dr hab. inż. Marcin Chodźko, prof. ZUT.

2.3. Inżynier, kierunek studiów: mechatronika; specjalizacja: układy mechatroniczne; podmiot nadający tytuł zawodowy: Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie; rok uzyskania: 2014; temat pracy inżynierskiej: „Badanie wpływu masy czujnika na postać funkcji przejścia dla różnych struktur”. Promotor: dr hab. inż. Marcin Chodźko, prof. ZUT.

2. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.

2.3. Adiunkt, miejsce zatrudnienia: Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, okres zatrudnienia: grudzień 2019 – obecnie.

- 2.4. Asystent z doktoratem, miejsce zatrudnienia: Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, okres zatrudnienia: październik – listopad 2019.
- 2.5. Asystent, miejsce zatrudnienia: Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie, okres zatrudnienia: październik 2018 – wrzesień 2019.
3. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej.

4.1. Wprowadzenie

Wymagania funkcjonalne stawiane nowoczesnym obrabiarkom skrawającym, obejmują uzyskiwanie wysokiej wydajności obróbki, przy zachowaniu wymaganej jakości powierzchni i dokładności wymiarowo-kształtowej przedmiotów obrabianych. Wysoka wydajność osiągnana jest najczęściej na drodze wysokich posuwów i dużych głębokości skrawania, co z kolei wiąże się z ryzykiem wystąpienia obróbki niestabilnej. Ta natomiast objawia się w postaci drgań samowzbudnych, powodujących wzrost chropowatości powierzchni obrabianej, pogorszenie dokładności wymiarowo-kształtowej przedmiotu obrabianego, a także szybsze zużycie narzędzi i elementów obrabiarki.

Zwiększenie stabilności obróbki można osiągnąć poprzez zastosowanie pasywnych lub aktywnych eliminatorów drgań, zmianę parametrów obróbki (co często wiąże się z obniżeniem wydajności procesu) lub odpowiednie ukształtowanie właściwości dynamicznych obrabiarki na etapie jej projektowania.

Obecnie, obrabiarki budowane są w dużej mierze z gotowych elementów, tj. elektrowrzecion, głowic narzędziowych, układów prowadnicowych, układów przeniesienia napędów. W związku z tym kształtowanie ich właściwości eksploatacyjnych często sprowadza się do odpowiedniego ukształtowania korpusów. Te najczęściej wykonywane są z żeliwa szarego. Materiał

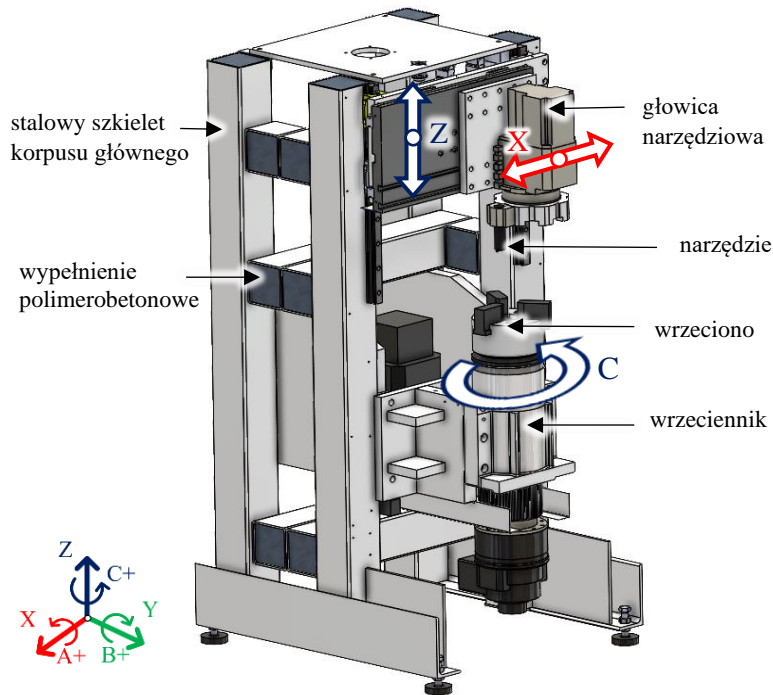
ten charakteryzują bardzo dobre właściwości odlewnicze, dobra skrawalność, dobra zdolność do tłumienia drgań, oraz zdolność do zachowania stałych wymiarów odlewu w czasie. Korpusy wykonane z żeliwa szarego nie są jednak rozwiązaniem pozbawionym wad; do tych można zaliczyć: wysokie koszty produkcji jednostkowej, konieczność sezonowania oraz znaczne ograniczenia pod względem możliwości modyfikacji istniejącej konstrukcji. Ponadto, cechuje je ograniczona możliwość kształtowania właściwości dynamicznych. Zwiększenie sztywności w danym punkcie konstrukcji lub na określonym kierunku uzyskuje się poprzez dodanie materiału, co z kolei zwiększa masę korpusu. Jednoczesna zmiana obu tych wielkości może spowodować, że właściwości dynamiczne konstrukcji pozostaną praktycznie niezmiennione.

Rozwiązaniem coraz częściej pojawiającym się w literaturze przedmiotu zapewniającym wymagane właściwości eksploatacyjne oraz umożliwiającym kształtowanie właściwości dynamicznych korpusów obrabiarek w szerokim zakresie, są korpusy hybrydowe. Powstają one w wyniku połączenia konwencjonalnych materiałów konstrukcyjnych, takich jak stal, żeliwo czy aluminium, z materiałami kompozytowymi. Pomimo, iż w ogólności korpusy hybrydowe charakteryzuje różnorodność rozwiązań pod względem zastosowanych materiałów, to dominują te wykorzystujące kompozyty na bazie włókna węglowego oraz polimerobeton.

Opracowanie technologii wytwarzania korpusów hybrydowych powstałych w wyniku połączenia stalowego spawanego szkieletu z polimerobetonowym wypełnieniem zrealizowano w jednostce, w której zatrudniony jest wnioskodawca – Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie w ramach projektu: (i) POIR.04.01.02-00-0078/416 pt. „Tokarka pionowa o lekkiej konstrukcji”.

W szerokim ujęciu problemu motywacją podjętych działań było opracowanie sposobu wytwarzania korpusów obrabiarek, konkurencyjnego do obecnie stosowanej technologii odlewania z żeliwa szarego. Konkurencyjność tę należy rozpatrywać pod względem zwiększonej możliwości kształtowania właściwości dynamicznych konstrukcji w celu zapewnienia wymaganej stabilności obróbki oraz zwiększenia szybkości prototypowania i wytwarzania samej obrabiarki, rozumiane jako skrócenie czasu od projektu do

wdrożenia. Prace nad prezentowaną technologią zrealizowano na tokarce pionowej przeznaczonej do obróbki krótkich detali typu tuleja lub tarcza, strukturę geometryczno-ruchową obrabiarki pokazano na rysunku 1.



Rysunek 1. Tokarka pionowa lekkiej konstrukcji o stalowo-polimerobetonowym korpusie głównym

Charakterystyczną cechą rozpatrywanej tokarki jest jej korpus główny utworzony przez zespawanie następujących elementów stalowych: (i) płyt o różnej grubości oraz (ii) profili o przekroju kwadratowym zamkniętym o wymiarach $140\text{ mm} \times 140\text{ mm}$ i grubości ścianki 6 mm . W celu poprawy właściwości eksploatacyjnych obrabiarki, w szczególności sztywności dynamicznej, wnętrza profili stalowych tworzących korpus główny wypełnia się polimerobetonem. To z kolei powoduje lokalny wzrost sztywności, tłumienia i bezwładności konstrukcji co przekłada się na zmianę struktury oraz parametrów układu masowo-dyssypacyjno-sprężystego będącego modelem odwiercieniem obrabiarki. W wyniku zmianie ulegają wartości częstotliwości własnych, postacie drgań własnych oraz tłumienia modalne, co w konsekwencji przekłada się na zmianę sztywności dynamicznej. Zastosowanie polimerobetonowego wypełnienia umożliwia zatem kształtowanie właściwości dynamicznych.

Kolejną istotną cechą prezentowanej obrabiarki jest możliwość stosunkowo taniego i szybkiego wytworzenia korpusu (w porównaniu do rozwiązań wykonanych z żeliwa szarego). Jest to związane z zastosowaniem spawanego

stalowego szkieletu wykonanego z dostępnych handlowo profili. Co więcej, wyeliminowany zostaje długotrwały proces sezonowania korpusu (nieodzowny w przypadku konstrukcji z żeliwa), pozwala to znaczne skrócenie wdrożenia rozwiązania. Stosowanie tej technologii wydaje się być szczególnie uzasadnione w przypadku produkcji jednostkowej lub małoseryjnej specjalnych, bądź specjalizowanych maszyn technologicznych, gdzie wykorzystanie korpusów odlewanych z żeliwa szarego, ze względu na wielkość produkcji oraz unikalne struktury geometryczno-ruchowe, jest ekonomicznie nieuzasadnione. Ponadto w produkcji obrabiarek specjalnych istotną rolę odgrywa czas „od projektu do wdrożenia”, który w rozpatrywanym przypadku stanowi o atrakcyjności zaproponowanej technologii.

Przedstawione rozwiązanie wydaje się wykazywać duży potencjał aplikacyjny ze względu na możliwości stosunkowo łatwego kształtowania właściwości dynamicznych korpusu oraz szybkiego wytwarzania. Jednak aby w pełni wykorzystać ten potencjał, konieczne było opracowanie polimerobetonu o odpowiednich właściwościach, a następnie umieszczenie go w konstrukcji stalowej w sposób zamierzony. Niekorzystny stosunek sztywności i masy może bowiem pozostawić właściwości dynamiczne niezmiennione (w stosunku do rozwiązania bez wypełnienia), lub w skrajnych przypadkach pogorszone nawet pomimo wprowadzenia polimerobetonu o wysokim tłumieniu. W związku z powyższym niezbędnym stało się opracowanie wiarygodnych metod modelowania właściwości dynamicznych tego typu konstrukcji.

Pierwsze prace obejmujące opracowanie metod wspomagających proces projektowania korpusów stalowo-polimerobetonowych wnioskodawca zrealizował w ramach rozprawy doktorskiej pt. „Modelowanie właściwości dynamicznych stalowo-polimerobetonowych korpusów maszyn technologicznych”. Najważniejszym osiągnięciem, przedstawionym rozprawie, było opracowanie metodyki modelowania struktur stalowo-polimerobetonowych w ujęciu a posteriori. Precyzując, dysponując zidentyfikowanym modelem elementów skończonych komponentu składowego rozpatrywanego korpusu (belki składającej się ze stalowego profilu zamkniętego o przekroju kwadratowym wypełnionego polimerobetonem) oraz modelami połączeń występujących pomiędzy tymi komponentami, możliwe było uzyskanie

Uwaga

Pelen tekst rozprawy doktorskiej stanowi załącznik (D.1.) do niniejszego wniosku.

wiarygodnego modelu złożonej konstrukcji. Należy podkreślić, iż w ramach rozprawy analizie poddano wyłącznie konstrukcje będące odzwierciedleniem rzeczywistego korpusu tokarki w skali 1:5, ponadto identyfikowano globalne zastępcze współczynniki materiałowe dla komponentów. Tym samym zaprezentowana metodyka pomimo, iż charakteryzowała się wysoką dokładnością odwzorowania właściwości dynamicznych, nie mogła jeszcze służyć jako kompletne narzędzie wspomagające proces projektowania.

W związku z tym w podsumowaniu rozprawy nakreślono kierunki dalszych prac. Obejmowały one rozwijanie opracowanej metodyki poprzez wykorzystanie identyfikacji substrukturalnej. Ta w zamyśle miała umożliwić dekompozycję złożonych modeli elementów skończonych na substruktury, których poziom mógł zostać zdefiniowany zgodnie z przeznaczeniem analizy. Następnie wyizolowane substruktury kolejno poddawano by dostrojeniu identyfikując ich właściwości, aby w dalszej kolejności opracować bibliotekę modeli, dzięki którym możliwe byłoby przewidywanie właściwości zbudowanych z nich większych, złożonych konstrukcji. Powinno to umożliwić wiarygodną predykcję właściwości eksploatacyjnych obrabiarki, bez konieczności stosowania ponownej identyfikacji dla pełnego modelu.

Działania te zrealizowano w niniejszym cyklu opracowując szereg metod modelowania i identyfikacji umożliwiających przewidywanie a priori właściwości statycznych i dynamicznych konstrukcji stalowo-polimerobetonowych na różnym poziomie uszczegółowienia.

4.2. Cel pracy i hipotezy badawcze

Przedkładany cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych obejmuje zagadnienia związane z projektowaniem obrabiarek o korpusach stalowo-polimerobetonowych; cel nadrzędny prac zdefiniowano jako:

opracowanie metod obliczeniowych wspomagających procesy projektowania obrabiarek o korpusach stalowo-polimerobetonowych.

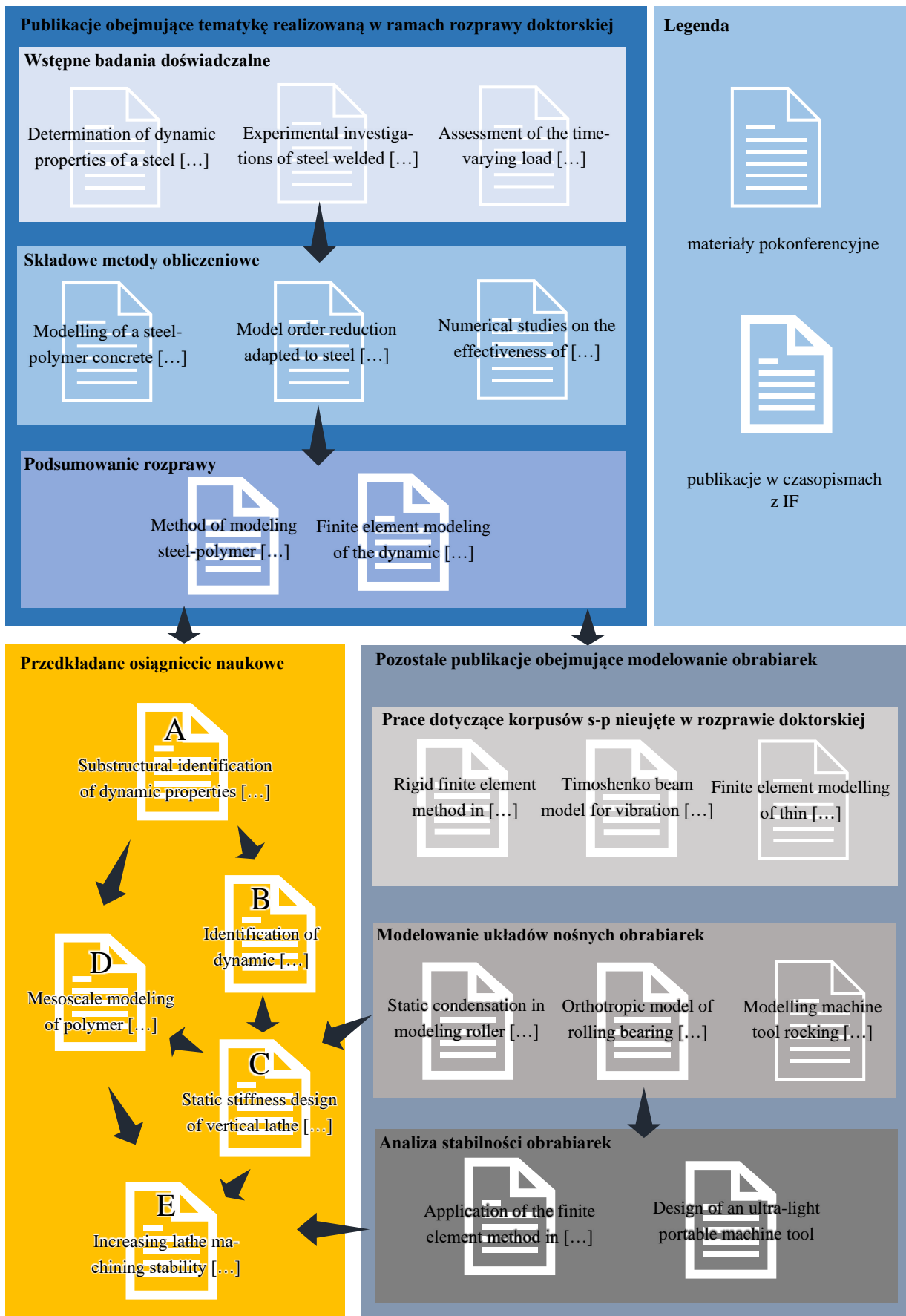
Realizacja niniejszego celu wymagała opracowania wiarygodnych metod modelowania wspomagających proces projektowania zarówno na poziomie konstrukcji jak i materiału. W związku z powyższym sformułowano następujące hipotezy badawcze:

- **zastosowanie identyfikacji substrukturalnej umożliwi wyznaczenie parametrów modeli elementów konstrukcyjnych niewystępujących w samodzielnej, wyizolowanej formie;**
- **zastosowanie w procesie projektowania zidentyfikowanych w ten sposób modeli pozwoli na wiarygodne wskazanie słabych ogniw konstrukcji oraz uniknięcie niekorzystnego sprzężenia jej właściwości masowo-dyssypacyjno-sprężystych.**

Pierwsza hipoteza odnosi się do wyznaczenia parametrów modeli, dla których identyfikacja w ich samodzielnej formie jest utrudniona lub niemożliwa, tj. polimerobetonowego wypełnienia współpracującego ze stalowym szkieletem korpusu, spoiny w konstrukcji spawanej oraz międzyfazowej strefy przejściowej w mezoskalowym modelu polimerobetonu. W związku z tym, iż elementy te nie występują w wyizolowanej formie, ich identyfikacji należy dokonywać w kontekście większej całości, odpowiednio: belki stalowo-polimerobetonowej, konstrukcji spawanej oraz mezoskalowym modelu materiału. Właściwym narzędziem wydaje się więc być metoda substrukturyzacji umożliwiająca dekompozycję złożonych modeli, a następnie identyfikację wybranych substruktur.

Druga hipoteza, związana jest z samym procesem projektowania obrabiarek o stalowo-polimerobetonowych korpusach głównych. Choć z pozoru oczywista, wskazuje na konieczność zastosowania zidentyfikowanych modeli elementów składowych obrabiarki celem poprawnej identyfikacji jej słabych ogniw i tym samym uniknięcia niekorzystnych sprzężeń właściwości masowo-dyssypacyjno-sprężystych (wypełnienie całego korpusu, polimerobetonem nie musi oznaczać najlepszego rozwiązania, nawet pomimo wysokiego tłumienia wprowadzanego materiału).

Potwierdzenie postawionych hipotez oraz realizacji celu prac udokumentowano w cyklu publikacji. Szczegółowe omówienie poszczególnych osiągnięć wraz z powiązaniem między nimi przedstawiono w kolejnym podpunkcie wniosku. Na rysunku 2 przedstawiono mapę publikacji uwzględniającą ogólne powiązania poszczególnych pozycji wchodzących w skład cyklu oraz ich umiejscowienie w całym dotychczasowym dorobku wnioskodawcy obejmujących analizę i modelowanie obrabiarek.



Rysunek 2. Mapa publikacji uwzględniająca umiejscowienie cyklu w dotychczasowym dorobku

4.3. Omówienie osiągnięć wchodzących w skład przedkładanego cyklu publikacji

W skład przedkładanego cyklu publikacji wchodzi następujące pozycje:

- A. P. Dunaj***, „Substructural identification of dynamic properties of composite structures”, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, t. 204, s. 112056, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2022.112056>.

- B. P. Dunaj***, „Identification of dynamic properties of thin-walled welded structures”, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, t. 216, s. 112931, 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112931>.

- C. P. Dunaj***, M. Dolata, J. Tomaszewski, i P. Majda, „Static stiffness design of vertical lathe with steel-polymer concrete frame”, *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, t. 121, nr 1, s. 1149–1160, lip. 2022, doi: [10.1007/s00170-022-09391-x](https://doi.org/10.1007/s00170-022-09391-x).

- D. P. Dunaj***, „Mesoscale modeling of polymer concrete dynamic properties”, *Polymers*, 2023 (praca przyjęta do druku).

- E. P. Dunaj***, B. Powalka, S. Berczyński, M. Chodźko, i T. Okulik, „Increasing lathe machining stability by using a composite steel-polymer concrete frame”, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, t. 31, s. 1–13, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2020.09.009>.

*autor korespondencyjny

Uwaga:

Omawiając poszczególne pozycje wchodzące w skład cyklu pominięto opis badań doświadczalnych, szczegóły tychże znajdują się w poszczególnych artykułach, zastosowane procedury są jednak standardowymi i jako takie nie stanowią o novum dokonania. Należy zaznaczyć, iż wszystkie badania doświadczalne z zakresu właściwości dynamicznych wnioskodawca zaplanował i przeprowadził samodzielnie.

A

Dane bibliograficzne

Tytuł artykułu: Substructural identification of dynamic properties of composite structures

Czasopismo: Measurement: Journal of the International Measurement Confederation (IF 5,6; MEiN 200 pkt.).

Wkład: Paweł Dunaj (100%)

Umieszczenie w cyklu

Artykuł stanowi podstawę cyklu; zawiera ogólną postać algorytmu umożliwiającego identyfikację parametrów modeli elementów skończonych, których wyznaczenie w ich samodzielnej formie jest utrudnione lub niemożliwe. Zaproponowany algorytm został wykorzystany w pracach [B] oraz [D], publikacje te wraz z zawartymi w nich analizami stanowią udowodnienie pierwszej postawionej hipotezy badawczej.

Wprowadzenie

Wiarygodne modelowanie właściwości dynamicznych konstrukcji jest zagadnieniem kluczowym w procesie projektowania [1]. Ze względu na to, że klasyczne podejście do modelowania, tj. aprioryczne określanie struktury modelu i wartości własności materiałowych (zazwyczaj określanych na podstawie badań statycznych), jest często niewystarczające, stosuje się metody identyfikacji modeli [2]. Metody te najczęściej opierają się na tzw. dostrajaniu (ang. *updating*), a więc iteracyjnej zmianie parametrów modeli w taki sposób, aby uzyskać możliwie najmniejszą różnicę między właściwościami dynamicznymi wyznaczonymi obliczeniowo i doświadczalnie [3].

Przedstawiony w artykule przegląd stanu zagadnienia wskazuje, iż literatura przedmiotu prawie nie wspomina o doświadczalnej weryfikacji częstotliwościowych funkcji przejścia (uwzględniających tłumienie konstrukcji) do wyznaczania parametrów modeli elementów konstrukcyjnych niewystępujących w samodzielnej, wyizolowanej formie [4]. Badania koncentrują się głównie na dostrojeniu wartości częstotliwości drgań własnych i postaci

drgań własnych [5], [6]. Ponadto, wartości zidentyfikowanych parametrów modelu często znacznie odbiegają od wartości początkowych wyznaczonych np. ze statycznych badań wytrzymałościowych [7].

W związku ze wskazanym brakiem, w artykule zaproponowano algorytm identyfikacji modeli elementów skończonych oparty na substrukturyzacji (ang. *substructuring*). Przyjęto kryterium identyfikacji polegające na zminimalizowaniu różnicy między częstotliwościowymi funkcjami przejścia wyznaczonymi obliczeniowo i doświadczalnie. Dodatkowo uzupełniono je doświadczalnie wyznaczoną macierzą kowariancji, której odwrotność stanowi wagę dostrojenia.

Metodyka

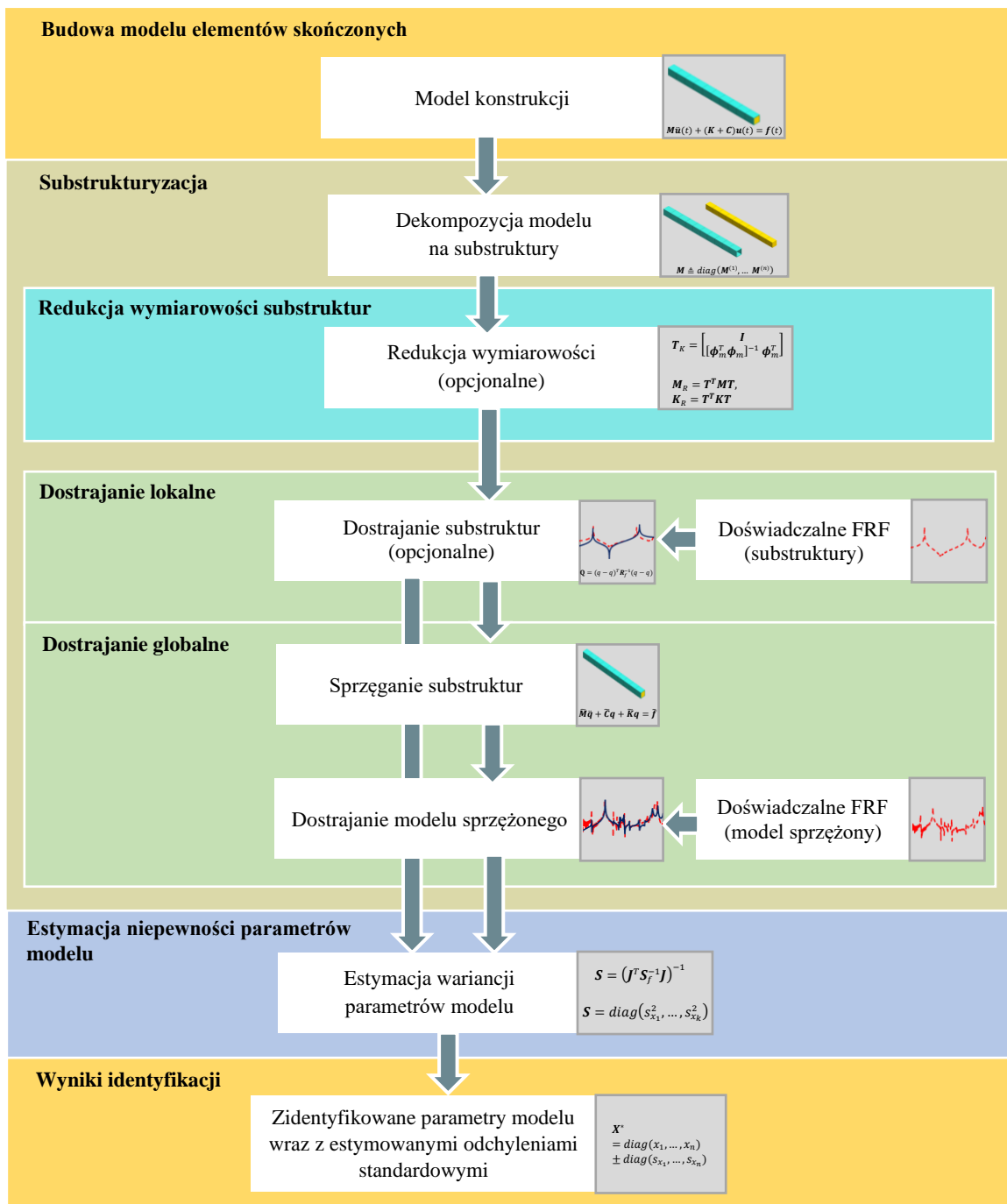
Zaproponowany algorytm przeznaczony jest do dostrajania modeli elementów skończonych. W pierwszym etapie dokonuje się dekompozycji modelu na substrukture. Ta powinna być zrealizowana zgodnie z rzeczywistymi połączeniami występującymi między poszczególnymi częściami konstrukcji. W razie potrzeby, poszczególne substrukture można poddać redukcji wymiarowości, celem skrócenia czasu obliczeń.

Następnie realizowana jest procedura dostrajania, która dzieli się na dwa etapy: (i) dostrajanie lokalne, polegające na dostrajaniu wybranych substruktur oraz (ii) dostrajanie globalne, polegające na dostrajaniu globalnego (ponownie sprzężonego) modelu.

Dostrajanie lokalne ma na celu identyfikację parametrów wyizolowanych substruktur. Parametry te raz wyznaczone nie ulegną zmianie w kolejnym etapie. Dostrajanie globalne modelu odbywa się po sprzęgnięciu substruktur i polega na dostrojeniu pozostałych (nieuwzględnionych w pierwszym etapie) parametrów modelu sprzężonego (lub substruktur).

Zarówno w przypadku dostrajania lokalnego jak i globalnego odbywa się ono na zasadzie minimalizacji kryterium identyfikacji zdefiniowanego jako różnica amplitud częstotliwościowych funkcji przejścia wyznaczonych obliczeniowo (dla zidentyfikowanego modelu) i doświadczalnie. Ponadto funkcja celu może zostać uzupełniona o doświadczalnie wyznaczoną odwrotność macierzy kowariancji będącą wagą dostrojenia.

Podejście to zapewnia nie tylko punktową, jak ma to miejsce w przypadku wartości częstotliwości drgań własnych, ale również pasmową identyfikację właściwości dynamicznych rozpatrywanej konstrukcji. Parametry modelu zarówno na poziomie lokalnym, jak i globalnym mogą być korygowane w zakresie wartości niepewności wyznaczonych np. na podstawie badań statycznych (poprzez nałożenie ograniczeń w ich zmienności). W wyniku otrzymuje się wartości parametrów modelu, dla których możliwe jest oszacowanie niepewności. Opisaną procedurę przedstawiono schematycznie na rysunku A1.



Rysunek A.1. Schemat zaproponowanego algorytmu identyfikacji substrukturalnej

Model elementów skończonych

Jak zaznaczono na wstępie, zaproponowany algorytm służy identyfikacji parametrów modeli elementów skończonych. Równanie ruchu dla dyskretnego modelu układu fizycznego zbudowanego zgodnie z tą metodą przyjmuje następującą postać:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}\dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}\mathbf{u}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (\text{A.1})$$

gdzie: $\mathbf{M}, \mathbf{C}, \mathbf{K}$ – macierze mas, tłumienia oraz sztywności, $\ddot{\mathbf{u}}, \dot{\mathbf{u}}, \mathbf{u}$ – wektory uogólnionych przyspieszeń, prędkości oraz przemieszczeń poszczególnych węzłów modelu, \mathbf{f} – wektor sił uogólnionych działających w węzłach modelu.

Dekompozycja

Zgodnie z przedstawionym schematem (rys. A.1) w pierwszym kroku należy dokonać dekompozycji modelu analizowanej konstrukcji. Tę należy przeprowadzić rozdzielając model globalny na substrukтуры obejmujące składowe analizowanej konstrukcji.

Równanie ruchu dla poszczególnych substruktur można zapisać w postaci:

$$\mathbf{M}^{(c)}\ddot{\mathbf{u}}^{(c)}(t) + \mathbf{C}^{(c)}\dot{\mathbf{u}}^{(c)} + \mathbf{K}^{(c)}\mathbf{u}^{(c)}(t) = \mathbf{f}^{(c)}(t) \quad (\text{A.2})$$

gdzie: c – oznaczenie substruktury, $c \in \{1, 2, \dots, s\}$, gdzie s jest liczbą substruktur uwzględnionych w analizie.

Redukcja wymiarowości modelu (etap fakultatywny)

Wprowadzona w algorytmie redukcja wymiarowości modelu jest etapem opcjonalnym i ma na celu skrócenie czasu obliczeń związanych z wyznaczeniem częstotliwościowych funkcji przejścia, których iteracyjne obliczanie w procesie dostrajania może być czasochłonne.

Celem redukcji jest znalezienie modelu o m stopniach swobody, odzwierciedlającego właściwości dynamiczne modelu pełnego (przed redukcją) o n stopniach swobody, przy czym $m \ll n$. Redukcji dokonuje się poprzez aproksymację wektora współrzędnych uogólnionych z zastosowaniem następującej transformacji:

$$\mathbf{u}^{(c)} = \mathbf{T}\mathbf{u}_r^{(c)} \quad (\text{A.3})$$

gdzie: \mathbf{T} – macierz transformacji $\mathbf{T} \in \mathbb{R}^{n \times m}$, $\mathbf{u}_r^{(c)}$ – zredukowany wektor przemieszczeń uogólnionych dla substruktury $\mathbf{u}_r^{(c)} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$. Równanie ruchu modelu zredukowanego przyjmuje postać:

$$\mathbf{M}_r^{(c)} \ddot{\mathbf{u}}_r^{(c)} + \mathbf{C}_r^{(c)} \dot{\mathbf{u}}_r^{(c)}(t) + \mathbf{K}_r^{(c)} \mathbf{u}_r^{(c)} = \mathbf{f}_r \quad (\text{A.4})$$

zredukowane macierze $\mathbf{M}_r, \mathbf{C}_r, \mathbf{K}_r$ można zapisać jako:

$$\mathbf{M}_r^{(c)} = \mathbf{T}^T \mathbf{M}^{(c)} \mathbf{T}, \quad (\text{A.5})$$

$$\mathbf{C}_r^{(c)} = \mathbf{T}^T \mathbf{C}^{(c)} \mathbf{T}, \quad (\text{A.6})$$

$$\mathbf{K}_r^{(c)} = \mathbf{T}^T \mathbf{K}^{(c)} \mathbf{T}. \quad (\text{A.7})$$

Definicja macierzy transformacji \mathbf{T} zależy od zastosowanej metody redukcji, spośród których najpopularniejszymi są: metoda Craiga-Bamptona [8] oraz Guyana [9]. Analizę stosowalności tych metod w redukcji wymiarowości modeli belek stalowo-polimerobetonowych uzupełnioną o metodę redukcji Kammera [10] wnioskodawca przedstawił w pracy [11].

Dostrajanie lokalne (etap fakultatywny)

W następnym kroku dokonuje się dostrajania lokalnego obejmującego wybrane substruktury. Procedura sprowadza się do zadania optymalizacji, polegającego na minimalizacji kryterium identyfikacji (funkcji celu) $\mathbf{Q}^{(c)}$ zdefiniowanego w następujący sposób:

$$\mathbf{Q}^{(c)}(x_1^{(c)}, x_2^{(c)}, \dots, x_j^{(c)}) = \left[\ddot{\mathbf{y}}_{exp}^{(c)} - \ddot{\mathbf{y}}^{(c)} \right]^T \mathbf{S}_\omega^{(c)-1} \left[\ddot{\mathbf{y}}_{exp}^{(c)} - \ddot{\mathbf{y}}^{(c)} \right], \quad (\text{A.8})$$

gdzie: $x_1^{(c)}, x_2^{(c)}, \dots, x_j^{(c)}$ – identyfikowane parametry modelu substruktury;

$\ddot{\mathbf{y}}^{(c)}$ – funkcja akceleracji wyznaczona na podstawie modelu substruktury;

$\ddot{\mathbf{y}}_{exp}^{(c)}$ – doświadczalnie wyznaczona funkcja akceleracji dla identyfikowanej

substruktury; $\mathbf{S}_\omega^{(c)-1}$ – macierz wagowa – odwrotność macierzy kowariancji

dla identyfikowanej substruktury, przy założeniu, iż identyfikowane parametry

modelu są od siebie niezależne macierz tę zdefiniowana jest w sposób

następujący:

$$\mathbf{S}_\omega^{(c)-1} = \text{diag} \left(\frac{1}{s_{\omega_1}^2}, \dots, \frac{1}{s_{\omega_l}^2}, \dots, \frac{1}{s_{\omega_p}^2} \right)_{p \times p}, \quad (\text{A.9})$$

gdzie: $s_{\omega_l}^2$ – wariancja na podstawie doświadczalnie wyznaczonej akceleracji

$\ddot{\mathbf{y}}_{exp}^{(c)}$, dla kolejnych częstotliwości ω_l gdzie $l \in \langle 1, p \rangle$, i p jest górną

granicą analizowanego przedziału częstotliwości. Macierz wagowa odwrotności wariancji $\mathbf{S}_\omega^{(c)^{-1}}$ jest wyznaczana na podstawie danych doświadczalnych przez wyznaczenie wariancji w każdym punkcie częstotliwościowej funkcji przejścia w analizowanym zakresie. Wariancje te są obliczane z funkcji wyznaczanych wielokrotnie między tymi samymi punktami.

Zmiennymi decyzyjnymi w niniejszym procesie optymalizacji są identyfikowane parametry substruktur – najczęściej własności materiałowe.

Sprzęganie substruktur

W kolejnym kroku ma odbywać się sprzęganie poszczególnych substruktur. Te realizowane jest na przez odpowiednio sformułowane macierze blokowe, będące składowymi następującego równania:

$$\mathbf{M}_b \ddot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{C}_b \dot{\mathbf{u}}(t) + \mathbf{K}_b \mathbf{u}(t) = \mathbf{f}_b(t), \quad (\text{A.10})$$

poszczególne macierze definiuje się następująco:

$$\mathbf{M}_b \triangleq \text{diag}(\mathbf{M}^{(1)}, \dots, \mathbf{M}^{(c)}, \dots, \mathbf{M}^{(s)}), \quad (\text{A.11})$$

$$\mathbf{K}_b \triangleq \text{diag}(\mathbf{K}^{(1)}, \dots, \mathbf{K}^{(c)}, \dots, \mathbf{K}^{(s)}), \quad (\text{A.12})$$

$$\mathbf{C}_b \triangleq \text{diag}(\mathbf{C}^{(1)}, \dots, \mathbf{C}^{(c)}, \dots, \mathbf{C}^{(s)}), \quad (\text{A.13})$$

$$\mathbf{f}_b \triangleq \text{col}(\mathbf{f}^{(1)}, \dots, \mathbf{f}^{(c)}, \dots, \mathbf{f}^{(s)}). \quad (\text{A.14})$$

Dodatkowo definiowana jest zależność zgodności przemieszczeń:

$$\mathbf{B}\mathbf{u} = \mathbf{0}, \quad (\text{A.15})$$

gdzie: \mathbf{B} – macierz Boole’a, definiująca zgodność stopni swobody interfejsu łączonych substruktur na podstawie, której wyznacza się macierz lokalizacyjną \mathbf{L} stanowiącą jądro macierzy \mathbf{B} , co można zapisać:

$$\mathbf{L} = \text{null}(\mathbf{B}). \quad (\text{A.16})$$

Następnie można zdefiniować zależność:

$$\mathbf{u} = \mathbf{L}\mathbf{q}, \quad (\text{A.17})$$

gdzie: \mathbf{L} – macierz lokalizacyjna; \mathbf{q} – wektor unikalnych (niepowtarzających się) stopni swobody modelu. Szczegółowy opis budowy macierzy \mathbf{B} oraz \mathbf{L} można znaleźć w [12].

Podstawiając równanie (A.17) do równania (A.10), otrzymuje się następującą zależność:

$$\mathbf{M}_b \mathbf{L} \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}_b \mathbf{L} \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{K}_b \mathbf{L} \mathbf{q} = \mathbf{f}_b. \quad (\text{A.18})$$

Mnożąc lewostronnie równanie (A.18) przez \mathbf{L}^T , uzyskuje się:

$$\tilde{\mathbf{M}}\ddot{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{C}}\dot{\mathbf{q}} + \tilde{\mathbf{K}}\mathbf{q} = \tilde{\mathbf{f}}, \quad (\text{A.19})$$

gdzie macierze opisujące sprzężony model zdefiniowane są w sposób następujący:

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{M}} \triangleq \mathbf{L}^T \mathbf{M}_b \mathbf{L} \\ \tilde{\mathbf{C}} \triangleq \mathbf{L}^T \mathbf{C}_b \mathbf{L} \\ \tilde{\mathbf{K}} \triangleq \mathbf{L}^T \mathbf{K}_b \mathbf{L} \\ \tilde{\mathbf{f}} \triangleq \mathbf{L}^T \mathbf{f}_b \end{cases} \quad (\text{A.20})$$

Dostrajanie globalne

Po sprzęgnięciu modelu przeprowadzana jest procedura globalnego dostrajania parametrów, zrealizowana w sposób analogiczny do dostrajania lokalnego:

$$\mathbf{Q}(x_1, x_2 \dots x_j) = [\dot{\mathbf{y}}_{exp} - \dot{\mathbf{y}}]^T \mathbf{S}_\omega^{-1} [\dot{\mathbf{y}}_{exp} - \dot{\mathbf{y}}], \quad (\text{A.21})$$

gdzie: $\dot{\mathbf{y}}$ – funkcja akceleracji wyznaczona na podstawie modelu sprzężonego; $\dot{\mathbf{y}}_{exp}$ – doświadczalne wyznaczona funkcja akceleracji dla pełnego obiektu rzeczywistego; $x_1, x_2 \dots x_j$ – identyfikowane parametry modelu, lub substruktury nieuwzględnione w etapie dostrajania lokalnego. \mathbf{S}_ω^{-1} – odwrotności macierzy kowariancji dla obiektu rzeczywistego, zdefiniowana w sposób analogiczny do przedstawionego w równaniu (A.9).

Estymacja wariancji parametrów modelu

Do oszacowania wariancji zidentyfikowanych parametrów modelu można wykorzystać zależność przedstawioną w [13]:

$$\mathbf{S} \cong (\mathbf{J}^T \mathbf{S}_\omega^{-1} \mathbf{J})^{-1} \quad (\text{A.22})$$

gdzie: \mathbf{S} – macierz kowariancji parametrów modelu, zawierająca na głównej przekątnej wariancje tychże, tj. $diag(\mathbf{S}) = [s_{x_1}^2, \dots, s_{x_j}^2, \dots, s_{x_k}^2]^T$ (przy założeniu, iż identyfikowane parametry są od siebie niezależne), \mathbf{J} – Jakobian częstotliwościowej funkcji przejścia $\dot{\mathbf{y}}(x_1, x_2, \dots, x_k, \omega)$, zdefiniowany w sposób następujący:

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_k} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_2}{\partial x_k} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_p}{\partial x_1} & \frac{\partial f_p}{\partial x_2} & \dots & \frac{\partial f_p}{\partial x_k} \end{bmatrix}_{p \times k}, \quad (\text{A.23})$$

gdzie: x_j – identyfikowany parametr modelu, gdzie $x_j \sim N(\bar{x}_j, \bar{s}_{x_j}^2)$ i $j \in \langle 1, k \rangle$; $\partial f(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k, \omega) / \partial x_j$ – pierwsza pochodna funkcji $\mathbf{y} = f(x_1, x_2, \dots, x_k, \omega)$ po x_j , policzona w punkcie $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_k, \omega)$.

W rezultacie można wyznaczyć zbiór zidentyfikowanych parametrów modelu wraz z oszacowanymi odchyleniami standardowymi:

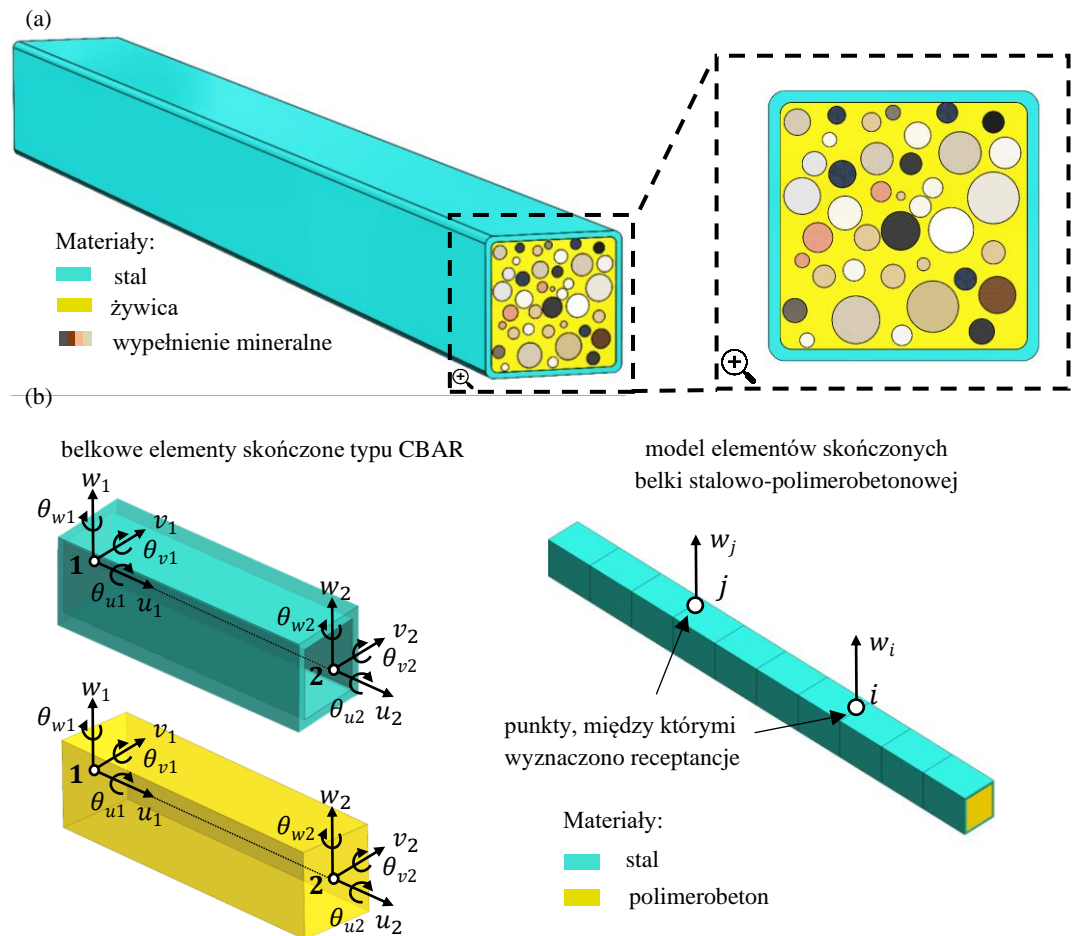
$$\hat{x}_j = \bar{x}_j \pm 2s_{x_j}. \quad (\text{A.24})$$

Wyznaczenie odchylenia standardowego zidentyfikowanych parametrów modelu ma fundamentalne znaczenie praktyczne. Analiza wartości odchyłeń standardowych pozwala na ocenę jednoznaczności zidentyfikowanych wielkości. Gdy oszacowane wariancje niektórych z nich są duże, zwykle nie jest to spowodowane poważnymi błędami obserwacji, a wynika to z niedostatecznych informacji z doświadczenia, które nie pozwalają jednoznacznie określić wartości parametrów modelu. W takim przypadku należy zwiększyć ilość danych doświadczalnych, aby uzyskać więcej informacji o rzeczywistych właściwościach obiektu. Można tego dokonać albo poprzez zwiększenie liczby doświadczalnych częstotliwościowych funkcji przejścia (na podstawie których przeprowadzana jest identyfikacja), albo poprzez rozszerzenie ich rozpatrywanego zakresu częstotliwościowego.

Wyniki

W artykule zastosowano algorytm do rozwiązania problemu identyfikacji parametrów opisujących właściwości dynamiczne modelu belki stalowo-polimerowej. Rozpatrywana belka stanowi podstawowy komponent projektowanego korpusu tokarki pionowej. W badaniu przeanalizowano belkę składającą się z zamkniętego profilu stalowego (o wymiarach przekroju poprzecznego 70 mm × 70 mm, grubości ścianki 3 mm i długości 1000 mm) i polimerobetonowego wypełnienia. Koncepcję belki polimerobetonowej wraz z jej modelem elementów skończonych przedstawiono na rysunku A.2. Model dyskretny zbudowano z zastosowaniem jednowymiarowych elementów

skończonych (CBAR), sformułowanych w oparciu o klasyczną teorię belek, której zasadność z modelowaniu tego typu konstrukcji wnioskodawca przedstawił w [14], [15].



Rysunek A.2. Konceptja belki stalowo-polimerobetonowej (a) wraz z jej modelem elementów skończonych (b)

W ramach badań przeanalizowano trzy przypadki: (i) identyfikację z uwzględnieniem wyłącznie dostrajania globalnego, (ii) identyfikację z uwzględnieniem dostrajania lokalnego stalowego płaszcza oraz (iii) identyfikację z uwzględnieniem redukcji wymiarowości modelu. We wszystkich analizowanych przypadkach identyfikowanymi parametrami modelu były: moduły Younga i gęstości dla stali i polimerobetonu oraz współczynnik strat dla polimerobetonu. Parametry te wybrano na podstawie wyników analizy wrażliwości zrealizowanej w oparciu o zdefiniowany wcześniej Jakobian J (A.23).

Uwaga

Wartości początkowe parametrów modelu wyznaczono na podstawie badań statycznych (moduły Younga, liczby Poissona) oraz testów impulsowych (współczynnik strat wyznaczony z metody połowy mocy).

Wyniki analiz zamieszczono tabeli A.1 (porównanie wartości parametrów modelu przed i po identyfikacji) oraz na rysunkach A.3-A.5 (porównanie

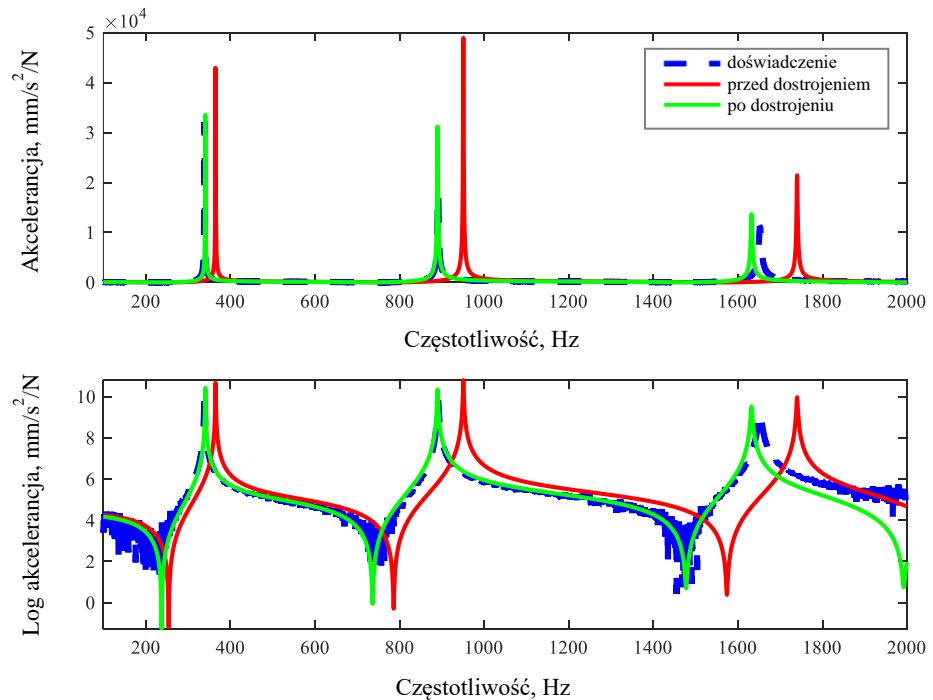
przebiegów funkcji receptancji wyznaczonych między stopniami swobody w_i oraz w_j zdefiniowanymi na rysunku A.2.).

Tabela A.1. Porównanie wartości parametrów modelu przed i po dostrajaniu

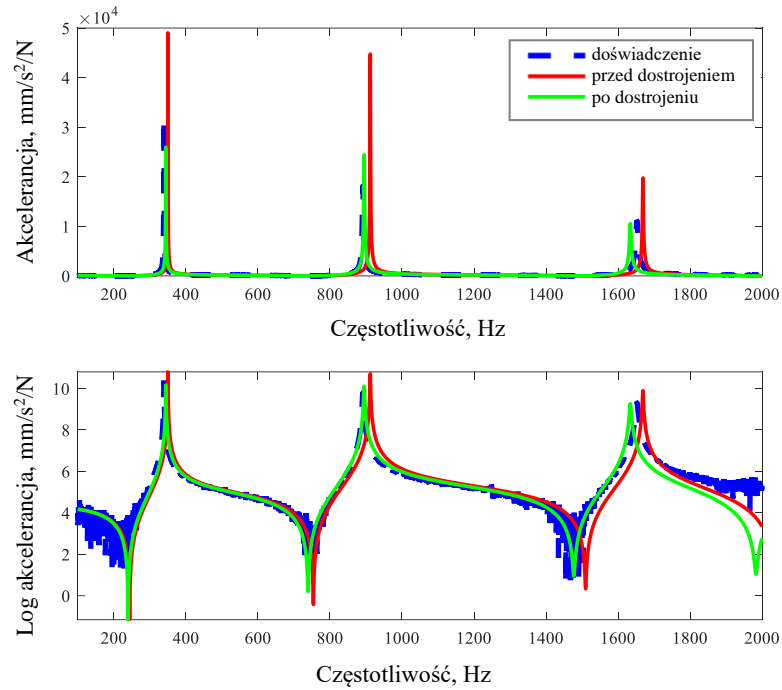
Własność	Wartość początkowa	Wartość zidentyfikowana	Różnica względna
Przypadek 1.			
Moduł Younga stali, E_s	210 GPa	184 GPa \pm 0,7 GPa	12,4 %
Moduł Younga polimerobetonu, E_{pc}	17,2 GPa	15,3 GPa \pm 0,05 GPa	11,0 %
Gęstość stali, ρ_s	7812 kg/m ³	8202 kg/m ³ \pm 139 kg/m ³	5,0 %
Gęstość polimerobetonu, ρ_{pc}	2200 kg/m ³	2310 kg/m ³ \pm 30 kg/m ³	5,0 %
Współczynnik strat polimerobetonu, η_{pc}	0,0152	0,0830 \pm 0,0003	446,1 %
Przypadek 2.			
Moduł Younga stali, E_s	210 GPa	214 GPa \pm 0,8 GPa	1,9 %
Moduł Younga polimerobetonu, E_{pc}	17,2 GPa	13,0 GPa \pm 0,07 GPa	24,4 %
Gęstość stali, ρ_s	7812 kg/m ³	8200 kg/m ³ \pm 119 kg/m ³	5,0 %
Gęstość polimerobetonu, ρ_{pc}	2200 kg/m ³	2440 kg/m ³ \pm 28 kg/m ³	10,9 %
Współczynnik strat polimerobetonu, η_{pc}	0,0022	0,0004 \pm 0,00002	81,8 %
Przypadek 3.			
Moduł Younga stali, E_s	210 GPa	182 GPa \pm 0,6 GPa	13,3 %
Moduł Younga polimerobetonu, E_{pc}	17,2 GPa	15,7 GPa \pm 0,09 GPa	8,7 %
Gęstość stali, ρ_s	7812 kg/m ³	8235 kg/m ³ \pm 150 kg/m ³	5,4 %
Gęstość polimerobetonu, ρ_{pc}	2200 kg/m ³	2290 kg/m ³ \pm 27 kg/m ³	4,1 %
Współczynnik strat polimerobetonu, η_{pc}	0,0152	0,0851 \pm 0,0005	459,9 %

Uwaga

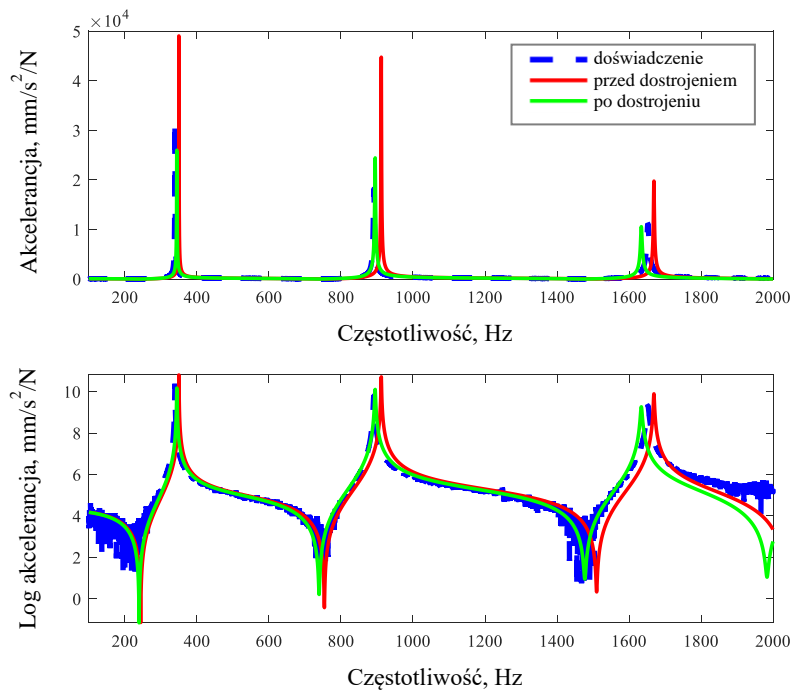
Dane doświadczalne wykorzystane w procesie identyfikacji pozyskano w wyniku przeprowadzenia testu impulsowego. Szczegółowy opis można znaleźć w [A].



Rysunek A.3. Porównanie częstotliwościowych funkcji przejścia przed i po dostrajeniu – przypadek 1.



Rysunek A.4. Porównanie częstotliwościowych funkcji przejścia przed i po dostrojeniu – przypadek 2.



Rysunek A.5. Porównanie częstotliwościowych funkcji przejścia przed i po dostrojeniu – przypadek 3.

Dyskusja wyników

Zaprezentowany w artykule algorytm umożliwia identyfikację parametrów modeli elementów skończonych, w tym elementów konstrukcyjnych niewystępujących w samodzielnej, wyizolowanej formie (w przedstawionej analizie polimerobetonowego wypełnienia).

Zastosowanie dostrajania globalnego i lokalnego pozwala na zdefiniowanie parametrów modeli spójnych w obrębie całej konstrukcji. Ma to szczególne znaczenie w przypadku, w którym różne materiały występują samodzielnie lub współpracując ze sobą. Przykładem są stalowe profile będące składowymi korpusu głównego rozpatrywanej tokarki. Mogą one występować jako samodzielne elementy konstrukcyjne lub jako wypełnione polimerobetonem.

Porównując wyniki identyfikacji jednoetapowej (przypadek 1.) i dwustopniowej (przypadek 2.) zauważono, że dla obu uzyskano wysoką dokładność. Pomimo, że dla identyfikacji jednoetapowej uzyskano mniejszy błąd średni dla wartości częstotliwości drgań własnych, to nie da się jednoznacznie wskazać wyższości tego podejścia. Rozbieżności mogą wynikać z działania zastosowanego algorytmu optymalizacyjnego.

Wyraźna różnica widoczna jest natomiast w przypadku czasu obliczeń. Dwuetapowe podejście jest bardziej czasochłonne (około dwukrotnie); wynika to głównie z faktu, że dostrajanie musi zostać przeprowadzone na etapie lokalnym i globalnym. Skrócenie czasu obliczeń można uzyskać stosując zredukowane modele substruktur, co przedstawiono w przypadku 3. Zastosowana redukcja nieznacznie wpływa na dokładność identyfikacji, przy czym znacznie skraca czas obliczeń (około czterokrotnie w porównaniu do przypadku 1.).

Przedstawiona metoda identyfikacji modelu, dzięki zastosowaniu substrukturacji, może okazać się przydatna w identyfikacji właściwości dynamicznych elementów konstrukcji złożonych z powtarzalnych elementów. Przykładem takiego elementu może być belka stalowa wypełniona polimerobetonem tylko w pewnych odcinkach. Koncepcje takiej belki przedstawiono w [16]. Przewagą proponowanej metody nad podejściem konwencjonalnym wydaje się być brak konieczności wykonywania obliczeń na złożonym modelu całej konstrukcji, a zamiast tego zastosowanie jego odpowiednika składającego się ze zredukowanych substruktur (we wskazanej pracy – wypełnienia). Zatem metoda może okazać się równie przydatna w identyfikowaniu kompozytów o strukturze hierarchicznej (ang. *hierarchical composite materials*).

Ponadto, zaprezentowany algorytm umożliwia pomiar (identyfikację) samego tłumienia konstrukcji. Ten nie odbywa się jednak w ujęciu klasycznym,

Uwaga

W przypadku złożonych konstrukcji mechanicznych często, poszczególne postacie charakteryzowane są różnymi tłumieniami modalnymi. Istnieją oczywiście metody modelowania uwzględniające takie zjawiska, aczkolwiek aprioryczne określenie tłumienia w tym wypadku bywa problematyczne.

lecz poprzez dostrojenie modelu (analogicznie do estymacji parametrów w eksperymentalnej analizie modalnej [17]). Może to oczywiście budzić pewne wątpliwości, jednak ze względu na trudność ilościowego określenia tłumienia charakteryzującego złożone konstrukcje wydaje się być atrakcyjną alternatywą dla obecnie stosowanej metody połowy mocy. Ta umożliwia dokładne odwzorowanie tłumienia tylko dla układu o jednym stopniu swobody. W przypadku bardziej złożonym dokładność odwzorowania maleje, zwłaszcza gdy konstrukcje charakteryzują tzw. sprzężone postacie drgań (ang. *coupled mode shapes*).

Potencjalnym ograniczeniem prezentowanego algorytmu może być niezgodność strukturalna modelu (objawiająca się niezgodnością postaci drgań własnych uzyskanych doświadczalnie i obliczeniowo). Taka sytuacja wymagałaby głębszego rozważenia założeń modelu i ewentualnej modyfikacji jego struktury. Ograniczenie to ujawniło się w prezentowanym badaniu poprzez niezgodność skrętnych postaci drgań. Może to wynikać z niedokładnego przedstawienia w modelu sztywności skrętnej, która jest wyznaczana przy użyciu współczynnika korekcyjnego dla przekrojów niekołowych.

Kolejnym problematycznym zagadnieniem może okazać się identyfikacja układów mechanicznych charakteryzujących się tłumieniem nieproporcjonalnym; jednoznaczne określenie stosowności zaproponowanego algorytmu w tym przypadku wymaga jednak dalszych badań.

Podsumowanie

Zaprezentowany w artykule algorytm umożliwia identyfikację parametrów modeli elementów skończonych, w tym elementów konstrukcyjnych niewystępujących w samodzielnej, wyizolowanej formie. Cechą wyróżniającą go jest zastosowanie metody substrukturyzacji oraz kryterium identyfikacji bazującego na częstotliwościowych funkcjach przejścia uzupełnionych funkcją wagi będącą odwrotnością macierzy kowariancji.

B

Dane bibliograficzne

Tytuł artykułu: Identification of dynamic properties of thin-walled welded structures

Czasopismo: Measurement: Journal of the International Measurement Confederation (IF 5,6; MEiN 200 pkt.).

Wkład: Paweł Dunaj (100%)

Umieszczenie w cyklu

Artykuł zawiera metodykę modelowania i identyfikacji (na podstawie [A]) właściwości dynamicznych cienkościennych konstrukcji spawanych. Opracowana metodyka stanowi podstawowe narzędzie modelowania stalowo-polimerobetonowego korpusu tokarki pionowej, które wykorzystano w artykułach [C] i [E].

Wprowadzenie

Modelowanie właściwości dynamicznych cienkościennych stalowych konstrukcji spawanych jest zagadnieniem złożonym [18], wynika to głównie z problemów związanych z dokładnym odwzorowaniem właściwości tłumiących, jakie wprowadza do konstrukcji sam proces spawania [19].

Literatura przedmiotu wskazuje, iż ze względu na dużą liczbę czynników wpływających na właściwości dynamiczne połączeń spawanych oraz ograniczoną możliwość ich kontroli [20]–[22], aprioryczne przewidywanie tych właściwości staje się niezwykle trudne, zwłaszcza w przypadku analizy złożonych konstrukcji [23].

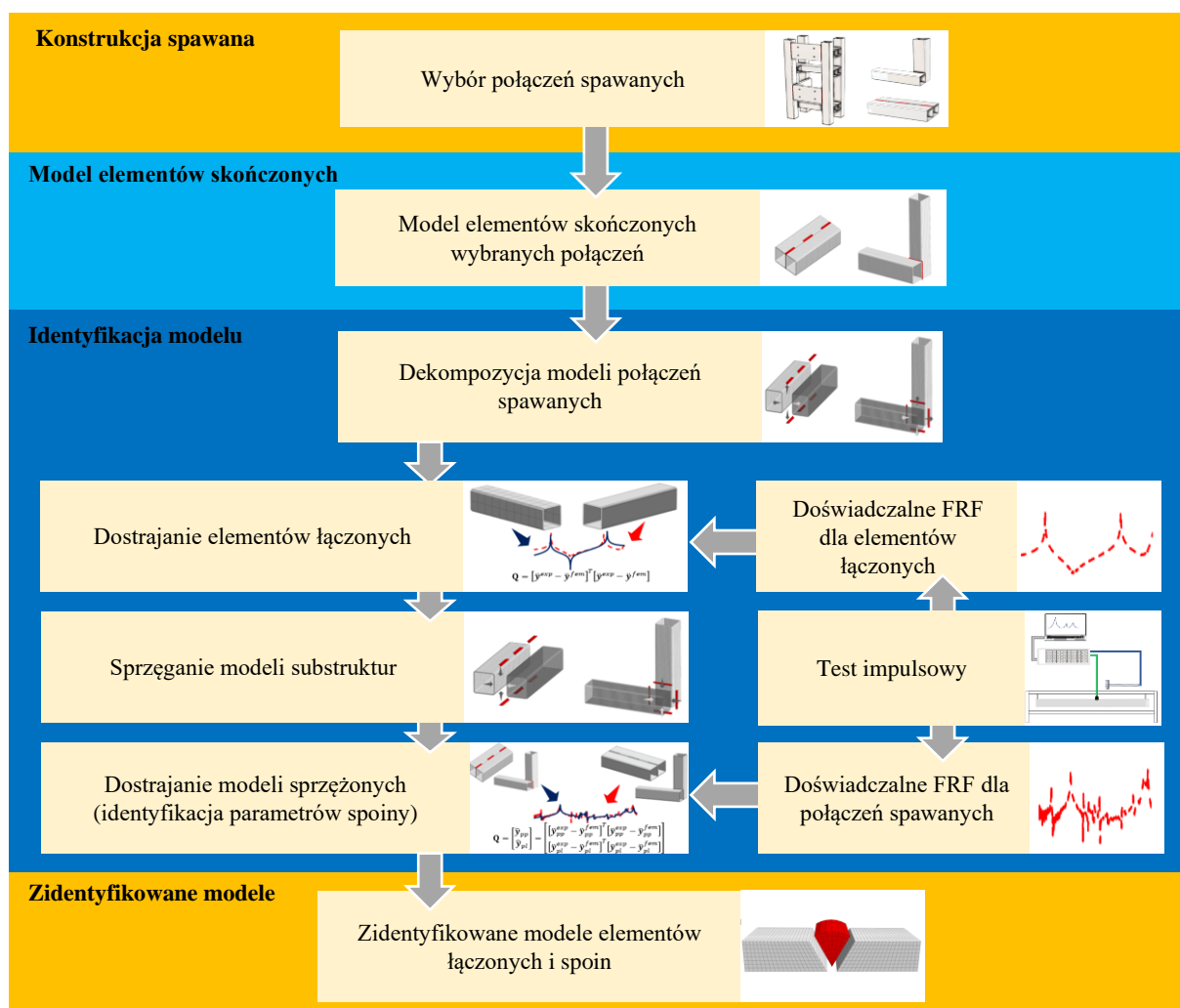
W artykule przedstawiono metodę modelowania właściwości dynamicznych złożonych konstrukcji spawanych z zastosowaniem metody elementów skończonych i identyfikacji substrukturalnej [A]. Nowością prezentowanego artykułu jest dwuetapowa metoda identyfikacji właściwości dynamicznych spoiny na podstawie wyizolowanych złączy spawanych. Wykorzystując globalnie zidentyfikowane właściwości spoiny, metoda w sposób pośredni umożliwia oszacowane tłumienia konstrukcji spawanych.

Uwaga

Zaprezentowana metoda jest bezpośrednim rozwinięciem podejścia zaproponowanego w rozprawie doktorskiej. Aczkolwiek to zostało uzupełnione o identyfikację substrukturalną.

Metodyka

Zaproponowana metoda modelowania rozpoczyna się od wydzielenia prostych połączeń spawanych reprezentujących te występujące w złożonej konstrukcji. Dla wybranych połączeń budowane są modele elementów skończonych, które następnie podlegają dekompozycji na: (i) elementy łączone (belki, blachy, itd.) oraz (ii) spoiny. W pierwszym etapie parametry modeli elementów łączonych są identyfikowane i jako takie nie ulegną zmianie w etapie kolejnym. Następnie łączone elementy są sprzęgane z zastosowaniem modelu spoiny w celu powtórzenia utworzenia modelu wyizolowanego połączenia spawanego. Dalej ma miejsce drugi etap dostrajania, polegający na identyfikacji pozostałych parametrów modelu – parametrów spoiny. Zidentyfikowany w ten sposób model spoiny może być wykorzystany do oceny właściwości dynamicznych złożonych konstrukcji spawanych. Schemat działania algorytmu przedstawiono na rysunku B.1.

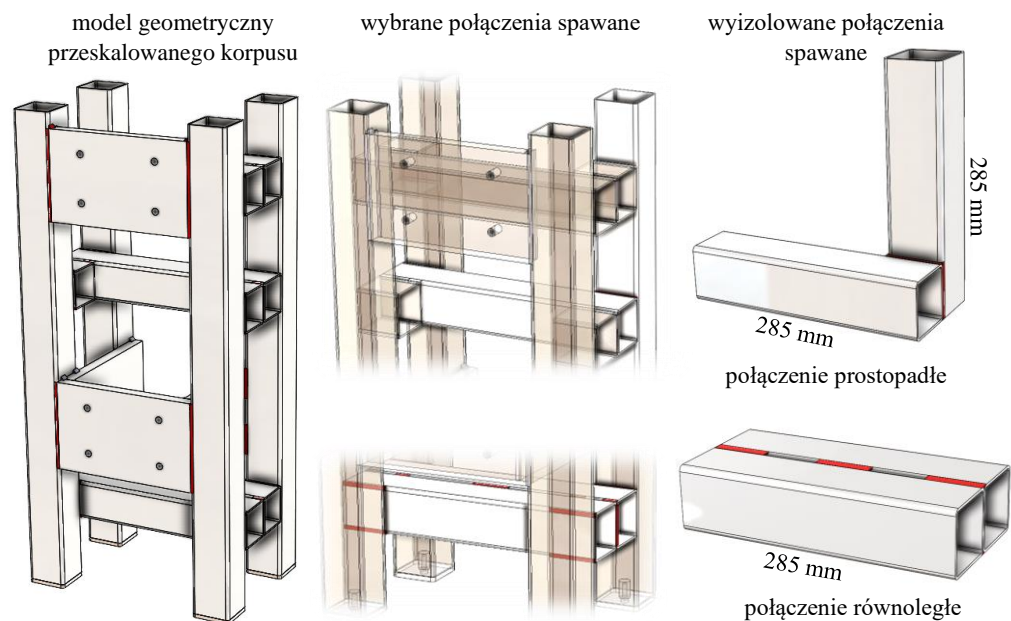


Rysunek B.1. Algorytm modelowania i identyfikacji właściwości dynamicznych połączeń spawanych

Wyniki

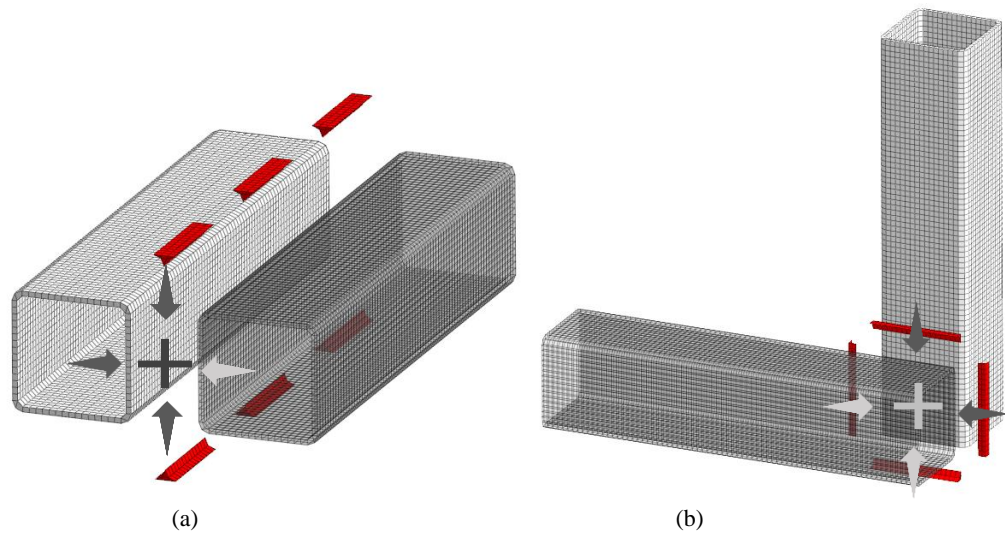
Zaproponowaną metodę modelowania zastosowano do wyznaczenia właściwości dynamicznych stalowego korpusu. W artykule wyznaczenie parametrów spoiny przeprowadzono z zastosowaniem korpusu wykonanego w skali 1:5 w stosunku do docelowej konstrukcji. Dodatkowo wyznaczono właściwości dynamiczne korpusu projektowanej tokarki będące równocześnie walidacją zaproponowanego podejścia.

Przeskalowany korpus wytworzony został z: (i) profili o zamkniętym przekroju kwadratowym o wymiarach 50 mm × 50 mm i grubości ścianki 2 mm oraz (ii) blach o grubości 15 mm. Model geometryczny przeskalowanego korpusu, wraz z wyizolowanymi połączeniami spawanymi, na podstawie których przeprowadzono identyfikację właściwości dynamicznych spoiny przedstawiono na rysunku B.2.



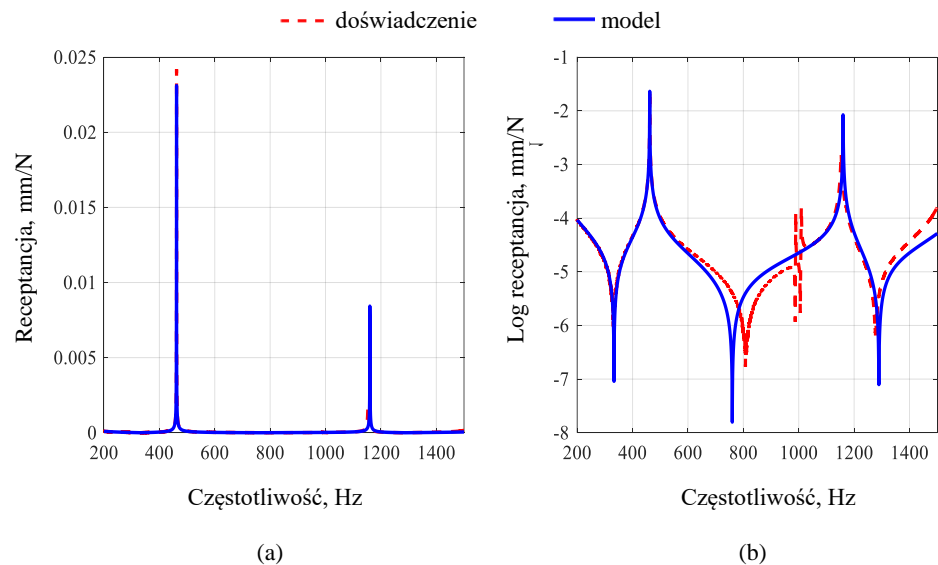
Rysunek B.2. Model geometryczny przeskalowanego korpusu wraz z wyizolowanymi połączeniami spawanymi

Po zbudowaniu modeli elementów skończonych wyizolowanych połączeń przeprowadzono dekompozycję, której zasadę przedstawiono na rysunku B.3.



Rysunek B.3. Podział połączeń spawanych na substrukтуры – przyjęta zasada dekompozycji dla połączenia równoległego (a) i prostopadłego (b).

Substrukтуры powstałe w wyniku przeprowadzonej dekompozycji można podzielić na: (i) belki oraz (ii) spoiny. Zgodnie z przedstawionym algorytmem (rysunek B.1.), w pierwszym kroku przeprowadzono dostrajanie lokalne mające na celu identyfikację parametrów modeli elementów łączonych – belek. Porównanie receptancji wyznaczonych doświadczalnie oraz obliczeniowo dla zidentyfikowanego modelu belki przedstawiono na rysunku B.4.



Rysunek B.4. Porównanie funkcji receptancji uzyskanych w wyniku dostrajania lokalnego belki stalowej; skala liniowa (a) i logarytmiczna (b)

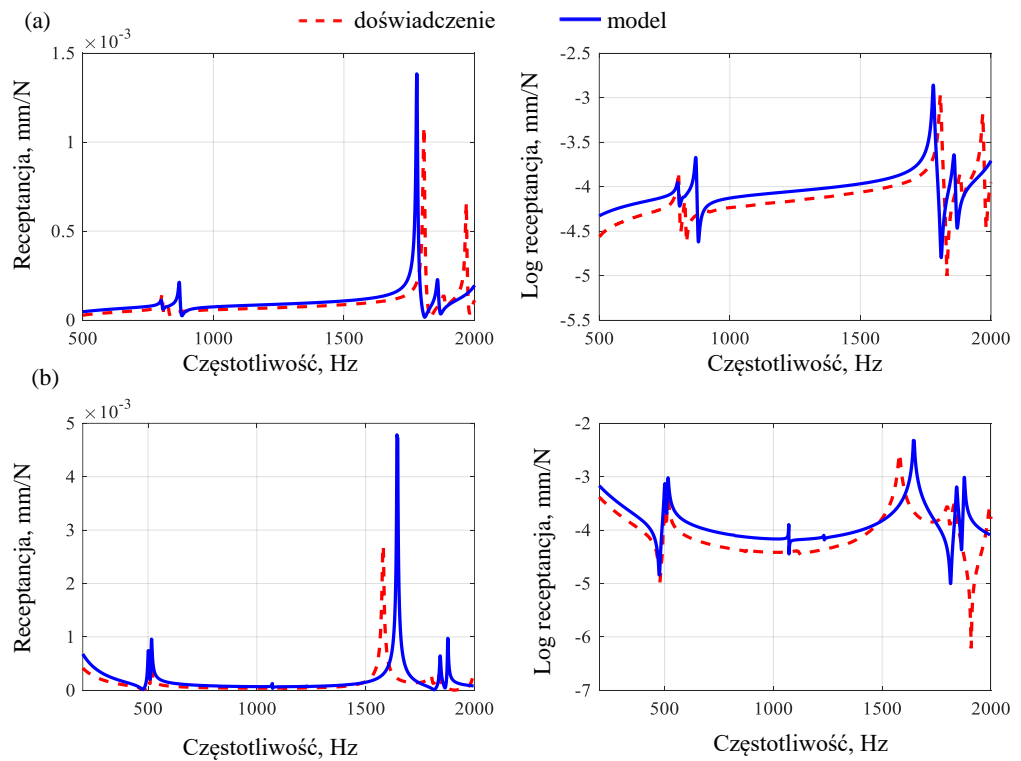
Po dostrojeniu modelu belki przeprowadzono dostrajanie globalne, poprzeczone sprzężeniem modeli wyizolowanych połączeń spawanych. Etap ten

obejmował jedynie dostrajanie parametrów modelu spiny, minimalizując następujące kryterium:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{y}}_{pp} \\ \hat{\mathbf{y}}_{pl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [\dot{\mathbf{y}}_{pp}^{exp} - \dot{\mathbf{y}}_{pp}^{fem}]^T [\dot{\mathbf{y}}_{pp}^{exp} - \dot{\mathbf{y}}_{pp}^{fem}] \\ [\dot{\mathbf{y}}_{pl}^{exp} - \dot{\mathbf{y}}_{pl}^{fem}]^T [\dot{\mathbf{y}}_{pl}^{exp} - \dot{\mathbf{y}}_{pl}^{fem}] \end{bmatrix} \quad (\text{B.1})$$

gdzie: $\dot{\mathbf{y}}_{pp,pl}^{exp}$ – doświadczalnie wyznaczona akceleracja dla: pp – połączenia prostopadłego, pl – połączenia równoległego; $\dot{\mathbf{y}}_{pp,pl}^{fem}$ – obliczeniowo wyznaczona akceleracja.

Precyzując, w ramach dostrajania globalnego minimalizowana jest różnica funkcji akceleracji wyznaczonych doświadczalnie i obliczeniowo jednocześnie dla połączeń prostopadłych i równoległych. Podejście takie umożliwia globalną identyfikację parametrów spiny, w tym wprowadzanego tłumienia. Porównanie funkcji receptancji uzyskanych w wyniku dostrajania globalnego dla połączenia równoległego i prostopadłego przedstawiono na rysunku B.5.



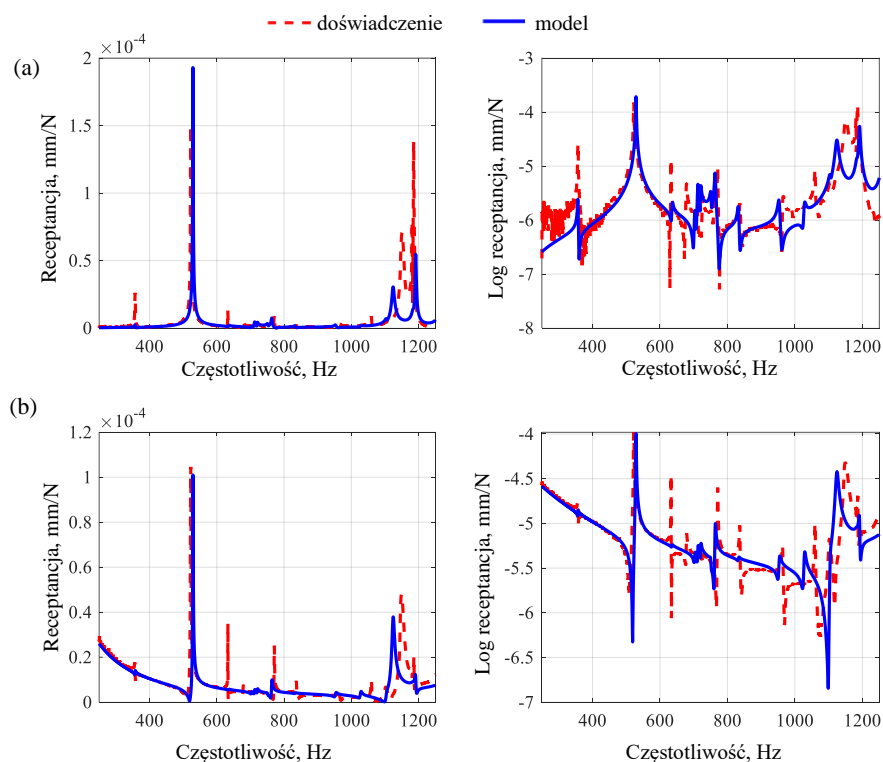
Rysunek B.5. Porównanie funkcji receptancji uzyskanych w wyniku dostrajania globalnego dla połączenia równoległego (a) oraz prostopadłego (b)

W tabeli B.1. zestawiono początkowe oraz zidentyfikowane wartości parametrów modelu.

Tabela B.1. Początkowe oraz zidentyfikowane wartości parametrów modelu

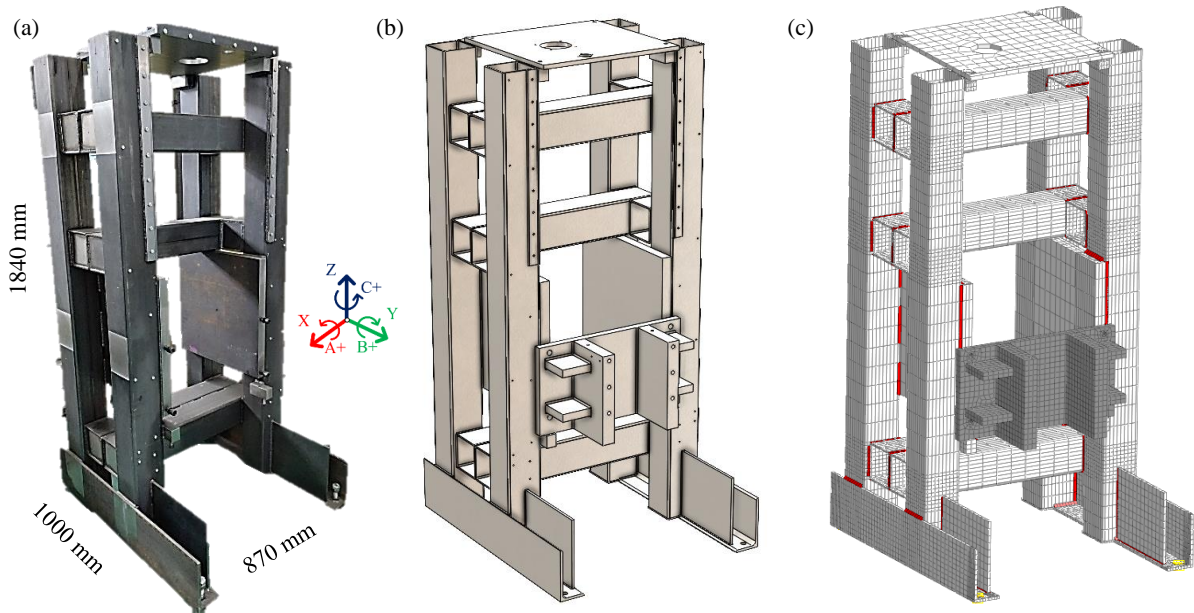
Własność	Wartość początkowa	Wartość zidentyfikowana	Różnica względna
Belka			
Moduł Younga dla belki, E_b	210 GPa	208 GPa	1,0 %
Gęstość dla belki, ρ_b	7800 kg/m ³	8200 kg/m ³	5,1 %
Współczynnik strat dla belki, η_b	0,0022	0,0004	81,8 %
Spoina			
Moduł Younga dla spoiny, E_w	210 GPa	70 GPa	66,0 %
Gęstość dla spoiny, ρ_w	7800 kg/m ³	8000 kg/m ³	2,5 %
Współczynnik strat dla spoiny, η_w	0,0022	0,0750	3309,1 %

Zidentyfikowane parametry modelu spoiny oraz modeli elementów łączonych posłużyły do wyznaczenia właściwości dynamicznych przeskalowanego korpusu. Porównanie receptancji korpusu przeskalowanego wyznaczonych obliczeniowo i doświadczalnie dla płyty górnej i dolnej a więc w miejscu mocowania głowicy narzędziowej i wrzeciona (co istotne z punktu widzenia szacowania stabilności obróbki) przedstawiono na rysunku B.6.

**Rysunek B.6.** Porównanie receptancji korpusu przeskalowanego wyznaczonych obliczeniowo i doświadczalnie dla płyty górnej (a) i dolnej (b) w kierunku X (skala liniowa i logarytmiczna)

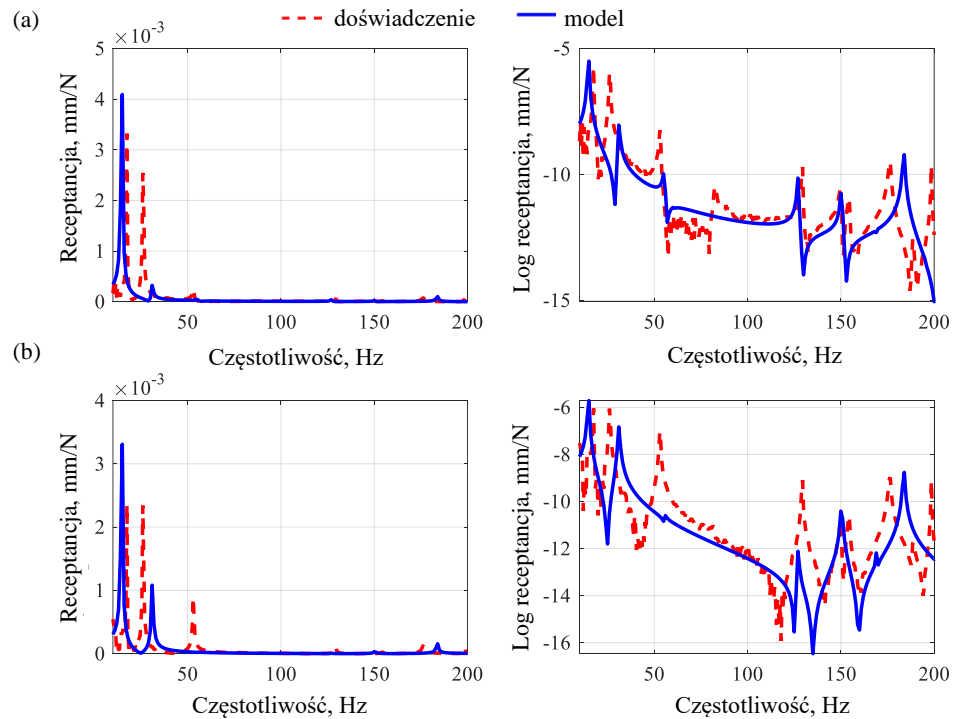
Następnie analizie poddano stalowy, spawany korpus główny rozpatrywanej tokarki pionowej (w artykule etap ten przedstawiony jest jako jedna z metod walidacji zaproponowanego podejścia, aczkolwiek jego właściwości, jak wskazano dalej, uzyskano bezpośrednio na podstawie zidentyfikowanych właściwości połączeń spawanych). Korpus docelowy składał się z: (i) blach stalowych o różnych grubościach oraz (ii) profili o przekroju zamkniętym

kwadratowym $140 \text{ mm} \times 140 \text{ mm}$ i grubości ścianki 6 mm . Strukturę geometryczną korpusu wraz z modelem elementów skończonych przedstawiono na rysunku B.7.



Rysunek B.7. Korpus głównej tokarki pionowej (a), model geometryczny (b) oraz model elementów skończonych (c)

Dla analizowanego korpusu wyznaczono receptancje, które następnie porównano z wynikami z badań doświadczalnych, co przedstawiono na rysunku B.8.



Rysunek B.8. Porównanie receptancji korpusu głównej tokarki pionowej wyznaczonych obliczeniowo i doświadczalnie dla belki górnej (a) i płyty dolnej (b) w kierunku X (skala liniowa i logarytmiczna)

Dyskusja wyników

Zaproponowana metoda modelowania pozwoliła uzyskać dokładne odwzorowanie właściwości dynamicznych złożonej konstrukcji spawanej w oparciu o zidentyfikowane właściwości wyizolowanych połączeń spawanych. Analizując wyniki uzyskane dla tychże, średni błąd względny uzyskany dla belki, połączenia równoległego i połączenia prostopadłego wyniósł odpowiednio 0,4 %, 2,7 % i 2,7 %. Ponadto maksymalny błąd w żadnym przypadku nie przekroczył 6,2 %. Analizując częstotliwościowe funkcje przejścia, średni błąd względny dla amplitud w rezonansach wyniósł odpowiednio 231 %, 80 % i 97 % odpowiednio dla belki stalowej, połączenia równoległego i połączenia prostopadłego

W przypadku analizowanego przeskalowanego korpusu wartość maksymalnego błędu względnego dla częstotliwości własnych nie przekraczała 4,1 %, średnio 1,1 %. Błąd względny dla rezonansów dominujących nie przekraczał odpowiednio 29 % i 4 % kolejno dla płyty górnej i dolnej. Dodatkowo w wyniku modelowania uzyskano zgodność piętnastu postaci drgań.

Zidentyfikowane modele zastosowano do przewidywania właściwości dynamicznych korpusu o docelowej wielkości. Uzyskane wyniki były zadowalające (dla odkształcalnych postaci drgań średnia różnica względna w przypadku wartości częstotliwości własnych nie przekroczyła 8,4 %, średnio 3,9 %, w przypadku receptancji błąd względny dla amplitudy w dominującym rezonansie wynosi 31 %, średnio 60 %). W przypadku postaci drgań niskoczęstotliwościowych (ang. *rocking vibrations*) wyniki różniły się znacząco (maksymalny błąd względny wyniósł 19,2 %). Należy zaznaczyć, iż wpływ parametrów połączeń spawanych na te postacie jest znikomy, w głównej mierze są one zależne od właściwości interfejsu obrabiarka-posadowienie-fundament. W związku z powyższym w dalszych pracach należałoby skupić się na opracowaniu lepszej metody modelowania tego interfejsu.

Należy podkreślić, że zaprezentowane wyniki uzyskano poprzez połączenie zidentyfikowanych modeli substruktur z modelami spoin, bez stosowania dodatkowej korekcji lub zmiany parametrów. Odstępstwa od powyższej metodyki – brak doświadczalnej identyfikacji modelu belki lub brak identyfikacji modeli połączeń spawanych skutkowały odpowiednio większymi wartościami błędu względnego (do 400 % różnicy względnej

Uwaga

Tematykę tę podjęto w ramach stażu badawczego realizowanego w Królewskim Instytucie Technicznym (KTH) w Sztokholmie (patrz punkt 5.1.).

w przypadku amplitudy dominującego rezonansu) i niezgodnością postaci drgań.

Zaproponowana metoda modelowania połączeń spawanych pozwoliła na uzyskanie zadowalającej zgodności modelu z doświadczeniem w przypadku spoin czołowych i pachwinowych, co świadczy o jej uniwersalności.

Zgodnie uzyskanymi wynikami badań można zauważyć, że spawanie wprowadza do konstrukcji dodatkowe tłumienie. Może ono wynikać ze zmian w strukturze materiału spawanego lub z wystąpienia tzw. tłumienia interfejsu (ang. *interface damping*) [20].

Pomimo, iż zaproponowana metoda nie wyjaśnia natury tłumienia, to może być stosowana do przewidywania właściwości dynamicznych. Praktyczne ograniczenia metody mogą wynikać z trudności w utrzymaniu reżimu technologicznego związanego z odwzorowaniem właściwości izolowanych połączeń w docelowej strukturze. Dotyczy to głównie właściwości tłumiących; inne właściwości dynamiczne wydają się być mniej wrażliwe na takie zmiany.

Podsumowanie

Zaproponowana metoda modelowania umożliwia przewidywanie właściwości dynamicznych cienkościennych, stalowych konstrukcji spawanych w oparciu o zidentyfikowane parametry prostych połączeń spawanych.

Wykorzystując globalnie zidentyfikowane zastępcze właściwości spoiny, metoda umożliwia oszacowanie wielkości tłumienia obecnego w konstrukcji mogącego zależeć od postaci drgań. Precyzując, w konstrukcjach spawanych mogą występować wspomniane mechanizmy tłumienia interfejsu. Ze względu na fakt, że rozkład nacisku na połączeniu elementów dla poszczególnych spoin może zależeć (i często zależy) od postaci drgań, trudno jest ocenić wielkość tłumienia, jakie zjawisko to wnosi do konstrukcji. Dlatego też eksperymentalna identyfikacja tłumienia zastępczego wydaje się być atrakcyjnym podejściem.

C

Dane bibliograficzne

Tytuł artykułu: Static stiffness design of vertical lathe with steel-polymer concrete frame

Czasopismo: International Journal of Advanced Manufacturing Technology
(IF 3,6; MEiN 100 pkt.).

Wkład: Paweł Dunaj (70 %):

opracowanie koncepcji artykułu; zaplanowanie badań modelowych i doświadczalnych; budowa modelu elementów skończonych; analiza wyników; pisanie artykułu; koordynowanie prac zespołu

Michał Dolata (10 %):

analiza wyników; udział w budowie modelu elementów skończonych

Jan Tomaszewski (10 %):

badania doświadczalne

Paweł Majda (10 %):

badania doświadczalne; analiza wyników

Uwaga

Oświadczenia autorów dotyczące wkładu w powstanie publikacji zawarto w Załączniku U.1.

Umiejscowienie w cyklu

Artykuł stanowi podstawę rozważań przeprowadzonych dla konstrukcji tokarki pionowej. W pracy przedstawiono model elementów skończonych rozpatrywanej obrabiarki (zbudowany m.in. zgodnie z [B]), dla którego przeprowadzono analizę wrażliwości obejmującą badanie wpływu zmiany sztywności poszczególnych elementów na sztywność wynikową maszyny. W wyniku przeprowadzonej analizy zidentyfikowano słabe ogniwa konstrukcji, oraz zdefiniowano wstępne wymagania funkcjonalne dla polimerobetonu, co było bezpośrednią przyczyną przeprowadzenia analizy przedstawionej w [D].

Wprowadzenie

Sztywność statyczna jest jedną z kluczowych cech obrabiarki [24]. Odzwierciedla zdolność maszyny do utrzymania precyzyjnego położenia między narzędziem a przedmiotem obrabianym poprzez przeciwstawienie się siłom skrawania związanym z realizacją procesu technologicznego [25].

Sztywność statyczna obrabiarki zależy od sztywności elementów jej układu nośnego, tj. korpusów [26], układów prowadnicowych [27], układów przeniesienia napędów [28]. Współcześnie obrabiarki są w dużej mierze budowane z gotowych elementów, tj. elektrowrzecion, głowic narzędziowych, prowadnic liniowych itp. [29]. Dlatego kształtowanie ich właściwości eksploatacyjnych sprowadza się do właściwego doboru elementów składowych oraz ukształtowania właściwości korpusów [30]. Wpływ sztywności elementów obrabiarki na jej sztywność wynikową jest przedmiotem wielu badań i obejmuje między innymi analizę sztywności opravek narzędziowych [31], wrzecion [32], czy posadowień [33].

Literatura przedmiotu obejmuje szereg prac poświęconych bilansowi sztywności typowych obrabiarek [34]–[38]. Zauważalny jest jednak brak badań nad wpływem sztywności poszczególnych elementów na sztywność wynikową obrabiarek o korpusach hybrydowych [39]. Pozycje, które można znaleźć w literaturze, skupiają się głównie na właściwościach dynamicznych, często marginalizując analizę sztywności statycznej. Istnieje tylko kilka prac, które w dodatku jedynie częściowo analizują ten problem [40]–[42].

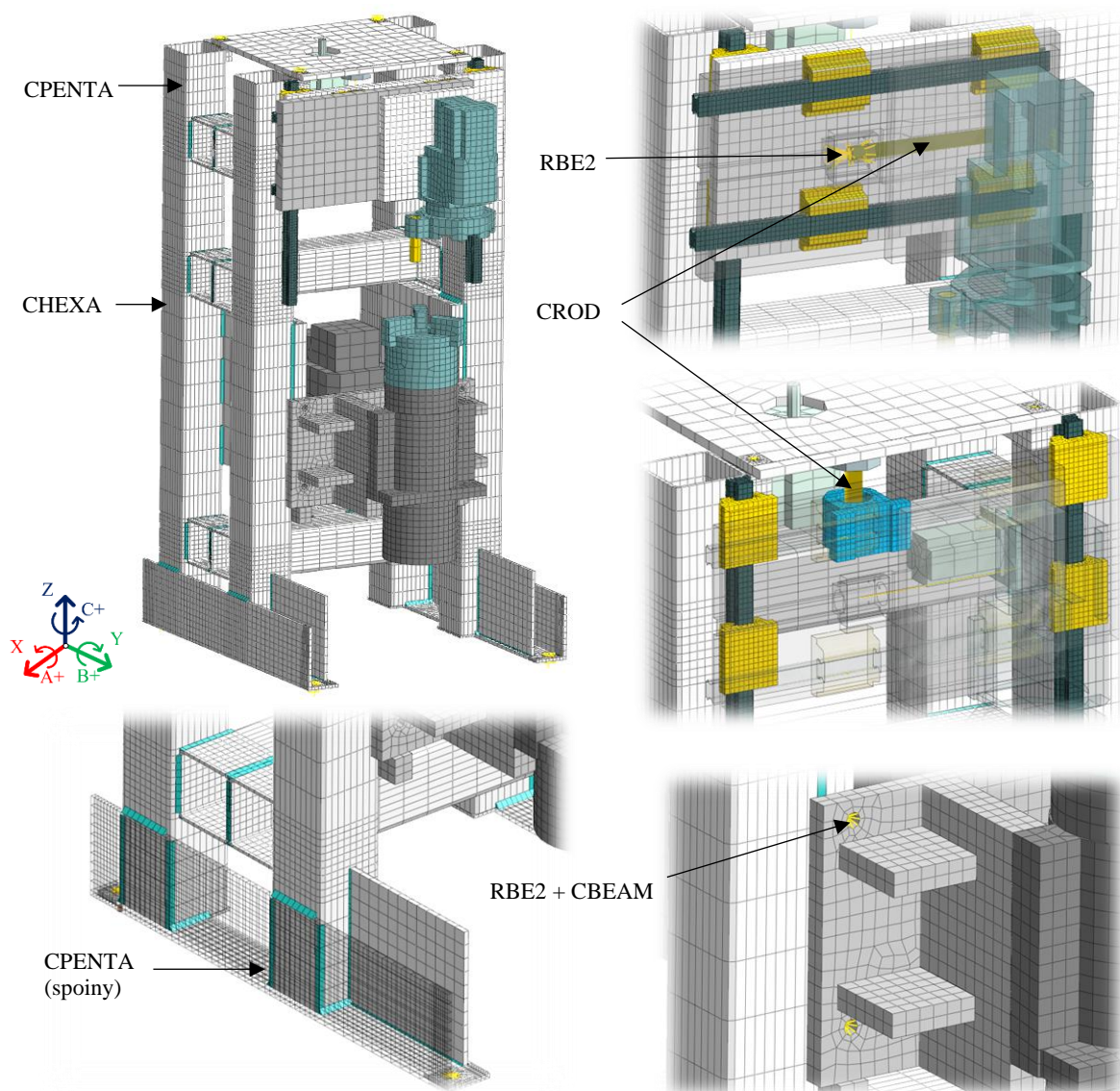
W związku ze wskazanym brakiem w artykule przedstawiono analizę sztywności statycznej projektowanej tokarki pionowej o korpusie stalowo-polimerobetonowym. Nowością w prezentowanej pracy jest kompleksowe zbadanie wpływu sztywności poszczególnych elementów obrabiarki z hybrydowym korpusem głównym na jej sztywność wynikową. Niniejsze badanie przeprowadzono z wykorzystaniem analizy wrażliwości przeprowadzonej dla modelu elementów skończonych obrabiarki. Analizy zawarte w artykule zwerifikowano doświadczalnie, ze szczególnym uwzględnieniem unikalnego rozwiązania układu nośnego obrabiarki, które zgodnie z założeniami projektowymi miało umożliwić efektywne kształtowanie jej sztywności statycznej i dynamicznej.

Metodyka

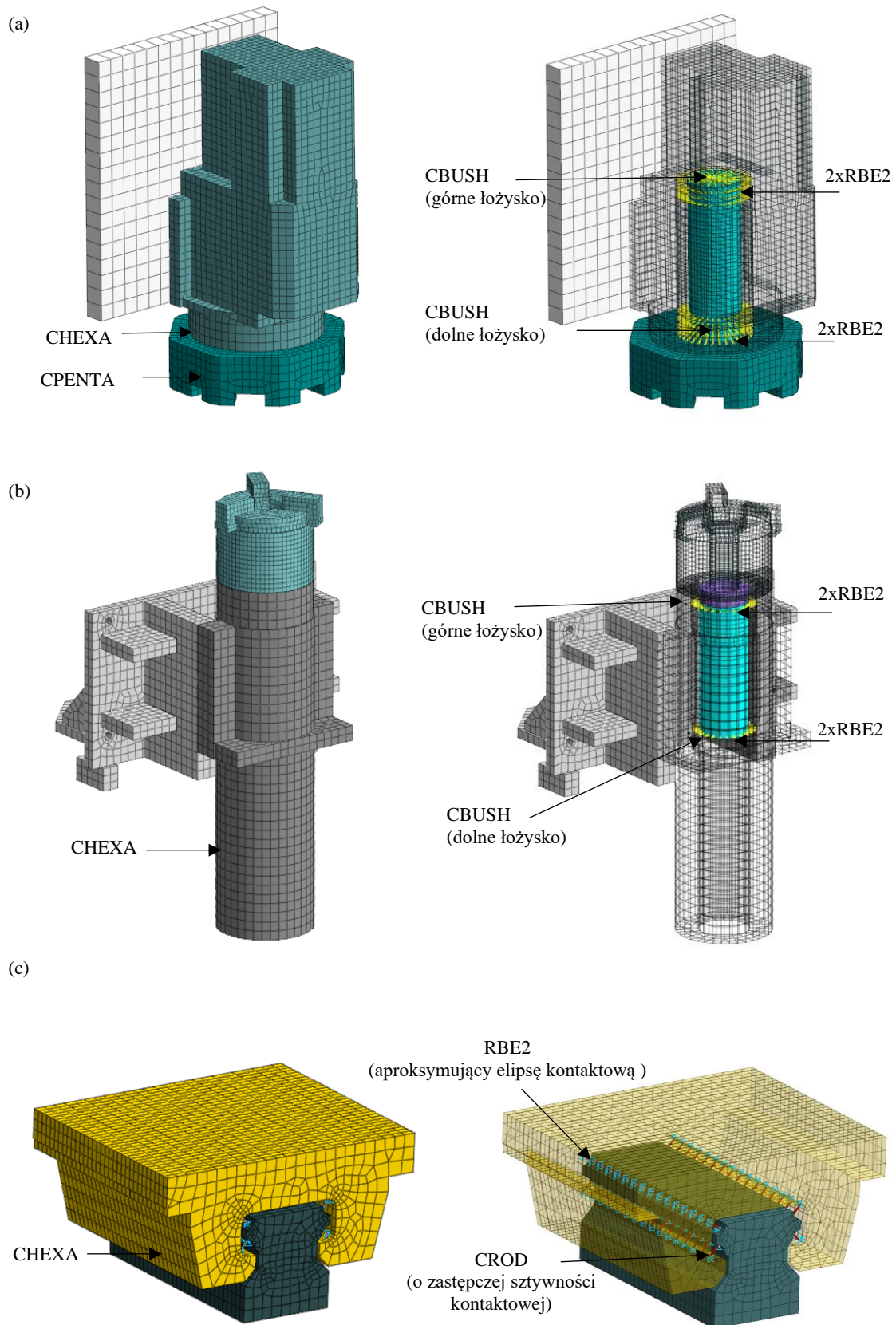
Uwaga

Wnioskodawca jest twórcą metod zawartych w pracach [14], [43], [44] i [45]. Jest też pierwszym i korespondencyjnym autorem we wskazanych artykułach.

Przetawioną w artykule analizę przeprowadzono z zastosowaniem modelu elementów skończonych. Elementy składowe modelu tokarki zbudowano z zastosowaniem zarówno autorskich metod modelowania (stalowy korpus główny [B], jego polimerobetonowe wypełnienie [14], [43], prowadnice liniowe [44], mechanizmy śrubowo-toczne [45]), jak i zgodnie z metodami opisanymi w literaturze (łożyska [46], połączenia śrubowe [47]). Dyskretyzację elementów korpusowych wrzeciona i głowicy narzędziowej przeprowadzono przy użyciu elementów CHEXA i CPENTA. Dyskretny model tokarki pokazano na rys. C.1. a szczegółowe modele elementów skończonych wybranych podzespołów na rysunku C.2.



Rysunek C.1. Model elementów skończonych analizowanej tokarki (korpus główny niewypełniony)



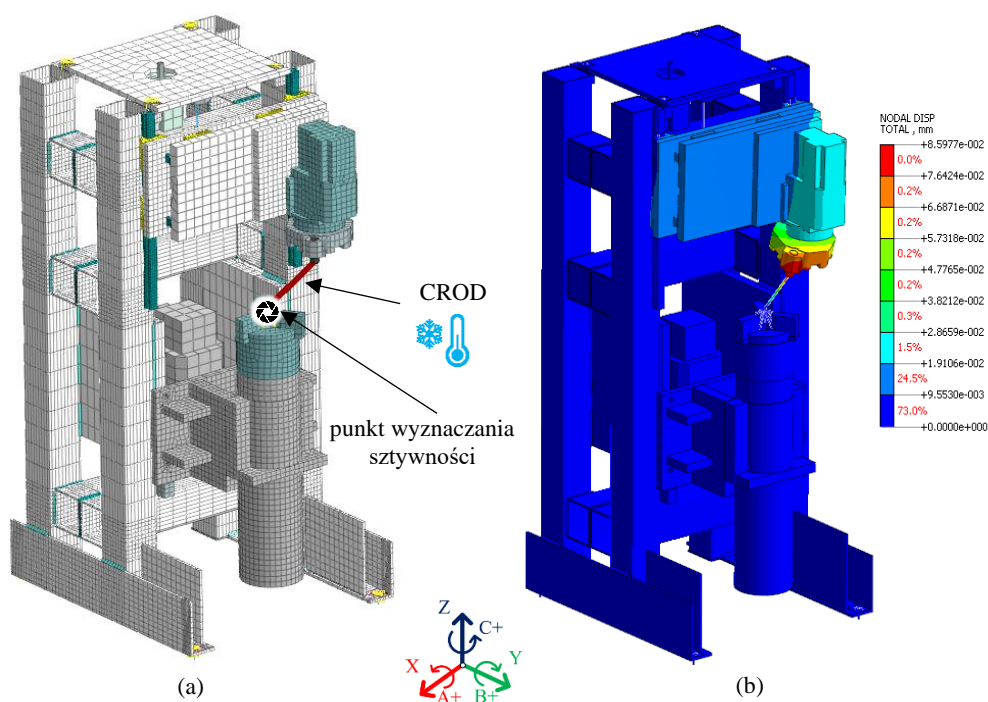
Rysunek C.2. Szczegółowe modele elementów skończonych wybranych podzespołów obrabiarki: głowicy narzędziowej (a), wrzeciona (b) oraz prowadnic liniowych (c)

Uwaga

W artykule przedstawiono doświadczalną weryfikację modelu tokarki z korpusem stalowym oraz wypełnionym polimerobetonem. Z punktu widzenia ciągu przyczynowo-skutkowego cyklu należałoby przedstawić wyłącznie weryfikację doświadczalną dla wersji stalowej, aczkolwiek publikacje ukazywały się niechronologicznie stąd w artykule zawarto również weryfikację doświadczalną prototypowej tokarki o stalowo-polimerobetonowym korpusie.

Następnie opracowany model poddano doświadczalnej weryfikacji. W tym celu w modelu odtworzono konfigurację obrabiarki i sposób obciążenia przewidziany w badaniach doświadczalnych, które przeprowadzono z metodyką przedstawioną w [48]. Precyzując, obciążenie zrealizowano za pomocą elementu prętowego typu CROD. Element został rozpięty na dwóch węzłach, charakteryzujących się jednym stopniem swobody (przesunięciem wzdłuż osi elementu skończonego). Pozwoliło to na przybliżenie stosowanych w pomiarach połączeń kulowych, unikając tym samym generowania momentów zginających w modelu.

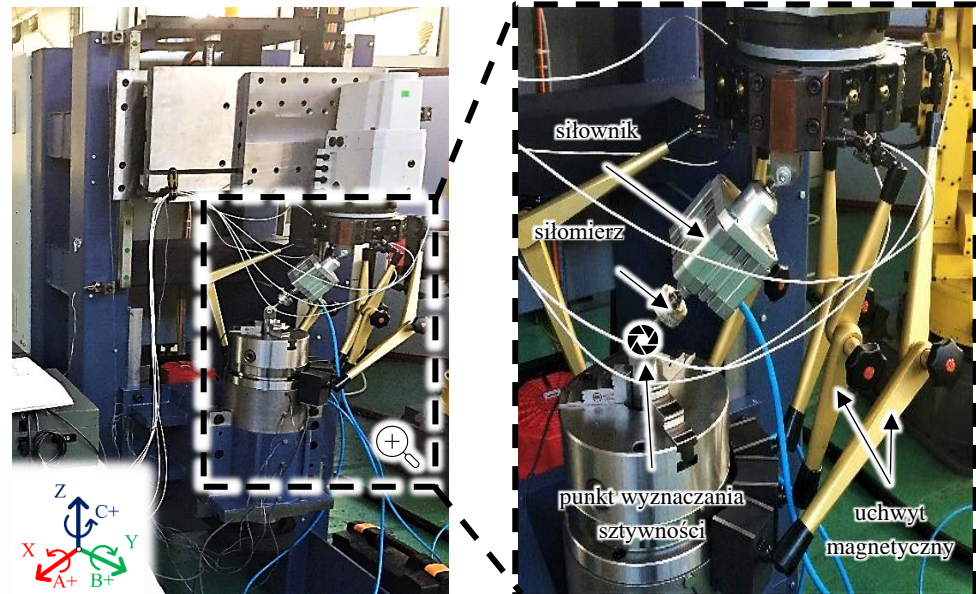
Obciążenie elementu prętowego realizowano poprzez odkształcenie wstępne, które powoduje siła generowana przez siłownik zastosowany w pomiarach. Odkształcenie to modelowano poprzez chłodzenie pręta, co spowodowało zmianę jego wymiarów. Zmodyfikowany model elementów skończonych wraz z przykładową mapą przemieszczeń pokazano na rysunku C.3.



Rysunek C.3. Model elementów skończonych analizowanej tokarki do weryfikacji doświadczalnej (a) wraz z przykładową mapą przemieszczeń (b)

Badania doświadczalne przeprowadzono umieszczając czujniki przemieszczeń na korpusie wrzeciona (mierzone przemieszczenie głowicy narzędzia względem tej bazy). W związku z tym pominięto podatność wrzeciona (w tym łożysk i uchwytu) oraz narzędzia wraz z oprawką, mierząc sztywność

wrzeciennika względem głowicy narzędziowej. W wyniku uzyskano wartości siły w funkcji uogólnionego przemieszczenia (translacyjnego i obrotowego). Realizację badań doświadczalnych dla rozpatrywanej tokarki przedstawiono na rysunku C.4.



Rysunek C.4. Badania doświadczalne sztywności statycznej tokarki

Następnie na podstawie uzyskanych wyników obliczeń oraz badań doświadczalnych wyznaczono uogólnione sztywności obrabiarki. Zestawienie porównawcze wyników badań doświadczalnych wraz z ich niepewnościami rozszerzonymi (dla $k = 2$) przed i po wypełnieniu korpusu polimerobetonem przedstawiono w tabeli C.1; w tabeli C.2. przedstawiono różnice tych wielkości wyznaczonych z obliczeń i pomiarów.

Tabela C.1. Zmierzone współczynniki sztywności quasi-statycznej tokarki z korpusem przed i po zalaniu polimerobetonem (niepewność rozszerzona dla $k = 2$)

	K_X	K_Y	K_Z	K_A	K_B
		$N/\mu m$		$Nm/\mu rad$	
Sztywność statyczna przed wypełnieniem korpusu	$9,31 \pm 0,25$	$3,110 \pm 0,061$	$7,62 \pm 0,79$	$0,091 \pm 0,011$	$0,722 \pm 0,045$
Sztywność statyczna po wypełnieniu korpusu	$12,51 \pm 0,26$	$3,722 \pm 0,072$	$10,01 \pm 0,92$	$0,119 \pm 0,013$	$0,924 \pm 0,052$
Zmiana sztywności, %	34	20	31	31	28

Tabela C.2. Różnica wartości sztywności uogólnionych określonych na podstawie obliczeń i badań doświadczalnych

	K_X	K_Y	K_Z	K_A	K_B
			%		
Przed wypełnieniem korpusu	6.7	25	17	26	13
Po wypełnieniu korpusu	10	27	12	5	11

Dla zweryfikowanego modelu przeprowadzono analizę wrażliwości badając wpływ sztywności poszczególnych elementów obrabiarki na uzyskaną

sztynność maszyny. Współczynnik wrażliwości $W_{P_i}^{K_j}$ zdefiniowano jako bezwymiarową pochodną po parametrach modelu P_i :

$$W_{P_i}^{K_j} = \frac{\partial K_j}{\partial P_i} \cdot \frac{P_i}{K_j} \cdot 100 \% \quad (\text{C.1})$$

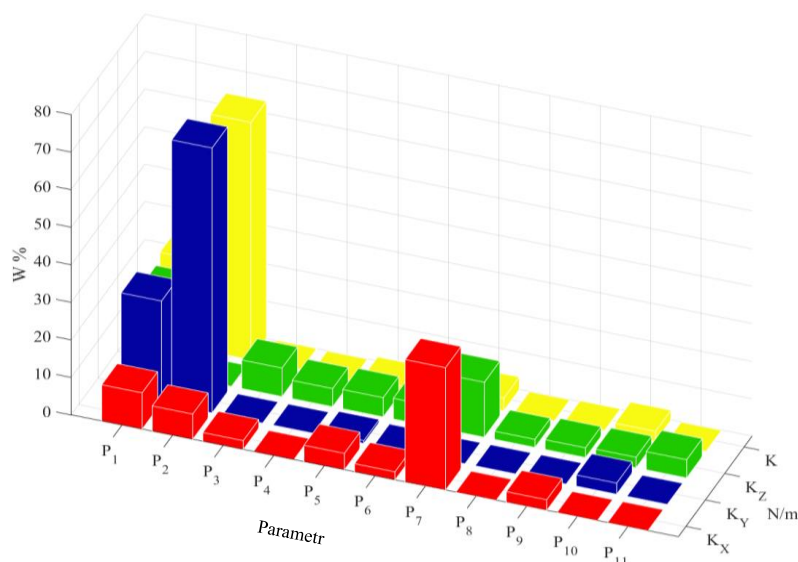
gdzie: K_j – sztywność uogólniona na kierunku j , gdzie $j \in \{x, y, z\}$. W podejściu tym wartość wskaźnika W wyraża procentową zmianę rozpatrywanego współczynnika sztywności K_j na 100 % zmianę parametru P_i . Przykładowa wartość $W_{P_i}^{K_j} = 10 \%$ oznacza, iż K_j zwiększy się o 10 % jeżeli wartość parametru P_i zwiększy się o 100 % (co jest równoznaczne z podwojeniem wartości rozpatrywanego parametru).

Parametry (sztywności elementów składowych) przyjęte do analizy wrażliwości przedstawiono w tabeli C.3. W analizie wrażliwości nie uwzględniono parametrów charakteryzujących sztywność śrub i nakrętek tocznych oraz sztywność węzła łożyskowego tylnego wrzeciona. Wstępne obliczenia wykazały znikome znaczenie tych parametrów na zmiany badanej sztywności uogólnionej tokarki.

Tabela C.3. Parametry przyjęte do analizy wrażliwości

Oznaczenie	Opis
P_1	sztywność korpusu określana jako wytrzymałość na zginanie przekroju profilu składowego
P_2	sztywność skrętna w osi obrotu głowicy narzędziowej
P_3	sztywność promieniowa przedniego (ustalającego) węzła łożyskowego głowicy narzędziowej
P_4	sztywność osiowa przedniego (ustalającego) węzła łożyskowego głowicy narzędziowej
P_5	sztywność liniowych prowadnic tocznych
P_6	sztywność (moduł Younga) wypełnienia polimerobetonowego
P_7	sztywność promieniowa przedniego (ustalającego) węzła łożyskowego wrzeciona
P_8	sztywność osiowa przedniego (ustalającego) węzła łożyskowego wrzeciona
P_9	sztywność promieniowa tylnego (pływającego) węzła łożyskowego wrzeciona
P_{10}	sztywność promieniowa tylnego (pływającego) węzła łożyskowego głowicy narzędziowej
P_{11}	sztywność osiowa tylnego (pływającego) węzła łożyskowego głowicy narzędziowej

W wyniku przeprowadzonej analizy otrzymano wartości współczynników wrażliwości definiujących wpływ sztywności elementów obrabiarki na jej sztywność wynikową oraz składowe na poszczególnych kierunkach. Zestawienie wyznaczonych wartości przedstawiono na rysunku C.5.



Rysunek C.5. Wartości współczynnika wrażliwości

Dyskusja wyników

W ramach przeprowadzonej analizy wrażliwości zidentyfikowano elementy, mające największy wpływ na sztywność wynikową obrabiarki. Są to odpowiednio: sztywność skrętna głowicy narzędziowej, sztywność stalowego korpusu głównego, sztywność promieniowa przedniego węzła łożyskowego wrzeciona. Przeprowadzona analiza wskazała, że elementem mającym największy wpływ na sztywność rozpatrywanej obrabiarki jest głowica narzędziowa. Tym samym najskuteczniejszym sposobem na poprawę sztywności maszyny jest jej wymiana na sztywniejszą.

Porównanie wyników quasi-statycznych pomiarów sztywności uzyskanych przed i po wypełnieniu stalowego korpusu polimerobetonem wyraźnie pokazuje, że metoda ta usztywnia konstrukcję. Wzrost zmierzonej sztywności wyniósł 20 % dla sztywności translacyjnej w kierunku Y. W pozostałych kierunkach wzrosty były jeszcze większe, tj. > 30 %. Różnice w uzyskanych wynikach pomiarów należy uznać za jednoznacznie istotne, gdyż nie mają one wspólnych obszarów niepewności.

Należy zaznaczyć, że zastosowanie polimerobetonu usztywnia konstrukcję, jednak znaczenie tego usztywnienia (poniżej 0,5 %) jest znikome w porównaniu z innymi parametrami konstrukcyjnymi. Innymi słowy, znacznie łatwiej byłoby usztywnić konstrukcję poprzez przeprojektowanie korpusu stalowego (ponieważ wartość współczynnika wrażliwości wynosi 24 %), niż zastosować polimerobeton o innym module Younga.

Uwaga

Wskazany wniosek stanowił bezpośrednią przyczynę powstania publikacji [D].

Wnioski te pozwoliły na sformułowanie bardziej ogólnej obserwacji: przy projektowaniu polimerobetonów do wypełniania stalowych korpusów obrabiarek kryterium sztywności materiału powinno mieć niewielkie znaczenie, a głównym kryterium powinno być jego tłumienie.

Powszechnie uważa się [27], że w typowych obrabiarkach udział odkształceń połączeń prowadzących wynosi do 60 % całkowitego bilansu sztywności pętli konstrukcyjnej. Dla omawianej tokarki współczynnik wrażliwości na zmianę sztywności połączeń przewodnicowych wyniósł 1,2 %, a na zmianę sztywności przekrojów poprzecznych elementów nośnych korpusu 24 %. Można zatem zauważyć, że sztywność układu korpusowego ma znacznie większy udział w bilansie sztywności analizowanej tokarki. Dokładniej, z punktu widzenia sztywności statycznej analizowanej obrabiarki, można stosować mniej sztywne przewodnice liniowe i śruby toczne bez obawy istotnego pogorszenia jej właściwości.

Podsumowanie

W artykule przeprowadzono analizę wrażliwości badającą wpływ sztywności elementów tokarki pionowej o stalowo-polimerobetonowym korpusie głównym na jej sztywność wynikową. W rezultacie zidentyfikowano ogniwo konstrukcyjne mające największy wpływ na sztywność statyczną obrabiarki – głowicę narzędziową. Wykazano, że najskuteczniejszą metodą poprawy sztywności maszyny jest wymiana tego elementu na sztywniejszy.

Podsumowując, należy stwierdzić, że badania skupione tylko na jednej cesze badanego prototypu są niewystarczające, aby można było wnioskować o ogólnej sztywności obrabiarki. Uzyskanie w drodze eksperymentu szerokiego zakresu informacji o prototypie wiąże się z ogromnymi kosztami. Dlatego też konieczne staje się prowadzenie analiz z wykorzystaniem modeli obliczeniowych, które pozwolą na identyfikację elementów w największym stopniu wpływających na rozpatrywane wielkości. Przedstawione w artykule podejście pozwala efektywnie kształtować sztywność statyczną obrabiarki, jednoznacznie wskazując elementy konstrukcyjne stanowiące o jej właściwościach eksploatacyjnych.

D

Dane bibliograficzne

Tytuł artykułu: Mesoscale modeling of polymer concrete dynamic properties

Czasopismo: Polymers (IF 5,0; MEiN 100 pkt.).

Wkład: Paweł Dunaj (100 %)

Umiejscowienie w cyklu

Praca stanowi kontynuację wątku związanego w projektowaniem polimerobetonu przedstawionego w [C]; zawiera metodykę modelowania polimerobetonu w skali mezo, którą można traktować jako narzędzie wspomagające proces projektowania materiału o silnie heterogenicznej strukturze. Wyniki analiz zawartych w artykule posłużyły do opracowania polimerobetonów przedstawionych w [E].

Wprowadzenie

Polimerobeton jest niejednorodnym, wielofazowym kompozytem składającym się z różnych kruszyw oraz żywicy pełniącej rolę spoiwa [49]. Jego właściwości zależą od rodzaju i proporcji poszczególnych frakcji [50]. Obecnie podejmowane są próby aby właściwości te można było oszacować już na etapie projektowania materiału [51]; w tym celu wykorzystuje się mezoskalowe modele elementów skończonych [52].

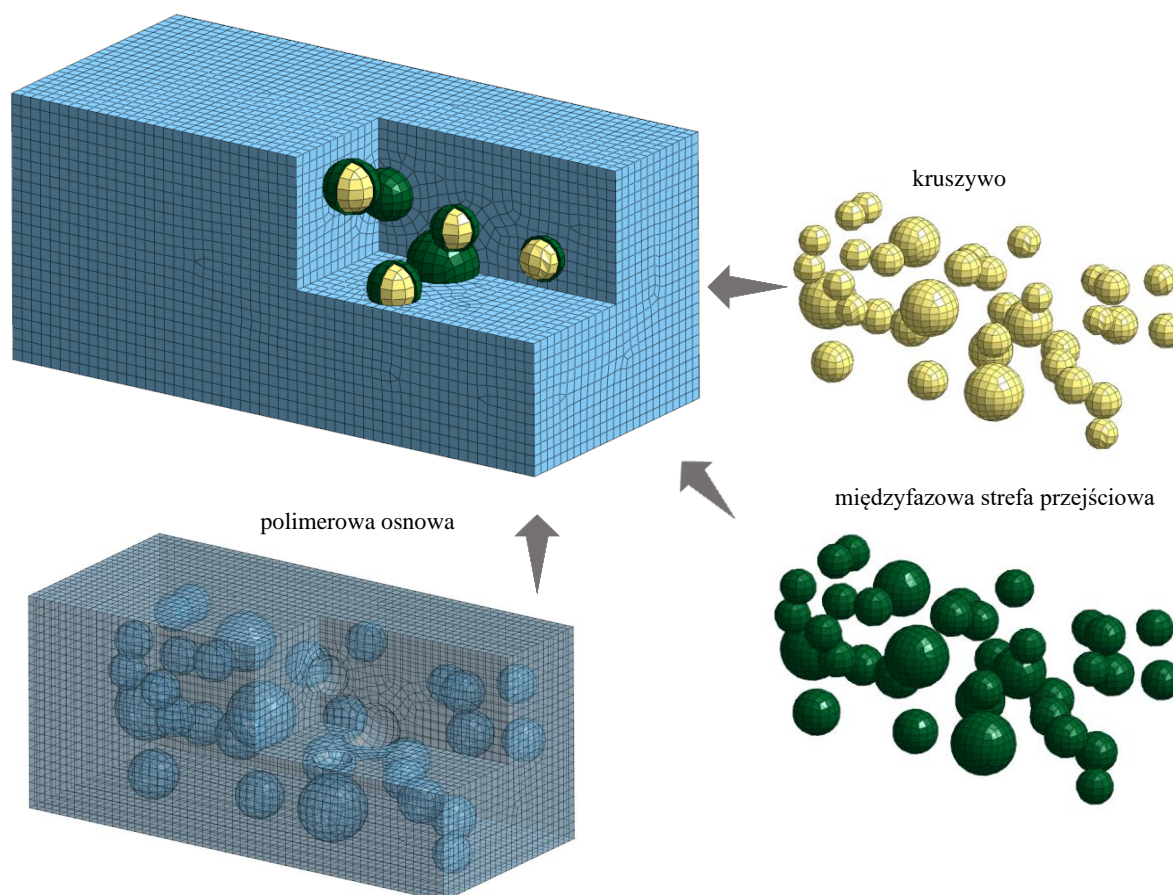
Z przywołanych w artykule badań wynika, że modelowanie mezoskalowe pozwala na uwzględnienie wewnętrznych cech strukturalnych, które znacząco wpływają na właściwości mechaniczne materiałów niejednorodnych [53]–[56]. Jednak niewiele publikacji poświęconych jest modelowaniu właściwości dynamicznych polimerobetonu w mezoskali, zwłaszcza modelowaniu tłumienia.

W artykule zaproponowano metodę modelowania właściwości dynamicznych polimerobetonu. Metoda opiera się na mezoskalowym modelu elementów skończonych obejmującym kruszywo, polimerową osnowę i międzyfazową strefę przejściową. Identyfikacji parametrów modelu dokonuje się z zastosowaniem identyfikacji substrukturalnej przedstawionej w [A].

Modelowanie w mezoskali zwykle dostarcza pełniejszych informacji na temat mechanicznego zachowania materiałów heterogenicznych w porównaniu z czysto makroskopowymi modelami wykorzystującymi homogenizowane modele materiałów. Celem badania było opracowanie procedury modelowania w materiale w mezoskali, która zapewni głębszy wgląd w mechanizm tłumienia obecny w materiale dostarczając tym samym wytycznych podczas procesu opracowywania składu polimerobetonu o wysokim tłumieniu, zgodnie z wnioskami z badań przedstawionych w [C].

Metodyka badań

Metoda zaczyna się od wygenerowania geometrycznego modelu materiału niejednorodnego odzwierciedlającego rozmieszczenie poszczególnych frakcji kruszywa w osnowie polimerowej. Dodatkowo wprowadza się międzyfazową strefę przejściową (ang. *interfacial transition zone*, ITZ), uwzględniającą interakcje między kruszywem a osnową. Następnie model geometryczny poddaje się procesowi dyskretyzacji; model dyskretny uwzględniający poszczególne elementy przedstawiono na rysunku D.1.

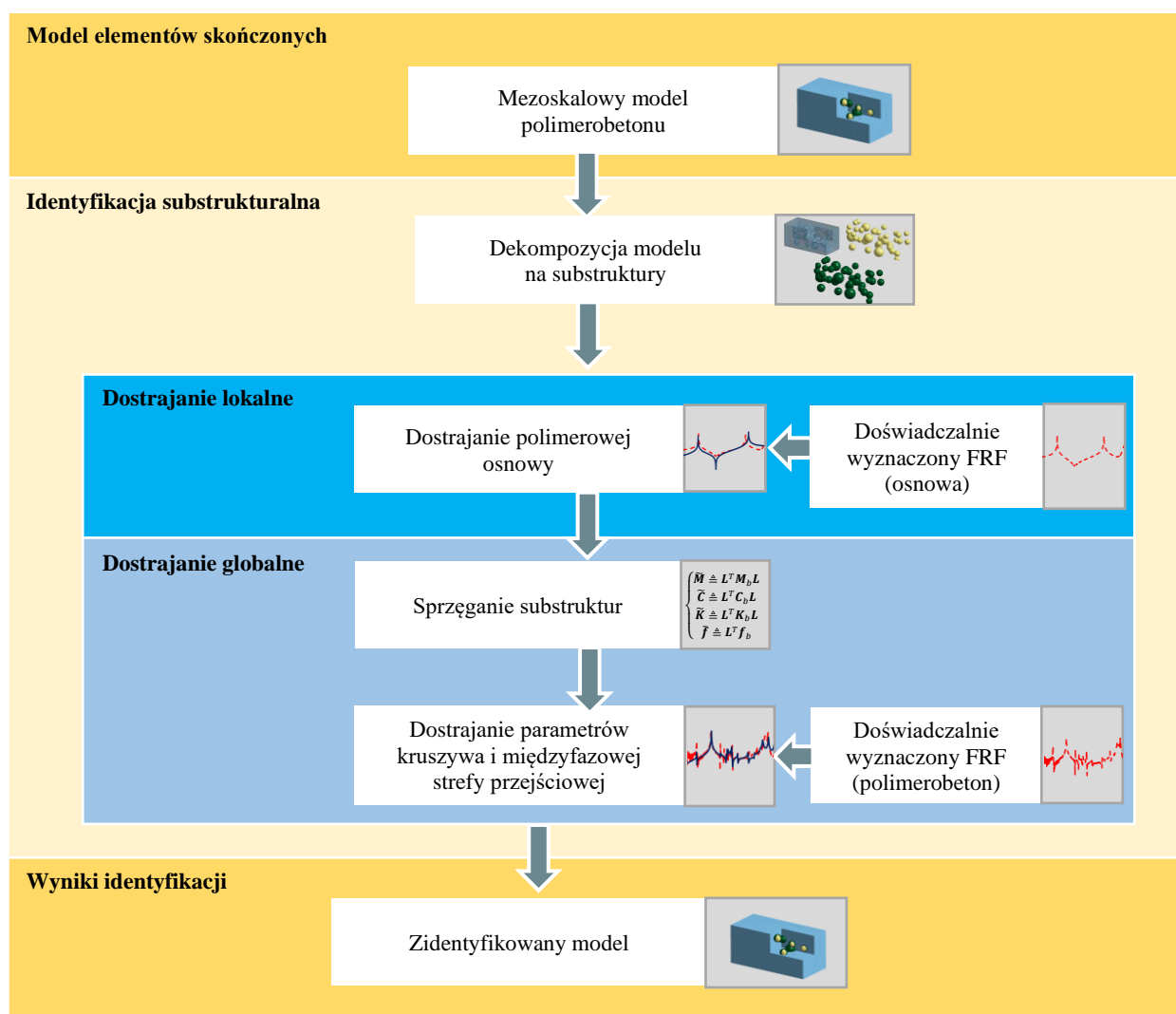


Rysunek D.1. Mezoskalowy model polimerobetonu

Po zbudowaniu mezoskalowego modelu elementów skończonych następuje jego dekompozycja; w efekcie powstają trzy grupy substruktur: (i) polimerowa osnova, (ii) kruszywo oraz (iii) międzyfazowa strefa przejściowa.

W dalszym kroku realizowana jest procedura identyfikacji. Ta odbywa się w dwóch etapach. W pierwszym identyfikowane są parametry polimerowej osnowy (dostrajanie lokalne). Następnie model osnowy sprzęgany jest z substrukcjami kruszywa oraz międzyfazowej strefy przejściowej tworząc ponownie model mezoskalowy polimerobetonu.

Dalej realizowane jest dostrajanie globalne, polegające na wyznaczeniu pozostałych (nieokreślonych w etapie pierwszym) parametrów modelu, tj. parametrów materiałowych kruszywa i międzyfazowej strefy przejściowej. Przebieg działania algorytmu przedstawiono na rysunku D.2.



Rysunek D.2. Procedura modelowania i identyfikacji polimerobetonu w mezoskali

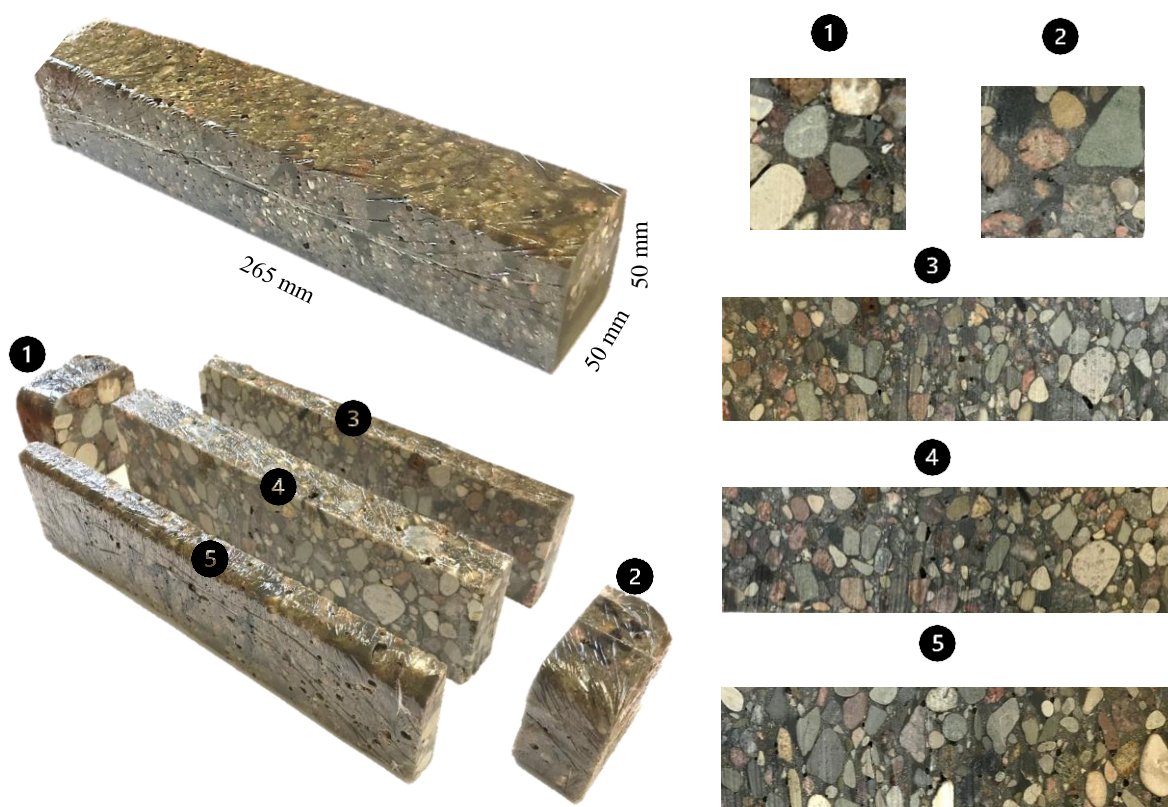
Wyniki

Działanie zaprezentowanej metodyki modelowania i identyfikacji przedstawiono na przykładzie polimerobetonowej belki. Analizowany polimerobeton składał się z żywicy epoksydowej zmieszanej z różnymi gatunkami wypełnień mineralnych. Przyjmując wielkość ziaren za kryterium podziału, wypełnienia te można podzielić na: (i) popiół, (ii) piasek o uziarnieniu 0,1-2 mm, (iii) drobną frakcję o uziarnieniu 2-5 mm, (iv) średnią frakcję o uziarnieniu 5-10 mm i (v) frakcję grubą o uziarnieniu 10-16 mm. Frakcje średnie i grube składały się głównie ze żwirów o nieregularnym kształcie. Procentowy udział masowy poszczególnych frakcji w polimerobetonie zastosowanym w badaniach przedstawiono w tabeli D.1.

Tabela D.1. Skład rozpatrywanego polimerobetonu

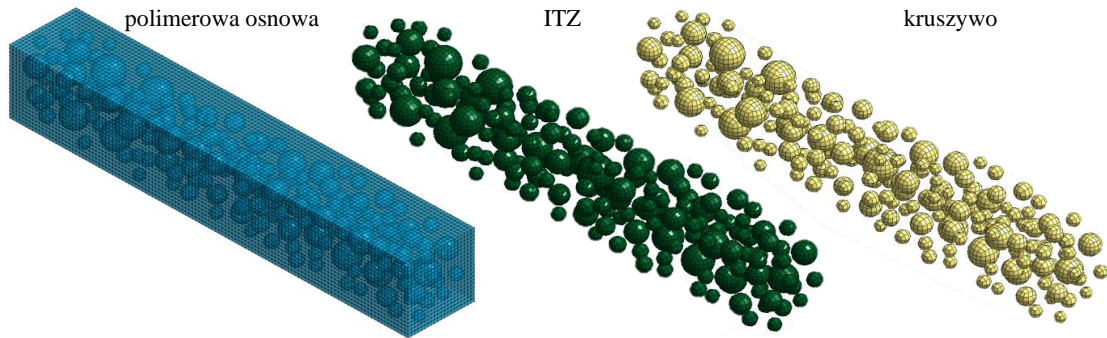
	Żywica epoksydowa	Popiół	Piasek (0,1-2 mm)	Drobna frakcja (2-5 mm)	Średnia frakcja (5-10 mm)	Gruba frakcja (10-16 mm)
Udział procentowy	15 %	1 %	16 %	15 %	35 %	18 %

Następnie wykonano dwie belki: (i) polimerobetonową oraz (ii) wytworzoną z materiału polimerobetonowej osnowy (z wyłączeniem frakcji średniej i grubej). Belkę polimerobetonową przedstawiono na rysunku D.3.



Rysunek D.3. Belka polimerobetonowa poddana analizie – struktura materiału

W kolejnym kroku wygenerowano model geometryczny przedstawiający niejednorodną strukturę polimerobetonu. Model oparto na modelach sferycznych kruszywa oraz wydrążonych modelach sferycznych międzyfazowej strefy przejściowej o grubości ścianki równej jednej dziesiątej średnicy odpowiednich frakcji kruszywa [57]. Do osnowy polimerowej wprowadzono kruszywo o średnicy mniejszej niż 5 mm [58]. Poszczególne substrukтуры wchodzące w skład modelu dyskretnego przedstawiono na rysunku D.4.

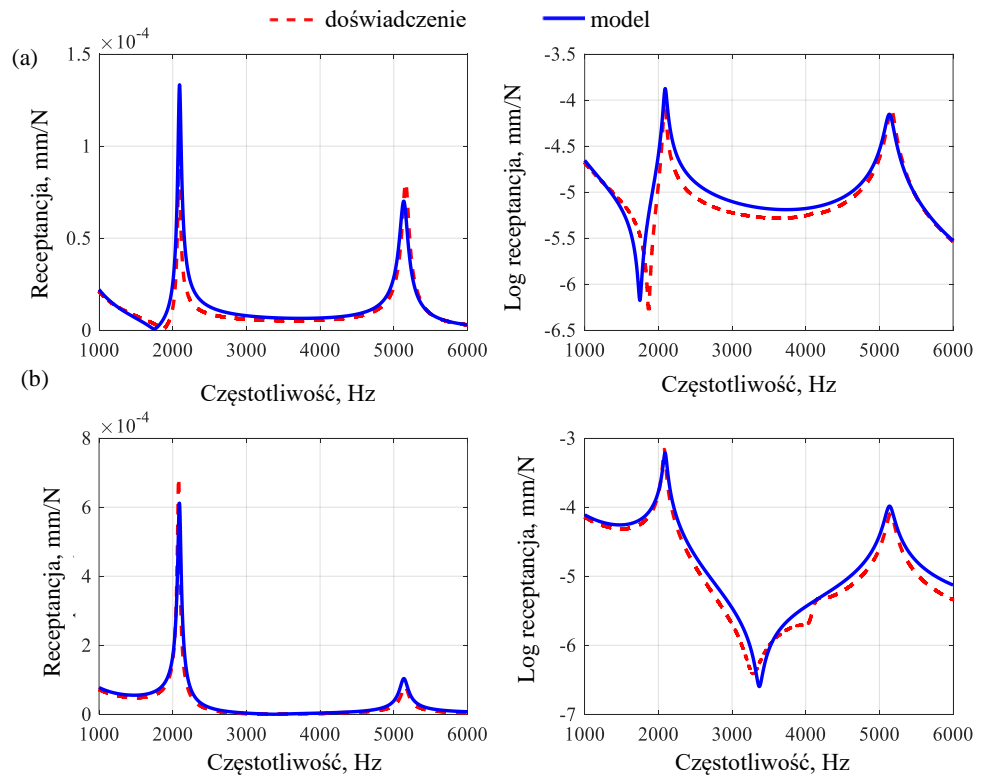


Rysunek D.4. Mezoskalowy model rozpatrywanej belki polimerobetonowej – podział na substrukтуры

Uwaga

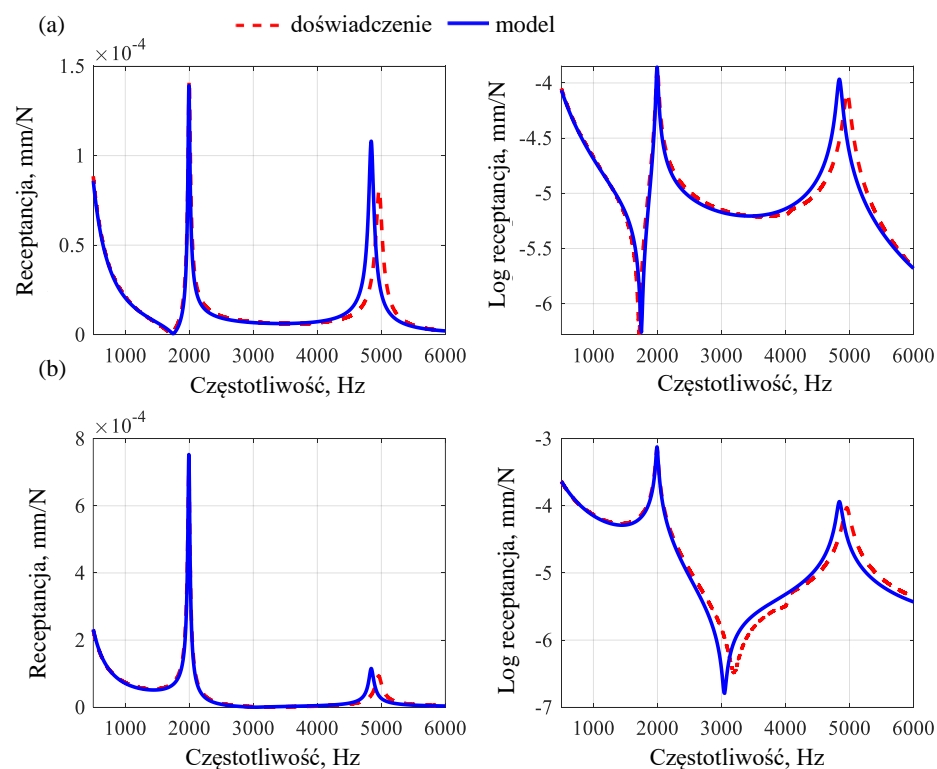
Dostrajanie lokalne i globalne przeprowadzono dla belek zawieszonych na stalowych linkach, minimalizując wpływ stanowiska badawczego na właściwości dynamiczne badanych obiektów.

Na rysunku D.5. przedstawiono porównanie funkcji receptancji uzyskanych w wyniku dostrajania lokalnego belki wykonanej materiału z osnowy polimerowej. Identyfikowanymi parametrami były: moduł Younga, gęstość oraz współczynnik strat osnowy.



Rysunek D.5. Porównanie wybranych funkcji receptancji dla belki wykonanej z osnowy polimerobetonowej w punktach R1 (a) i R2 (b)

Następnie przeprowadzono dostrajanie globalne poprzedzone sprzęgnięciem modelu. W etapie tym zidentyfikowano analogiczne parametry dla kruszywa oraz międzyfazowej strefy przejściowej (początkowe parametry dla tychże zaczerpnięto z [59]). Na rysunku D.6. przedstawiono receptancji uzyskanej w wyniku dostrajania globalnego dla belki polimerobetonowej.



Rysunek D.6. Porównanie wybranych funkcji receptancji dla belki polimerobetonowej w punktach R1 (a) i R2 (b)

Zidentyfikowane wartości parametrów modelu uzyskane w wyniku przeprowadzonej identyfikacji zestawiono z wartościami początkowymi w tabeli D.2.

Uwaga

Wartości liczby Poissona dla poszczególnych elementów modelu zidentyfikowano w osobnym doświadczeniu polegającym na dostrojeniu wartości częstotliwości drgań własnych odpowiadających postaci drgań skrętnej belki, ze względu na znacznie większą istotność (w porównaniu z istotnością dla drgań giętych) tego parametru wskazanej tej postaci.

Tabela D.2. Porównanie wartości parametrów modelu przed i po identyfikacji

Własność	Wartość początkowa	Wartość zidentyfikowania	Różnica względna
Polimerowa osnowa			
Moduł Younga, E_{pm}	20,0 GPa	19,2 GPa	8,6 %
Liczba Poissona, ν_{pm}	0,20	0,15	25,0 %
Gęstość, ρ_{pm}	2050 kg/m ³	1922 kg/m ³	6,2 %
Współczynnik strat, η_{pm}	0,01660	0,02200	32,5 %
Kruszywo			
Moduł Younga, E_{agg}	70,0 GPa	90,0 GPa	28,6 %
Liczba Poissona, ν_{agg}	0,20	0,15	25,0 %
Gęstość, ρ_{agg}	2500 kg/m ³	2430 kg/m ³	2,8 %
Współczynnik strat, η_{agg}	0,00150	0,00156	4,0 %
Międzyfazowa strefa przejściowa			
Moduł Younga, E_{ITZ}	70,0 GPa	60,0 GPa	14,3 %
Liczba Poissona, ν_{ITZ}	0,20	0,15	25,0 %
Gęstość, ρ_{ITZ}	2500 kg/m ³	2330 kg/m ³	6,8 %
Współczynnik strat, η_{ITZ}	0,00150	0,00010	93,3 %

Dyskusja wyników

Zaproponowana metoda modelowania pozwoliła na dokładne odwzorowanie właściwości dynamicznych belki polimerobetonowej. Uzyskane wyniki wskazują, iż model z powodzeniem odwzorował wszystkie pięć postaci drgań własnych znajdujące się w analizowanym zakresie częstotliwości. Średni błąd względny uzyskany dla wartości częstotliwości drgań własnych wyniósł 1,2 %, błąd maksymalny nie przekroczył 2,3 %. Dodatkowo, co bardzo ważne, uzyskano wysoką dokładność odwzorowania receptancji.

Zastosowana metoda identyfikacji substrukturalnej pozwoliła na zmniejszenie maksymalnego błędu względnego dla częstotliwości własnych z 7,1 %, a średnio z 5,9 %. Zasadność zastosowanego dostrajania przejawia się także w przypadku zwiększenia dokładności odwzorowania receptancji.

Walidację zaproponowanej metody przeprowadzono wykorzystując zidentyfikowane parametry osnowy polimerowej, kruszywa i międzyfazowej strefy przejściowej do oszacowania właściwości dynamicznych belki wykonanej z polimerobetonu, różniącego się proporcjami poszczególnych frakcji kruszywa. Uzyskane wyniki były zadowalające.

Zastępczy współczynnik strat, wyznaczony globalnie dla belki polimerobetonowej, daje wynik bardzo podobny do uzyskanego w [A]. Tutaj wartość wyniosła 0,0145 w porównaniu z 0,0152 uzyskaną w przywołanym badaniu, co daje względną różnicę 4,6 %.

Analiza wyników niesie ze sobą pewne wskazówki dotyczące samego materiału. Największe zmiany zachodzą w wartościach współczynnika strat dla osnowy polimerowej i międzyfazowej strefy przejściowej, odpowiednio 32,5 % i 93,3 %. Wyniki te można interpretować na dwa sposoby: (i) identyfikacja wartości początkowych na podstawie reprezentatywnych próbek materiału może nie wystarczyć do dokładnego odzwierciedlenia właściwości dynamicznych materiału kompozytowego oraz (ii) dalej idący wniosek, lub hipoteza: parametry te mogą mieć kluczowy wpływ na tłumienie polimerobetonów – aspekt ten wymaga jednak dalszych badań.

Potencjalnym ograniczeniem prezentowanego algorytmu może być niespójność strukturalna modelu (wyrażająca się niezgodnością postaci drgań skrętnych). Taka sytuacja wymagałaby głębszego przemyślenia modelu i jego

Uwaga

Wskazana obserwacja stanowiła informację wejściową podczas projektowania polimerobetonu, co przedstawiono w [E].

ewentualnej modyfikacji. Jednym z możliwych kierunków poprawy wyników jest opracowanie modelu mezoskalowego opartego na realistycznych modelach kruszywa, dających możliwość określenia ich specyficznej orientacji [37].

Podsumowanie

Uwaga

Prace zostały zrealizowane w ramach grantu MINIATURA 2021/05/X/ST8/01576, „Badania doświadczalne i modelowanie właściwości dynamicznych polimerobetonu w mezoskali”.

W artykule podjęto problematykę modelowania właściwości dynamicznych materiałów wysoce niejednorodnych, jakim jest rozpatrywany polimerobeton. Zaproponowana metodyka modelowania umożliwia rzetelne odwzorowanie i przewidywanie właściwości dynamicznych polimerobetonu.

Choć praca nie wyjaśnia natury tłumienia występującego w polimerobetonie, dostarcza narzędzi do modelowania właściwości dynamicznych w szerokim zakresie częstotliwości, które w pewnym zakresie mogą wspomagać proces projektowania materiału.

E

Dane bibliograficzne

Tytuł artykułu: Increasing lathe machining stability by using a composite steel–polymer concrete frame

Czasopismo: CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology
(IF 3,6; MEiN 100).

Wkład: Paweł Dunaj (60 %):

opracowanie koncepcji artykułu; zaplanowanie i przeprowadzenie badań modelowych i doświadczalnych; budowa modelu elementów skończonych; analiza wyników; pisanie artykułu; koordynowanie prac zespołu

Uwaga

Oświadczenia autorów dotyczące wkładu w powstanie publikacji zawarto w Załączniku U.2.

Bartosz Powałka (10 %):

analiza wyników; konsultacje merytoryczne

Stefan Berczyński (10 %):

analiza wyników; konsultacje merytoryczne

Marcin Chodźko (10 %):

badania doświadczalne

Tomasz Okulik (10 %):

przygotowanie polimerobetonów wg zaleceń; opracowanie technologii wypełniania korpusu

Umiejscowienie w cyklu

Praca stanowi podsumowanie cyklu, przedstawia proces opracowania oraz wyboru odpowiedniego polimerobetonu a następnie analizę wariantową wpływu jego rozmieszczenia na właściwości dynamiczne obrabiarki. Przedstawiona w artykule doświadczalna weryfikacja modelu elementów skończonych tokarki stanowi o użyteczności opracowanych w ramach cyklu metod modelowania i identyfikacji. Analizy zawarte w pracy stanowią potwierdzenie drugiej, postawionej w ramach cyklu, hipotezy badawczej.

Wprowadzenie

Wymagania funkcjonalne nowoczesnych obrabiarek, dotyczące wysokiej wydajności, prowadzą do zwiększania prędkości i głębokości obróbki przy zachowaniu odpowiedniej dokładności i powtarzalności. Wymusza to poszukiwanie rozwiązań zwiększających stabilność obróbki. Proces ten realizowany jest dla istniejących obrabiarek poprzez zastosowanie pasywnych [60], [61] i aktywnych [62], [63] eliminatorów drgań lub odpowiedni dobór parametrów technologicznych obróbki na podstawie znajomości krzywych workowych [64].

Zwiększenie stabilności obróbki można także osiągnąć poprzez odpowiednie kształtowanie właściwości dynamicznych obrabiarki już na etapie jej projektowania. Ze względu na fakt, że obecne konstrukcje budowane są w dużej mierze z wykorzystaniem gotowych podzespołów, kształtowanie ich właściwości dynamicznych sprowadza się do odpowiedniego kształtowania właściwości dynamicznych korpusów. Tu coraz większą rolę odgrywają korpusy hybrydowe. Analizując publikacje przeglądowe dotyczące obecnie proponowanych rozwiązań, można zauważyć niezwykle różnorodność w zakresie ich konstrukcji [65]–[69]. Spośród najchętniej proponowanych, można wyróżnić rozwiązania z zastosowaniem kompozytów z włókna węglowego [70]–[76] oraz polimerobetonów [77]–[79].

W artykule przedstawiono proces zwiększania właściwości tłumiących (oraz ogólniej sztywności dynamicznej) tokarki pionowej o spawanym korpusie stalowym wypełnionym polimerobetonem. Głównym wyróżnikiem opisywanej pracy obok samej nowatorskiej konstrukcji jest proces jej projektowania, polegający na przyjęciu kryterium względnego przemieszczenia narzędzie-przedmiot obrabiany (związanego bezpośrednio ze stabilnością obróbki) jako głównego kryterium konstrukcyjnego. Przyjęcie tego kryterium wiąże się z faktem, że nie jest możliwa ocena pracy obrabiarki na podstawie samej analizy jej właściwości tłumiących, jak wskazują przytoczone wcześniej prace. Poprawa właściwości tłumiących często wiąże się ze zmianą sztywności i masy konstrukcji, czyli zmianą jej właściwości masowo-dyssypacyjno-sprężystych, równoczesna zmiana tychże niekoniecznie musi pozytywnie wpłynąć na stabilność obrabiarki.

Metodyka badań

Opracowanie polimerobetonu

W pierwszym etapie badań opracowano polimerobeton służący do wypełnienia stalowego korpusu. Materiał ten powinien charakteryzować się zdolnością do znacznego zwiększenia energii rozpraszania drgań konstrukcji stalowej, zwartą, jednolitą strukturą bez pęcherzyków powietrza, małym skurczem – po wypełnieniu profilu stalowego powinien przylegać do jego wewnętrznej powierzchni.

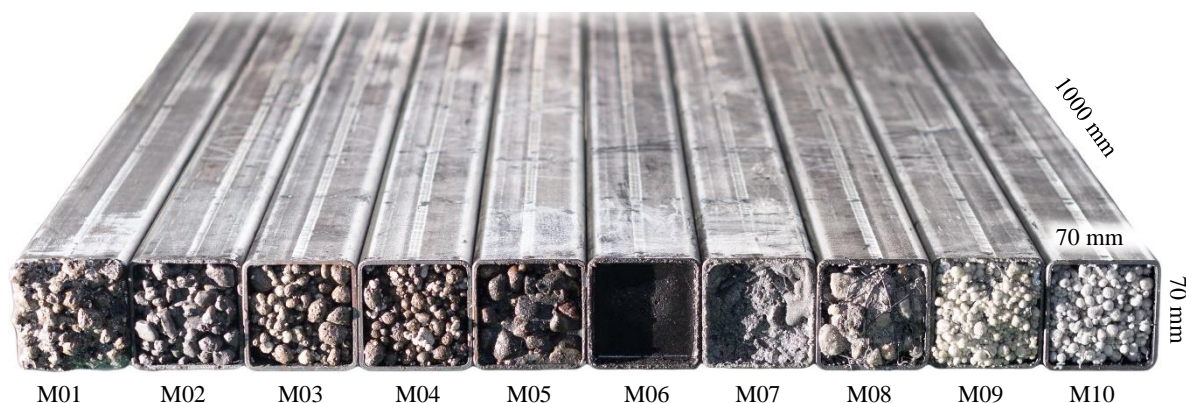
Na podstawie przedstawionych wymagań funkcjonalnych polimerobetonów opracowano dziesięć materiałów o różnym składzie. Jako spoiwo alternatywnie stosowano żywicę epoksydową (Z1) i żywicę poliestrową (Z2). Wypełniaczami były mieszaniny osiemnastu różnych materiałów stosowanych do produkcji polimerobetonów: pył – K1, K18, wypełniacz mineralny K2-K5 (frakcja drobna o uziarnieniu <2 mm), K6-K10 (frakcja średnia o uziarnieniu 2-10 mm), K11-K14 (frakcja gruboziarnista, uziarnienie 8-16 mm) oraz mikrobrojenie w postaci włókien stalowych – K15, K16.

Analizując wyniki badań przedstawionych w [80]–[82] mając na uwadze wnioski sformułowane w [D] proporcje żywicy i wypełniaczy dobierano tak, aby opracowany polimerobeton spełniał założone wymagania funkcjonalne. W rezultacie opracowano dziesięć polimerobetonów, których skład przedstawiono w tabeli E.1.

Tabela E.1. Skład opracowanych polimerobetonów

Oznaczenie polimerobetonu	Żywica	Składniki	Ogólna charakterystyka materiału
M01	Z1	K1, K6, K9, K11, K12, K13, K14,	Składniki grubej frakcji wypełniają mieszaninę około 45 % wagowych. Składniki o mniejszej wielkości rozdzielono w równych proporcjach w zakresie frakcji średniej i drobnej.
M02	Z2	K17	
M03	Z1	K1, K5, K6, K7,	Składniki poszczególnych frakcji dobierano w taki sposób, aby zastosować wyłącznie wypełnienie o małej gęstości.
M04	Z2	K9, K12	
M05	Z1	K1, K3, K4, K8,	Wypełnienie grubej frakcji zajmowało około 50 % (wagowo) mieszaniny. Frakcja średnia i drobna po 15 %. Frakcja pyłowa 1 %. Składniki poszczególnych frakcji dobierano w taki sposób, aby użyć składników o najniższym koszcie na jednostkę masy.
M06	Z2	K11	
M07	Z1	K2, K3, K10, K13,	Składniki wypełnienia mieszaniny zawierały frakcje różnej wielkości. Użyto wypełnienia mineralnego o dużej gęstości. W mieszaninie użyto także około 13 % (wagowo) włókien stalowych.
M08	Z2	K14, K15, K18	
M09	Z1	K2, K5, K6, K7,	Składniki wypełnienia zawarte w mieszaninie zawierały frakcje drobną i średnią, bez udziału frakcji grubej. Wybrano składniki wypełnienia, których gęstość była najniższa dla danej wielkości frakcji. Dodatkowo mieszanina zawierała około 13 % (wagowo) włókien stalowych.
M10	Z2	K16, K17	

Opracowane polimerobetony posłużyły do wypełnienia stalowych profili o wymiarach zewnętrznych 70 mm × 70 mm, grubości ścianki 2 mm i długości 1000 mm. Wytworzone belki przedstawiono na rysunku E.1.

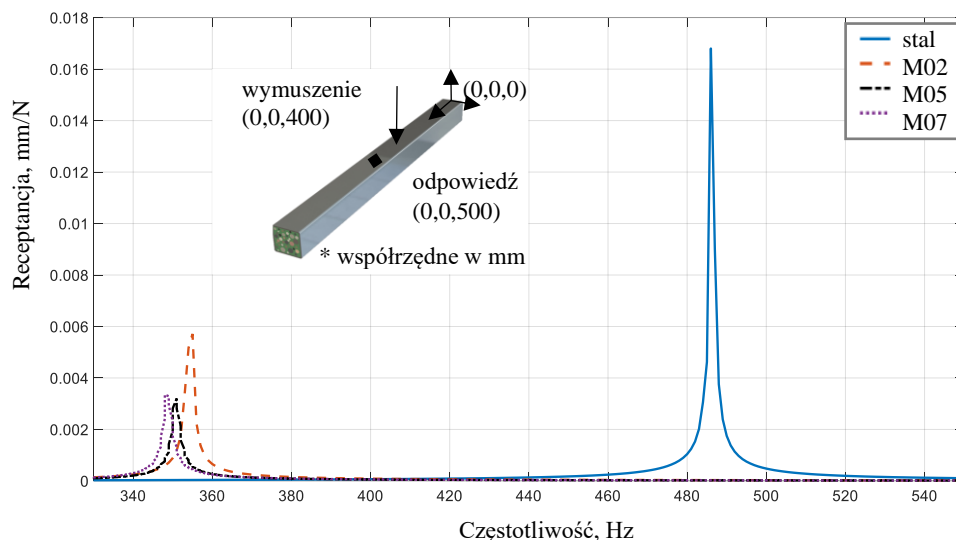


Rysunek E.1. Wytworzone belki stalowo-polimerowe

Uwaga

Zawieszenie belek na stalowych linkach, a więc aproksymacja warunków typu swobodnego brzegu, pozwoliła na zminimalizowanie wpływu stanowiska badawczego na właściwości dynamiczne badanych obiektów.

Następnie belki zawieszono na stalowych linkach poddano badaniom impulsowym wyznaczając dla każdej funkcje receptancji, uzyskane wyniki odniesiono do belki niewypełnionej badając tym samym zdolność polimerobetonu do zwiększenia tłumienia tejże. Receptancje belek stalowo-polimerobetonowych najbardziej zwiększających tłumienia odniesione do receptancji belki stalowej przedstawiono na rysunku E.2.



Rysunek E.2. Porównanie receptancji trzech belek stalowo-polimerowych o największej sztywności dynamicznej z belką stalową

Analizując otrzymane wyniki, można zauważyć, że największy wzrost tłumienia uzyskano dla polimerobetonu M05. W porównaniu z belką stalową współczynnik tłumienia modalnego wzrósł o 239 %, amplituda funkcji receptancji dla pierwszej częstotliwości rezonansowej zmniejszyła się o 81 %.

Projekt korpusu głównego tokarki

Kolejny etap badań obejmował wskazanie obszarów konstrukcji, które powinny zostać wypełnione polimerobetonem w celu poprawy właściwości dynamicznych obrabiarki. Proces ten wspomagano analizą modelu elementów skończonych tokarki [C], celem zwiększenia tłumienia i uniknięcia niekorzystnego sprzężenia właściwości masowo-dyssypacyjno-sprężystych, które mogłoby spowodować znaczne zmniejszenie stabilności obróbki. Kryterium konstrukcyjne przyjęte podczas wyboru lokalizacji polimerobetonowego wypełnienia w stalowym korpusie tokarki obejmowało analizę względnego przemieszczenia narzędzie-przedmiot (związanego bezpośrednio ze stabilnością obróbki).

Kryterium konstrukcyjne

W operacjach toczenia niestabilne skrawanie spowodowane drganiami regeneracyjnymi jest głównym problemem, który pogarsza jakość powierzchni maszyny i ogranicza produktywność operacji. Często, aby zapewnić stabilne warunki skrawania, głębokość skrawania i prędkość wrzeciona wybiera się z wykresu stabilności. Granicę stabilności można wyrazić jako [83]:

$$a_{lim} = -\frac{1}{2K_C Re(\phi_o)}, \quad (E.1)$$

gdzie: a_{lim} – graniczna głębokość skrawania, K_C – współczynnik właściwy oporu skrawania, ϕ_o – zorientowana funkcja przejścia (ang. *oriented transfer function*).

Zorientowana funkcja przejścia zależy od geometrii narzędzia skrawającego i jest proporcjonalna do wzajemnych częstotliwościowych funkcji przejścia narzędzia i przedmiotu obrabianego. Ogólnie, względne funkcje odpowiedzi częstotliwościowej narzędzia i przedmiotu obrabianego można wyrazić w postaci macierzy 3×3 . Jednakże podczas toczenia dynamiczne przemieszczenia w kierunku skrawania (oś Y) nie wpływają na dynamiczną grubość wióra. Dlatego w celu oceny projektowanej tokarki pod kątem stabilności względne przemieszczenia dynamiczne narzędzia i przedmiotu obrabianego w kierunkach osi X i Z oblicza się jako:

$$\begin{aligned} \Delta x &= x^T - x^W \\ \Delta z &= z^T - z^W. \end{aligned} \quad (E.2)$$

Przemieszczenia dynamiczne narzędzia (x^T, z^T) i przedmiotu obrabianego (x^W, z^W) są powiązane z siłami skrawania w sposób następujący:

$$\begin{bmatrix} x^T \\ x^W \\ z^T \\ z^W \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{xx}^{TT} & G_{xx}^{TW} & G_{xz}^{TT} & G_{xz}^{TW} \\ G_{xx}^{WT} & G_{xx}^{WW} & G_{xz}^{WT} & G_{xz}^{WW} \\ G_{zx}^{TT} & G_{zx}^{TW} & G_{zz}^{TT} & G_{zz}^{TW} \\ G_{zx}^{WT} & G_{zx}^{WW} & G_{zz}^{WT} & G_{zz}^{WW} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x^T \\ F_x^W \\ F_z^T \\ F_z^W \end{bmatrix}. \quad (\text{E.3})$$

gdzie: G – częstotliwościowa funkcja przejścia na kierunkach: xx, xz, zx, zz , wyznaczona dla narzędzia TT , przedmiotu obrabianego WW lub pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym TW, WT .

Uwzględniając, iż podczas toczenia zachodzi równość:

$$\begin{aligned} F_x^W &= -F_x^T, \\ F_z^W &= -F_z^T, \end{aligned} \quad (\text{E.4})$$

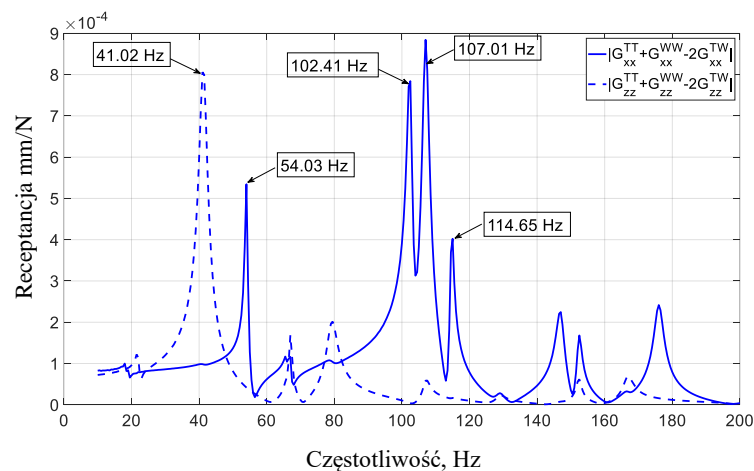
oraz korzystając z symetrii macierzy z (E.3), a następnie podstawiając (E.3) do (E.2) można zapisać:

$$\begin{aligned} \Delta x &= (G_{xx}^{TT} + G_{xx}^{WW} - 2G_{xx}^{TW})F_x^T + (G_{xz}^{TT} + G_{xz}^{WW} - 2G_{xz}^{TW})F_z^T \\ \Delta z &= (G_{xz}^{TT} + G_{xz}^{WW} - 2G_{xz}^{TW})F_x^T + (G_{zz}^{TT} + G_{zz}^{WW} - 2G_{zz}^{TW})F_z^T. \end{aligned} \quad (\text{E.5})$$

Receptancje wyznaczano modelując narzędzie i przedmiot przy użyciu sztywnych elementów skończonych, aby wykluczyć wpływ ich dynamiki i skupić się na ocenie właściwości samej obrabiarki.

Analiza rozmieszczenia polimerobetonu

W pierwszym kroku wyznaczono zorientowane funkcje przejścia dla tokarki o korpusie stalowym, co przedstawiono na rysunku E.3. Obliczenia przeprowadzono na modelu elementów skończonych przedstawionym w [C].

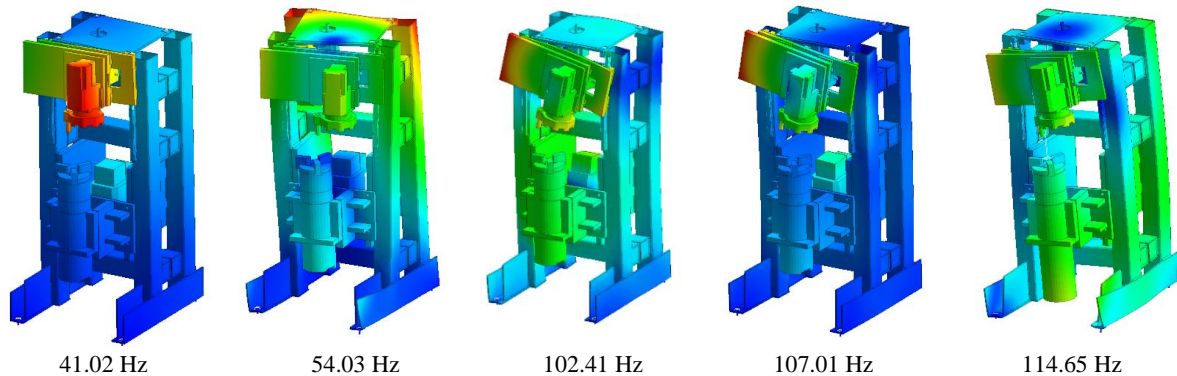


Rysunek E.3. Receptancje względne wyznaczone pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym – korpus stalowy

Uwaga

Postać drgań pojawiająca się na kierunku Z przy około 41 Hz (rys. E3 i E6) związana była z ruchem głowicy narzędziowej (rys. E.4) i zależała głównie od charakterystyki śruby tocznej przenoszącej napęd w osi Z obrabiarki. Tym samym wpływ polimerobetonowego wypełnienia na amplitudę rezonansu odpowiadającego tej postaci drgań był znikomy.

Postacie drgań własnych odpowiadające wskazanym częstotliwościom własnym przedstawiono na rysunku E.4.



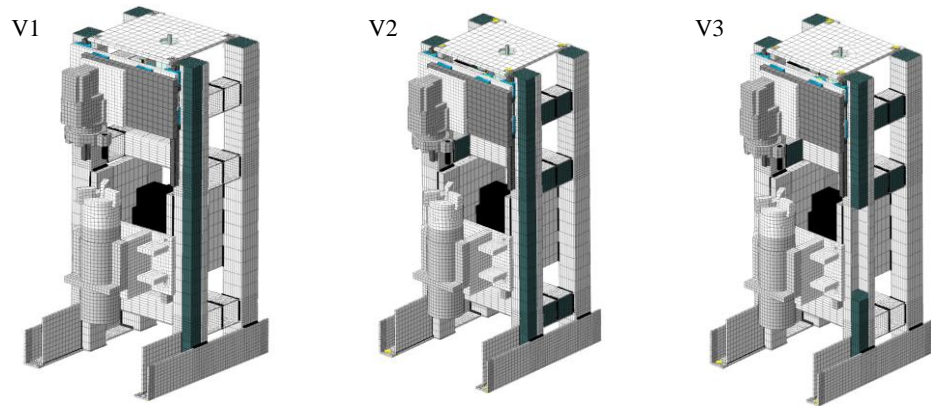
Rysunek E.4. Postacie drgań własnych odpowiadające wskazanym częstotliwościom własnym

Analizując wskazane postacie drgań zaproponowano trzy warianty wypełnień mające na celu zwiększenie stabilności obróbki.

Wariant V1 charakteryzował się wypełnieniem pionowych profili stalowych w celu zwiększenia ich tłumienia i sztywności dynamicznej, a w efekcie zmniejszenia amplitud receptancji dla postaci odpowiadających częstotliwościom 102,41 Hz, 107,01 Hz i 114,65 Hz . Masa tokarki w tym wariantcie wynosiła 1627 kg.

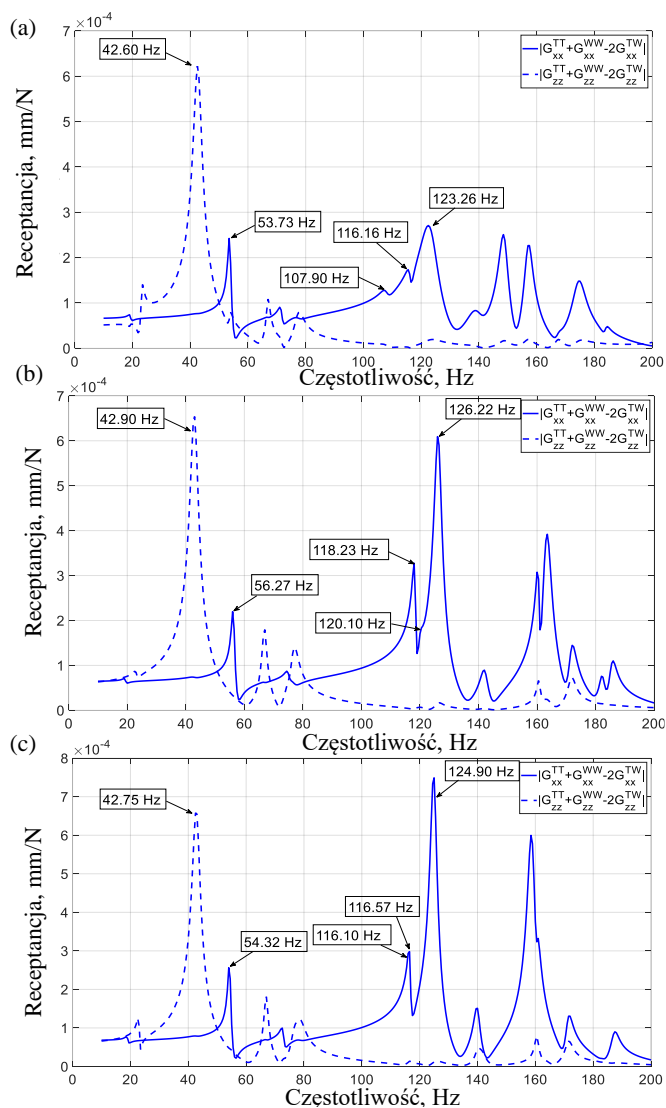
Wariant V2 był wariantem całkowicie wypełnionym; takie ułożenie polimerobetonu miało uzyskać efekt zbliżony do wariantu V1 przy dodatkowym zwiększeniu sztywności skrętnej ramy, a więc, zmniejszeniu amplitudy funkcji receptancji dla postaci drgań przy częstotliwości 54,03 Hz. Masa tokarki w tym wariantcie wynosiła 1775 kg.

Wariant V3 był modyfikacją wariantu V2 (usunięto część wypełnienia polimerobetonowego w profilach pionowych), wariant ten miał pozwolić na uzyskanie efektu zbliżonego do V2, przy jednoczesnym zmniejszeniu ciężaru korpusu w stosunku do tego wariantu. Masa tokarki w tym wariantcie wynosiła 1703 kg. Opisywane warianty przedstawiono na rysunku E.5.



Rysunek E.5. Warianty wypełnienia stalowego korpusu polimerobetonem

Następnie dla zaproponowanych wariantów wyznaczono zorientowane funkcje przejścia co przedstawiono na rysunku E.6. Następnie wyniki odniesiono do konstrukcji o korpusie stalowym – rysunek E.3.



Rysunek E.6. Receptancje względne wyznaczone pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym dla wariantu V1 (a), wariantu V2 (b) oraz wariantu V3 (c)

Analizując uzyskane przebiegi wskazano wariant V1 jako najlepiej spełniający przyjęte kryterium konstrukcyjne. Następnie zgodnie z tym wariantem wykonano prototyp tokarki.

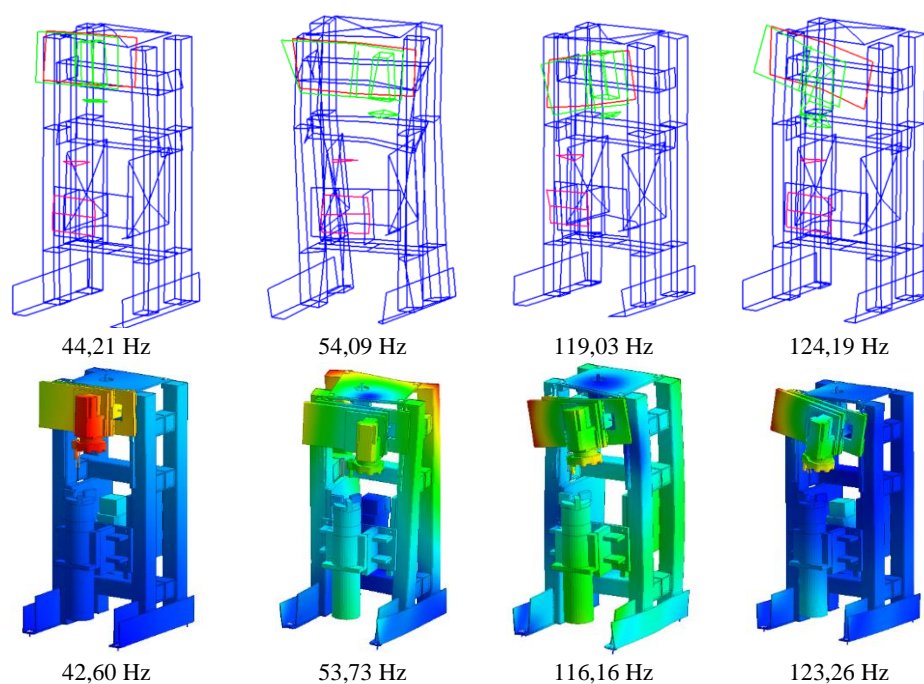
Doświadczalna weryfikacja modelu

W kolejnym kroku przeprowadzono doświadczalną weryfikację modelu. Porównanie wartości częstotliwości własnych uzyskanych obliczeniowo i doświadczalnie dla tokarki o korpusie stalowo-polimerobetonowym w wariantcie V1 przedstawiono w tabeli E.2.

Tabela E.2. Porównanie wartości częstotliwości własnych uzyskanych obliczeniowo i doświadczalnie dla tokarki z korpusem stalowo-polimerobetonowym w wariantcie V1

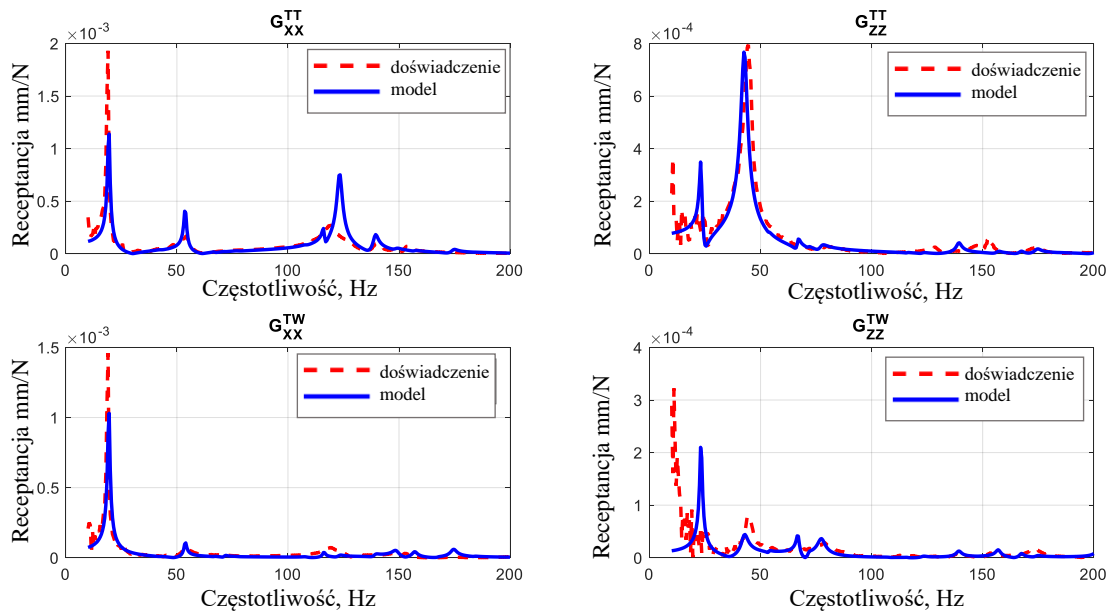
Postać drgań	Wartość częstotliwości własnej, Hz		Błąd względny δ
	Model	Doświadczenie	
1.	19,23	18,80	2,3 %
2.	23,17	21,25	9,0 %
3.	42,60	44,21	3,6 %
4.	53,73	54,09	0,7 %
5.	71,57	70,32	1,8 %
6.	77,42	79,12	2,1 %
7.	107,9	111,54	3,3 %
8.	116,16	119,03	2,4 %
9.	123,26	124,19	0,7 %
		Średnio	2,9 %

Na rysunku E.7. przedstawiono porównanie postaci drgań własnych wpływających na stabilność obróbki określoną na podstawie obliczeń i badań doświadczalnych.



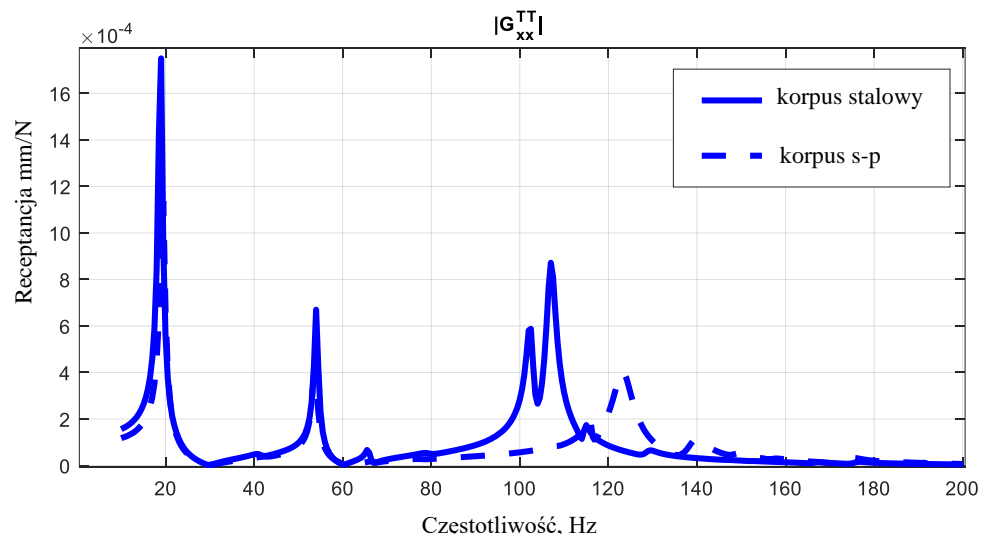
Rysunek E.7. Porównanie wskazanych postaci drgań własnych wyznaczonych doświadczalnie i obliczeniowo

Porównanie funkcji receptancji określonej na podstawie obliczeń i badań doświadczalnych dla narzędzia i przedmiotu obrabianego przedstawiono na rysunku E.8.



Rysunek E.8. Porównanie funkcji receptancji określonej na podstawie obliczeń i badań doświadczalnych dla narzędzia i przedmiotu obrabianego

Dodatkowo na rysunku E.9. zamieszczono doświadczalne porównanie prototypowej tokarki ze wykonanej ze stalowym korpusem głównym oraz stalowo-polimerobetonowym wg wariantu V1.



Rysunek E.9. Porównanie doświadczalnie wyznaczonych receptancji dla narzędzia na kierunku X dla tokarki ze stalowym korpusem głównym oraz stalowo-polimerobetonowym wg wariantu V1

Dyskusja wyników

Analizując przedstawione wyniki można stwierdzić, że zastosowanie opracowanego polimerobetonu pozwoliło na zwiększenie współczynnika tłumienia

modalnego belek stalowych o 239 % (z 0,084 % do 0,285 %), co przełożyło się na 81 % zmniejszenie amplitudy receptancji dla dominującego rezonansu (od 16,80 $\mu\text{m}/\text{N}$ do 3,20 $\mu\text{m}/\text{N}$).

Zastosowanie polimerobetonu do wypełnienia stalowego korpusu głównego tokarki spowodowało zmniejszenie poziomów zorientowanej funkcji przejścia pomiędzy narzędziem a przedmiotem obrabianym w przypadku rezonansów wpływających na stabilność obróbki i wynikających z odkształceń korpusu średnio o 55 %, 33 % i 22 % odpowiednio dla wariantów V1, V2 i V3. Wyniki te osiągnięto przy jednoczesnym zwiększeniu masy analizowanych wariantów w stosunku do ramy stalowej odpowiednio o 22 %, 32 % i 27 %.

W wariancie V1 skupiono się na zmniejszaniu receptancji odpowiadających postaciom skrętnym suportu X (względem osi Y). W rzeczywistości amplitudy zostały zmniejszone o 80 %, 83 % i 33 %. Warianty V2 i V3 pomimo zastosowania większej ilości wypełnienia polimerobetonowego nie pozwoliły na uzyskanie tak dobrej redukcji amplitudy funkcji receptancji. Precyzując, redukcja amplitud dla postaci 7. i 8. wyniosła odpowiednio 58 %, 80 % i 63 %, 66 % dla wariantów V2 i V3. Nieoczekiwanie wzrost o 53 % (wariant V2) i 87 % (wariant V3) uzyskano dla postaci 9. Może to mieć związek z niekorzystnym rozkładem masy w górnej części korpusu obrabiarki.

Należy zauważyć, że w zakresie częstotliwości 41-43 Hz uzyskano niewielką redukcję receptancji (23 % – wariant V1, 20 % – wariant V2 i 19 % – wariant V3). Wynika to w dużej mierze z charakterystyki śruby tocznej zastosowanej w napędzie suportu Z. Poprawa właściwości tłumiących korpusu ma ograniczony wpływ na zwiększenie stabilności obróbki wynikającą z tej postaci drgań.

Można stwierdzić, że zastosowanie większej ilości wypełnienia polimerobetonowego nie przekłada się na poprawę stabilności obróbki i związane z tym zmniejszenie poziomów amplitudy receptancji względnego przemieszczenia narzędzia i przedmiotu obrabianego. Zastosowanie wypełnienia spowodowało zmianę sztywności i masy konstrukcji, a co za tym idzie zmianę struktury układu masowo-dyssypacyjno-sprężystego. Niekorzystna kombinacja tych właściwości spowodowała zmniejszenie stabilności obróbki. Dlatego

niezwykle ważne jest takie rozmieszczenie wypełnienia, aby uniknąć opisanego zjawiska, co zapewnia przyjęta procedura modelowania.

Opracowana procedura modelowania pozwoliła uzyskać wysoką zgodność postaci drgań oraz wysoką zgodność receptancji (z wyjątkiem rezonansów związanych z drganiami niskoczęstotliwościowymi) w porównaniu z wynikami badań doświadczalnych. Błędy względne w odwzorowaniu wartości częstotliwości drgań własnych nie przekraczały 9 %, średnio 2,9 %. Potwierdza to użyteczność i skuteczność składowych metod modelowania opracowanych w ramach cyklu.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono rozwiązanie polegające na zastosowaniu stalowo-polimerobetonowego korpusu głównego tokarki pionowej. Zastosowanie wypełnienia pozwoliło uzyskać stosunkowo lekką konstrukcję o dobrych właściwościach sztywnościowych i tłumiących, co wpłynęło na znaczny wzrost stabilności obróbki w stosunku do rozwiązania z korpusem stalowym.

Zaproponowana metodologia modelowania korpusów stalowo-polimerobetonowych, dostarczyła narzędzi niezbędnych w procesie projektowania i pozwoliła na rzetelne i jednoznaczne określenie właściwości użytkowych rozpatrywanej tokarki.

Dodatkowo, potwierdzając drugą hipotezę stawianą w ramach cyklu, wykazano, że nie zawsze zastosowanie większej ilości polimerobetonu (pomimo wprowadzenia dodatkowego tłumienia i zwiększenia sztywności konstrukcji) przekłada się na poprawę stabilności obróbki. Takie działanie może skutkować niekorzystną kombinacją właściwości masowo-dyssypacyjno-sprężystych, co w efekcie zmniejsza stabilność obróbki.

Ponadto zastosowanie spawanego korpusu stalowego pozwala na szybkie wykonanie tego typu konstrukcji, głównie ze względu na skrócenie procesu technologicznego (m.in. brak konieczności budowy form odlewniczych, skrócone sezonowanie spawanej konstrukcji stalowej).

Możliwość szybkiej i taniej produkcji jest szczególnie uzasadniona w przypadku specjalnych maszyn technologicznych produkowanych jednostkowo lub w małych seriach. Przedstawiona technologia wytwarzania korpusów stalowo-polimerobetonowych maszyn technologicznych może stanowić

zatem konkurencyjną alternatywę dla obecnie najpopularniejszej technologii odlewania korpusów z żeliwa szarego.

4.4. Podsumowanie cyklu

W podsumowaniu przedkładanego cyklu należy zaznaczyć, iż zrealizowano nakreślony na wstępie cel badań oraz udowodniono postawione hipotezy badawcze.

Spośród najważniejszych osiągnięć opisanych na łamach przedkładanego cyklu publikacji można wymienić:

- **opracowanie algorytmu identyfikacji substrukturalnej umożliwiającego wyznaczenie parametrów modeli niewystępujących w samodzielnej formie;**
- **opracowanie metodyki modelowania właściwości dynamicznych cienkościennych stalowych konstrukcji spawanych;**
- **opracowanie metodyki modelowania właściwości dynamicznych materiałów silnie heterogenicznych z zastosowaniem modeli elementów skończonych w skali mezo;**
- **opracowanie projektu i analiza tokarki pionowej o stalowo-polimerobetonowym korpusie głównym.**

Przedstawione prace można sklasyfikować w dziedzinie inżynierii mechanicznej w obszarze modelowania i identyfikacji właściwości dynamicznych obrabiarek. Dodatkowo należy nadmienić, iż realizowane prace badawcze bardzo silnie związane były z zagadnieniami poruszonymi w przemyśle obrabiarkowym, co stanowi nie tylko o ich poznawczej ale również użytkowej wartości.

Opracowana tokarka pionowa lekkiej konstrukcji została wdrożona do produkcji detali krótkich typu tarcza i tuleja z kołnierzem w Andrychowskiej Fabryce Maszyn DEFUM S.A. oraz nagrodzona II miejscem w Konkursie na Najlepsze Osiągnięcie Techniczne 2019 roku – XIII edycja. Konkurs organizowany był przez Zarząd Główny Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich (SIMP).

4.4. Omówienie pozostałego dorobku

Pozostały dorobek wnioskodawcy można podzielić na: (i) publikacje obejmujące tematykę realizowaną w ramach rozprawy doktorskiej, (ii) publikacje obejmujące modelowanie obrabiarek oraz (iii) pozostałe publikacje. Zgodnie z przyjętym podziałem w dalszej części wniosku omówiono poszczególne grupy publikacji.

Publikacje obejmujące tematykę realizowaną w ramach rozprawy doktorskiej

Zgodnie z wprowadzeniem nakreślonym w punkcie 4.1. prace zrealizowane w ramach rozprawy doktorskiej obejmowały opracowanie metod wspomagających projektowanie korpusów stalowo-polimerobetonowych. Publikacje wchodzące w skład tej grupy obejmowały:

- (i) badania wstępne obejmujące analizę stosowalności koncepcji stalowo-polimerobetonowego korpusu

P. Dunaj*, M. Chodźko, T. Okulik, S. Berczyński, i B. Powałka, „Assessment of the time-varying load influence on damping abilities of steel beams filled with composite material”, w *Advances in Mechanism and Machine Science*, T. Uhl, Red., Cham: Springer International Publishing, 2019, s. 3309–3317. (**Scopus**)

P. Dunaj*, T. Okulik, B. Powałka, S. Berczyński, i M. Chodźko, „Experimental Investigations of Steel Welded Machine Tool Bodies Filled with Composite Material”, w *Advances in Manufacturing II*, B. Gapiński, M. Szostak, i V. Ivanov, Red., Cham: Springer International Publishing, 2019, s. 61–69. (**Scopus, WoS**).

P. Dunaj*, T. Okulik, B. Powałka, S. Berczyński, i M. Chodźko, „Experimental Investigations of Steel Welded Machine Tool Bodies Filled with Composite Material”, w *Advances in Manufacturing II*, B. Gapiński, M. Szostak, i V. Ivanov, Red., Cham: Springer International Publishing, 2019, s. 61–69. (**Scopus, WoS**).

W ramach przedstawionych prac wnioskodawca samodzielnie planował oraz prowadził badania doświadczalne, mając równocześnie główny wkład w zakresie powstania publikacji.

- (ii) opracowanie składowych metod modelowania i identyfikacji

P. Dunaj*, S. Berczyński, i S. Marczyński, „Numerical Studies on the Effectiveness of Optimization Algorithms to Identify the Parameters of Machine Tool Hybrid Body Structural Component Model”, w *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 40th Anniversary International Conference on Information Systems Architecture and Technology – ISAT 2019*, J. Świątek, L. Borzemski, i Z. Wilimowska, Red., Cham: Springer International Publishing, 2020, s. 51–61. (**Scopus, WoS**)

P. Dunaj*, M. Dolata, i S. Berczyński, „Model Order Reduction Adapted to Steel Beams Filled with a Composite Material”, w *Information Systems Architecture and Technology: Proceedings of 39th International Conference on Information Systems Architecture and Technology – ISAT 2018*, J. Świątek, L. Borzemski, i Z. Wilimowska, Red., Cham: Springer International Publishing, 2019, s. 3–13. (**Scopus, WoS**).

P. Dunaj*, B. Powalka, T. Okulik, S. Berczyński, i M. Chodźko, „Modelling steel beams filled with a composite material”, *Journal of Machine Construction and Maintenance. Problemy Eksploatacji*, 2018.

Wnioskodawca jest autorem metod przedstawionych w pracach, planował i realizował badania doświadczalne i modelowe, prowadził analizę wyników. Ma główny wkład w powstanie publikacji.

- (iii) publikacje powstałe po obronie doktoratu będące podsumowaniem rozprawy

P. Dunaj*, S. Berczyński, i M. Chodźko, „Modelling of a Steel-Polymer Concrete Machine Tool Frame Component”, w *Innovations*

Induced by Research in Technical Systems, M. Majewski i W. Kacalak, Red., Cham: Springer International Publishing, 2020, s. 13–24. (**Sopus, WoS**).

P. Dunaj*, S. Berczyński, i M. Chodźko, „Method of modeling steel-polymer concrete frames for machine tools”, *Composite Structures*, t. 242, s. 112197, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.112197>. (**IF 5,4; MEiN 140 pkt.**)

P. Dunaj*, S. Berczyński, M. Chodźko, i B. Niesterowicz, „Finite Element Modeling of the Dynamic Properties of Composite Steel–Polymer Concrete Beams”, *Materials*, t. 13, nr 7, 2020, doi: [10.3390/ma13071630](https://doi.org/10.3390/ma13071630). (**IF 3,6; MEiN 140 pkt.**)

Wnioskodawca jest autorem metod przedstawionych w pracach, planował i realizował badania doświadczalne i modelowe, prowadził analizę wyników; ma główny wkład w zakresie powstania publikacji.

- (iv) publikacje powstałe po obronie doktoratu będące rozwinięciem tematyki podejmowanej w rozprawie

B. Niesterowicz, **P. Dunaj**, i S. Berczyński, „Timoshenko beam model for vibration analysis of composite steel-polymer concrete box beams”, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, t. 58, nr 3, s. 799–810, 2020, doi: [10.15632/jtam-pl/122389](https://doi.org/10.15632/jtam-pl/122389). (**IF 0,9; MEiN 70 pkt.**)

Uwaga

Prace, których współautorką jest mgr inż. Beata Niesterowicz, kontynuowane były w ramach jej rozprawy doktorskiej, której wnioskodawca był promotorem pomocni-

B. Niesterowicz, T. Okulik, S. Berczyński, i **P. Dunaj**, „Finite Element Modelling of Thin-Walled Box Beams Partially Filled with Polymer Concrete”, w *Mechatronics—Trending Future Industries*, B. Powalka, A. Parus, M. Chodźko, i R. Szewczyk, Red., Cham: Springer International Publishing, 2022, s. 74–84. (**Scopus, WoS**).

Wnioskodawca sprawował nadzór merytoryczny nad prowadzonymi pracami, planował i realizował badania doświadczalne.

P. Dunaj*, K. Marchelek, S. Berczyński, i B. Mizrak, „Rigid Finite Element Method in Modeling Composite Steel-Polymer Concrete Machine Tool Frames”, *Materials*, t. 13, nr 14, 2020, doi: 10.3390/ma13143151. (**IF 3,6; MEiN 140 pkt.**).

Wnioskodawca jest autorem metody modelowania przedstawionej w artykule, planował i realizował badania doświadczalne i modelowe, prowadził analizę wyników; ma główny wkład w zakresie powstania publikacji.

Publikacje obejmujące modelowanie obrabiarek

- (i) publikacje obejmujące modelowanie elementów składowych obrabiarek

Uwaga

Wskazana praca obejmuje tematyką część rozprawy doktorskiej mgr. inż. Jana Tomaszewskiego, której wnioskodawca był promotorem pomocniczym.

J. Tomaszewski, **P. Dunaj***, B. Powalka, i M. Jasiewicz, „Orthotropic model of rolling bearing in modeling lathe spindle dynamics”, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, t. 60, nr 1, s. 17–31, 2022, doi: 10.15632/jtam-pl/143305. (**IF 0,7; MEiN 70 pkt.**).

Wnioskodawca jest autorem koncepcji modelowania węzłów łożyskowych z zastosowaniem materiału ortotropowego, prowadził nadzór merytoryczny nad pracami, zaplanował i zrealizował badania doświadczalne.

P. Dunaj*, S. Berczyński, P. Pawełko, Z. Grządziel, i M. Chodźko, „Static condensation in modeling roller guides with preload”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, t. 19, nr 4, s. 1072–1082, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2019.06.005>. (**IF 3,7; MEiN 140 pkt.**).

Wnioskodawca jest autorem koncepcji modelowania prowadnic liniowych przedstawionej w artykule. Zaplanował i przeprowadził badania modelowe; ma główny wkład w zakresie powstania publikacji.

- (ii) publikacje obejmujące modelowanie obrabiarek

P. Dunaj*, M. Dolata, B. Powalka, P. Pawełko, i S. Berczyński, „Design of an Ultra-Light Portable Machine Tool”, *IEEE Access*, t. 9, s. 43837–43844, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3066690. (**IF 3,5; MEiN 100 pkt.**)

P. Dunaj*, K. Marchelek, i M. Chodźko, „Application of the finite element method in the milling process stability diagnosis”, *Journal of Theoretical and Applied Mechanics*, t. 57, nr 2, s. 353–367, 2019, doi: 10.15632/jtam-pl/104589. (**IF 0,9; MEiN 70 pkt.**)

P. Dunaj*, S. Berczyński, i M. Dolata, „Modelling Machine Tool Rocking Vibrations Using Reduced Order Models”, w *Proceedings of the 14th International Scientific Conference: Computer Aided Engineering*, E. Rusiński i D. Pietrusiak, Red., Cham: Springer International Publishing, 2019, s. 183–190. (**Scopus**).

Wnioskodawca jest autorem metod przedstawionych w artykułach, planował i realizował badania doświadczalne i modelowe, prowadził analizę wyników; ma główny wkład w zakresie powstania publikacji.

(iii) publikacje obejmujące badania doświadczalne obrabiarek

P. Dunaj i M. Chodźko, „Shaping the dynamic properties of a machine tool using experimental modal analysis”, *Modelowanie Inżynierskie.*, t. 38, 2018.

P. Dunaj i M. Chodźko, „Experimental investigation on dynamic properties of turning machine”, *Advances in Manufacturing Science and Technology*, t. 41, nr 1, s. 21–29, 2017.

Wnioskodawca realizował badania doświadczalne oraz prowadził analizę wyników; ma główny wkład w zakresie powstania publikacji.

Pozostałe publikacje

(i) badania nad pasywnymi eliminatorami drgań wykonanymi w technologii przyrostowej

Uwaga

Wnioskodawca jest współautorem zgłoszenia patentowego P. 433645 Pasywny tłumik drgań i sposób wytwarzania pasywnego tłumika drgań będącego przedmiotem wskazanych publikacji.

Irska, G. Kramek, K. Miądlicki, **P. Dunaj**, S. Berczyński, i E. Piesowicz, „Towards Highly Efficient, Additively Manufactured Passive Vibration Eliminators for Mechanical Systems”, *Materials*, t. 16, nr 3, 2023, doi: 10.3390/ma16031250. (**IF 3,7; MEiN 140 pkt.**)

P. Dunaj*, S. Berczyński, K. Miądlicki, I. Irska, i B. Niesterowicz, „Increasing Damping of Thin-Walled Structures Using Additively Manufactured Vibration Eliminators”, *Materials*, t. 13, nr 9, 2020, doi: 10.3390/ma13092125. (**IF 3,6; MEiN 140 pkt.**)

Wnioskodawca jest autorem koncepcji pasywnych eliminatorów drgań wykonanych w technologii druku 3D, planował i realizował badania doświadczalne i modelowe, prowadził analizę wyników; ma główny wkład w zakresie powstania publikacji.

- (ii) badania obejmujące modelowanie i badania doświadczalne dotyczące problemów wyznaczania odchyłek geometrycznych wałów korbowych

K. Nozdrzykowski, Z. Grządziel, i **P. Dunaj***, „Determining geometrical deviations of crankshafts with limited detection possibilities due to support conditions”, *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, t. 189, s. 110430, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2021.110430>. (**IF 5,6; MEiN 200 pkt.**)

K. Nozdrzykowski, Z. Grządziel, i **P. Dunaj***, „Analysis of Contact Deformations in Support Systems Using Roller Prisms”, *Materials*, t. 14, nr 10, 2021, doi: 10.3390/ma14102644. (**IF 3,7; MEiN 140 pkt.**)

K. Nozdrzykowski, S. Adamczak, Z. Grządziel, i **P. Dunaj***, „The Effect of Deflections and Elastic Deformations on Geometrical Deviation and Shape Profile Measurements of Large Crankshafts with Uncontrolled Supports”, *Sensors*, t. 20, nr 19, 2020, doi: 10.3390/s20195714. (**IF 3,6, MEiN 100 pkt.**)

Wnioskodawca prowadził badania modelowe oraz analizę wyników; odpowiedzialny był za stronę redakcyjną publikacji oraz analizę literatury.

- (iii) badania obejmujące analizę właściwości dynamicznych żurawi przeładunkowych

M. Chodźko i **P. Dunaj**, „Experimental investigation on dynamic properties of loader crane”, *Machine Dynamics Research*, t. 40, nr 2, 2017.

B. Niesterowicz, P. Dunaj, i K. Marchelek, „Modal analysis of loader crane with variable configuration”, *Journal of Machine Construction and Maintenance. Problemy Eksploatacji*, 2019.

P. Dunaj*, B. Niesterowicz, i B. Szymczak, „Loader Crane Modal Analysis Using Simplified Hydraulic Actuator Model”, w *Advances in Manufacturing II*, B. Gapiński, M. Szostak, i V. Ivanov, Red., Cham: Springer International Publishing, 2019, s. 70–80. (**Scopus, WoS**).

Wnioskodawca planował i prowadził badania doświadczalne oraz analizę wyników; odpowiedzialny był za stronę redakcyjną publikacji.

- (iv) pozostałe badania

Uwaga

Wskazana praca obejmuje tematyką część rozprawy doktorskiej mgr. Arkadiusza Charuka, której wnioskodawca jest promotorem pomocniczym.

Charuk i **P. Dunaj***, „Modal Analysis of Honeycomb Core Sandwich Panel Using Finite Element Method”, w *Mechatronics—Trending Future Industries*, B. Powalka, A. Parus, M. Chodźko, i R. Szewczyk, Red., Cham: Springer International Publishing, 2022, s. 66–73. (**Scopus, WoS**).

S. Berczyński, **P. Dunaj**, i Z. Grządziel, „Straight and Bent Bars Buckling Considered as the Axial Displacement of One Bar End”, *Multidisciplinary Aspects of Production Engineering*, t. 3, nr 1, s. 57–70, 2020.

Wnioskodawca planował i prowadził badania doświadczalne oraz analizę wyników; odpowiedzialny był za stronę redakcyjną publikacji.

Literatura

- [1] W. Zhao, A. Gupta, C. D. Regan, J. Miglani, R. K. Kapania, i P. J. Seiler, „Component data assisted finite element model updating of composite flying-wing aircraft using multi-level optimization”, *Aerosp. Sci. Technol.*, t. 95, s. 105486, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ast.2019.105486>.
- [2] S. Weng, Y. Xia, X.-Q. Zhou, Y.-L. Xu, i H.-P. Zhu, „Inverse substructure method for model updating of structures”, *J. Sound Vib.*, t. 331, nr 25, s. 5449–5468, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2012.07.011>.
- [3] D. Augustyn, U. Smolka, U. T. Tygesen, M. D. Ulriksen, i J. D. Sørensen, „Data-driven model updating of an offshore wind jacket substructure”, *Appl. Ocean Res.*, t. 104, s. 102366, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2020.102366>.
- [4] W. Tian, S. Weng, i Y. Xia, „Model updating of nonlinear structures using substructuring method”, *J. Sound Vib.*, t. 521, s. 116719, 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2021.116719>.
- [5] J. Malveiro, D. Ribeiro, C. Sousa, i R. Calçada, „Model updating of a dynamic model of a composite steel-concrete railway viaduct based on experimental tests”, *Eng. Struct.*, t. 164, s. 40–52, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.eng-struct.2018.02.057>.
- [6] F. Adel, S. Shokrollahi, M. Jamal-Omidi, i H. Ahmadian, „A model updating method for hybrid composite/aluminum bolted joints using modal test data”, *J. Sound Vib.*, t. 396, s. 172–185, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.02.035>.
- [7] A. Aborehab, M. Kamel, A. F. Nemnem, i M. Kassem, „Finite element model updating of a satellite honeycomb sandwich plate in structural dynamics”, *Int. J. Space Struct.*, t. 36, nr 2, s. 105–116, 2021, doi: [10.1177/09560599211001683](https://doi.org/10.1177/09560599211001683).
- [8] R. R. Craig Jr. i M. C. C. Bampton, „Coupling of substructures for dynamic analysis”, *AIAA J.*, t. 6, nr 7, s. 678–685, 1965.

- [9] R. J. Guyan, „Reduction of stiffness and mass matrices”, *AIAA Journal*, t. 3, nr 2, s. 380, 1965. doi: 10.2514/3.2874.
- [10] D. C. Kammer, „Test-analysis model development using an exact modal reduction”, *Int. J. Anal. Exp. Modal Anal.*, t. 2, nr 4, s. 174–179, 1987.
- [11] P. Dunaj, M. Dolata, i S. Berczyński, „Model order reduction adapted to steel beams filled with a composite material”, *Advances in Intelligent Systems and Computing*, t. 853, s. 3–13, 2019. doi: 10.1007/978-3-319-99996-8_1.
- [12] D. de Klerk, D. J. Rixen, i S. N. Voormeeren, „General Framework for Dynamic Substructuring: History, Review and Classification of Techniques”, *AIAA J.*, t. 46, nr 5, s. 1169–1181, 2008, doi: 10.2514/1.33274.
- [13] S. Berczyński i P. Gutowski, „Identification of the dynamic models of machine tool supporting systems. Part I: An algorithm of the method”, *JVC/Journal of Vibration and Control*, t. 12, nr 3, s. 257–277, 2006. doi: 10.1177/1077546306062769.
- [14] P. Dunaj, S. Berczyński, M. Chodźko, i B. Niesterowicz, „Finite Element Modeling of the Dynamic Properties of Composite Steel–Polymer Concrete Beams”, *Materials*, t. 13, nr 7, 2020, doi: 10.3390/ma13071630.
- [15] B. Niesterowicz, P. Dunaj, i S. Berczyński, „Timoshenko beam model for vibration analysis of composite steel-polymer concrete box beams”, *J. Theor. Appl. Mech.*, t. 58, nr 3, s. 799–810, 2020, doi: 10.15632/jtam-pl/122389.
- [16] B. Niesterowicz, T. Okulik, S. Berczyński, i P. Dunaj, „Finite Element Modelling of Thin-Walled Box Beams Partially Filled with Polymer Concrete”, w *Mechatronics—Trending Future Industries*, B. Powalka, A. Parus, M. Chodźko, i R. Szewczyk, Red., Cham: Springer International Publishing, 2022, s. 74–84.
- [17] B. Peeters, H. Van der Auweraer, P. Guillaume, i J. Leuridan, „The PolyMAX frequency-domain method: a new standard for modal parameter estimation?”, *Shock Vib.*, t. 11, nr 3–4, s. 395–409, 2004.
- [18] M. Behtaj, H. Babaei, i T. M. Mostofi, „Repeated uniform blast loading on welded mild steel rectangular plates”, *Thin-Walled Struct.*, t. 178, s. 109523, wrz. 2022, doi: 10.1016/j.tws.2022.109523.
- [19] J. Cui i in., „Increase in Mechanical Properties and Damping Capacity of a Cast Mn-Cu Damping Alloy Welded Joint by Pulsed Current TIG

- Welding”, *J. Mater. Eng. Perform.*, t. 31, nr 12, s. 9596–9605, grudz. 2022, doi: 10.1007/s11665-022-07001-1.
- [20] B. Singh i B. K. Nanda, „Dynamic analysis of damping in layered and welded beams”, *Eng. Struct.*, t. 48, s. 10–20, mar. 2013, doi: 10.1016/j.eng-struct.2012.09.037.
- [21] C. Zhang, J. Sun, Y. Li, i D. Deng, „Numerical simulation of residual stress of butt-welded joint involved in complex column-beam welded structure”, *J. Manuf. Process.*, t. 83, s. 458–470, lis. 2022, doi: 10.1016/j.jmapro.2022.09.010.
- [22] A. Adamkowski, M. Lewandowski, i S. Lewandowski, „Fatigue life analysis of hydropower pipelines using the analytical model of stress concentration in welded joints with angular distortions and considering the influence of water hammer damping”, *Thin-Walled Struct.*, t. 159, s. 107350, luty 2021, doi: 10.1016/j.tws.2020.107350.
- [23] K. Shrivastava, K. Vijayan, i V. Arora, „Identification of stiffness and damping of the weld in stiffened plates using model updating”, *Mar. Struct.*, t. 82, s. 103140, mar. 2022, doi: 10.1016/j.marstruc.2021.103140.
- [24] K. Szipka, T. Laspas, i A. Archenti, „Measurement and analysis of machine tool errors under quasi-static and loaded conditions”, *Precis. Eng.*, t. 51, s. 59–67, sty. 2018, doi: 10.1016/j.precisioneng.2017.07.011.
- [25] T. Laspas, N. Theissen, i A. Archenti, „Novel methodology for the measurement and identification for quasi-static stiffness of five-axis machine tools”, *Precis. Eng.*, t. 65, s. 164–170, wrz. 2020, doi: 10.1016/j.precisioneng.2020.06.006.
- [26] H.-C. Möhring, C. Brecher, E. Abele, J. Fleischer, i F. Bleicher, „Materials in machine tool structures”, *CIRP Ann.*, t. 64, nr 2, s. 725–748, sty. 2015, doi: 10.1016/j.cirp.2015.05.005.
- [27] Y. Chang *i in.*, „Effect of joint interfacial contact stiffness on structural dynamics of ultra-precision machine tool”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, t. 158, s. 103609, lis. 2020, doi: 10.1016/j.ijmactools.2020.103609.
- [28] N. Kim, H. Kim, i W. Lee, „Hardware-in-the-loop simulation for estimation of position control performance of machine tool feed drive”, *Precis. Eng.*, t. 60, s. 587–593, lis. 2019, doi: 10.1016/j.precisioneng.2019.08.010.

- [29] B. Peukert, M. Saoji, i E. Uhlmann, „An Evaluation of Building Sets Designed for Modular Machine Tool Structures to Support Sustainable Manufacturing”, *12th Glob. Conf. Sustain. Manuf. – Emerg. Potentials*, t. 26, s. 612–617, sty. 2015, doi: 10.1016/j.procir.2014.07.175.
- [30] Y. Wang, D. Wang, S. Zhang, Z. Tang, L. Wang, i Y. Liu, „Design and development of a five-axis machine tool with high accuracy, stiffness and efficiency for aero-engine casing manufacturing”, *Chin. J. Aeronaut.*, t. 35, nr 4, s. 485–496, kwi. 2022, doi: 10.1016/j.cja.2021.04.001.
- [31] Y. Xia *i in.*, „Development of a toolholder with high dynamic stiffness for mitigating chatter and improving machining efficiency in face milling”, *Mech. Syst. Signal Process.*, t. 145, s. 106928, lis. 2020, doi: 10.1016/j.ymssp.2020.106928.
- [32] Z. Yang, H. Chen, i T. Yu, „Effects of rolling bearing configuration on stiffness of machine tool spindle”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part C J. Mech. Eng. Sci.*, t. 232, nr 5, s. 775–785, mar. 2018, doi: 10.1177/0954406217693659.
- [33] D. Kono, S. Nishio, I. Yamaji, i A. Matsubara, „A method for stiffness tuning of machine tool supports considering contact stiffness”, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, t. 90, s. 50–59, mar. 2015, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2015.01.001.
- [34] D. Olvera, L. N. L. de Lacalle, F. I. Compeán, A. Fz-Valdivielso, A. Lamikiz, i F. J. Campa, „Analysis of the tool tip radial stiffness of turn-milling centers”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, t. 60, nr 9, s. 883–891, cze. 2012, doi: 10.1007/s00170-011-3645-3.
- [35] J. Wang *i in.*, „A CAD/CAE-integrated structural design framework for machine tools”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, t. 91, nr 1, s. 545–568, lip. 2017, doi: 10.1007/s00170-016-9721-y.
- [36] A. Archenti i M. Nicolescu, „A top-down equivalent stiffness approach for prediction of deviation sources in machine tool joints”, *CIRP Ann.*, t. 66, nr 1, s. 487–490, sty. 2017, doi: 10.1016/j.cirp.2017.04.066.
- [37] X. Gao, B. Li, J. Hong, i J. Guo, „Stiffness modeling of machine tools based on machining space analysis”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, t. 86, nr 5, s. 2093–2106, wrz. 2016, doi: 10.1007/s00170-015-8336-z.
- [38] Y. Shi, X. Zhao, H. Zhang, Y. Nie, i D. Zhang, „A new top-down design method for the stiffness of precision machine tools”, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, t. 83, nr 9, s. 1887–1904, kwi. 2016, doi: 10.1007/s00170-015-7705-y.

- [39] H.-C. Möhring, „Composites in Production Machines”, *1st CIRP Conf. Compos. Mater. Parts Manuf. CIRP CCMPM 2017*, t. 66, s. 2–9, sty. 2017, doi: 10.1016/j.procir.2017.04.013.
- [40] S.-K. Cho, H.-J. Kim, i S.-H. Chang, „The application of polymer composites to the table-top machine tool components for higher stiffness and reduced weight”, *Compos. Struct.*, t. 93, nr 2, s. 492–501, sty. 2011, doi: 10.1016/j.compstruct.2010.08.030.
- [41] J. D. Suh i D. G. Lee, „Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high-speed CNC milling machine”, *Int. J. Mech. Mater. Des.*, t. 4, nr 2, s. 113–121, cze. 2008, doi: 10.1007/s10999-007-9033-3.
- [42] P. R. Venugopal *i in.*, „Design and analysis of epoxy granite vertical machining centre base for improved static and dynamic characteristics”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Mater. Des. Appl.*, t. 234, nr 3, s. 481–495, mar. 2020, doi: 10.1177/1464420719890892.
- [43] P. Dunaj, S. Berczyński, i M. Chodźko, „Method of modeling steel-polymer concrete frames for machine tools”, *Compos. Struct.*, t. 242, s. 112197, cze. 2020, doi: 10.1016/j.compstruct.2020.112197.
- [44] P. Dunaj, S. Berczyński, P. Pawełko, Z. Grządziel, i M. Chodźko, „Static condensation in modeling roller guides with preload”, *Arch. Civ. Mech. Eng.*, t. 19, nr 4, s. 1072–1082, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.acme.2019.06.005>.
- [45] P. Dunaj, K. Marchelek, i M. Chodźko, „Application of the finite element method in the milling process stability diagnosis”, *J. Theor. Appl. Mech.*, t. 57, nr 2, s. 353–367, 2019, doi: 10.15632/jtam-pl/104589.
- [46] Y. Cao i Y. Altintas, „A General Method for the Modeling of Spindle-Bearing Systems”, *J. Mech. Des.*, t. 126, nr 6, s. 1089–1104, luty 2005, doi: 10.1115/1.1802311.
- [47] R. Grzejda, „Finite element modeling of the contact of elements preloaded with a bolt and externally loaded with any force”, *J. Comput. Appl. Math.*, t. 393, s. 113534, wrz. 2021, doi: 10.1016/j.cam.2021.113534.
- [48] P. Majda i J. Jastrzębska, „Measurement uncertainty of generalized stiffness of machine tools”, *Measurement*, t. 170, s. 108692, sty. 2021, doi: 10.1016/j.measurement.2020.108692.

- [49] S. Ahn, S. Kwon, Y.-T. Hwang, H.-I. Koh, H.-S. Kim, i J. Park, „Complex structured polymer concrete sleeper for rolling noise reduction of high-speed train system”, *Compos. Struct.*, t. 223, s. 110944, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.110944>.
- [50] H. A. Bulut i R. Şahin, „A study on mechanical properties of polymer concrete containing electronic plastic waste”, *Compos. Struct.*, t. 178, s. 50–62, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.06.058>.
- [51] W. Ferdous *i in.*, „Optimal design for epoxy polymer concrete based on mechanical properties and durability aspects”, *Constr. Build. Mater.*, t. 232, s. 117229, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117229>.
- [52] J. F. Unger i S. Eckardt, „Multiscale modeling of concrete”, *Arch. Comput. Methods Eng.*, t. 18, nr 3, s. 341, 2011.
- [53] L. Jin, H. Xia, X. Jiang, i X. Du, „Size effect on shear failure of CFRP-strengthened concrete beams without web reinforcement: Meso-scale simulation and formulation”, *Compos. Struct.*, t. 236, s. 111895, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111895>.
- [54] D. Ma *i in.*, „Mesoscale modeling of epoxy polymer concrete under tension or bending”, *Compos. Struct.*, t. 256, s. 113079.
- [55] L. Song, H. Ma, i B. Yu, „A topological generation method for the mesoscopic model of composite material with star solid reinforced particles and its ITZ control”, *Compos. Struct.*, t. 225, s. 111116, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111116>.
- [56] R. Zhou, Z. Song, i Y. Lu, „3D mesoscale finite element modelling of concrete”, *Comput. Struct.*, t. 192, s. 96–113, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2017.07.009>.
- [57] W. Qiu, T. Ueda, S. Fu, Y. Han, J. Wang, i J. Ye, „Meso-scale computational modeling of the fracture of concrete with complex shaped aggregates under the self-restraint stress”, *Compos. Struct.*, t. 303, s. 116267, sty. 2023, doi: [10.1016/j.compstruct.2022.116267](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116267).
- [58] H. Li, Y. Li, C. Jin, J. Liu, Y. Liu, i J. Mu, „Meso-scale modelling of the effect of coarse aggregate properties on the creep of concrete”, *J. Build. Eng.*, t. 54, s. 104660, sie. 2022, doi: [10.1016/j.job.2022.104660](https://doi.org/10.1016/j.job.2022.104660).

- [59] Q. Luo, W. Wang, Z. Sun, B. Wang, i S. Xu, „Statistical analysis of mesoscopic concrete with random elastic modulus”, *J. Build. Eng.*, t. 33, s. 101850, sty. 2021, doi: 10.1016/j.job.2020.101850.
- [60] M. H. Miguélez, L. Rubio, J. A. Loya, i J. Fernández-Sáez, „Improvement of chatter stability in boring operations with passive vibration absorbers”, *Int. J. Mech. Sci.*, t. 52, nr 10, s. 1376–1384, paź. 2010, doi: 10.1016/j.ijmecsci.2010.07.003.
- [61] Y. Mohammadi, M. Azvar, i E. Budak, „Suppressing vibration modes of spindle-holder-tool assembly through FRF modification for enhanced chatter stability”, *CIRP Ann.*, t. 67, nr 1, s. 397–400, sty. 2018, doi: 10.1016/j.cirp.2018.03.003.
- [62] H. Ma, J. Wu, L. Yang, i Z. Xiong, „Active chatter suppression with displacement-only measurement in turning process”, *J. Sound Vib.*, t. 401, s. 255–267, sie. 2017, doi: 10.1016/j.jsv.2017.05.009.
- [63] X. Lu, F. Chen, i Y. Altintas, „Magnetic actuator for active damping of boring bars”, *CIRP Ann.*, t. 63, nr 1, s. 369–372, sty. 2014, doi: 10.1016/j.cirp.2014.03.127.
- [64] B. Powalka i K. Jemielniak, „Stability analysis in milling of flexible parts based on operational modal analysis”, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, t. 9, s. 125–135, maj 2015, doi: 10.1016/j.cirpj.2014.11.003.
- [65] N. Mahendrakumar, P. R. Thyla, P. V. Mohanram, C. Raja Kumaran, i J. Jayachandresh, „Study on static and dynamic characteristics of nettle–polyester composite micro lathe bed”, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part J. Mater. Des. Appl.*, t. 233, nr 2, s. 141–155, 2019.
- [66] H.-C. Möhring, „Composites in production machines”, *Procedia CIRP*, t. 66, s. 2–9, 2017.
- [67] H.-C. Möhring, C. Brecher, E. Abele, J. Fleischer, i F. Bleicher, „Materials in machine tool structures”, *CIRP Ann.*, t. 64, nr 2, s. 725–748, 2015.
- [68] S. Murugan i P. R. Thyla, „Mechanical and dynamic properties of alternate materials for machine tool structures: A review”, *J. Reinf. Plast. Compos.*, t. 37, nr 24, s. 1456–1467, 2018.
- [69] S. Rangasamy, K. Loganathan, i A. Natesan, „Experimental investigation and numerical analysis of the dynamic characteristics of a laminated hybrid composite bed”, *Polym. Compos.*, t. 38, nr 1, s. 20–26, 2017.

- [70] J. Do Suh, „Thermal characteristics of composite sandwich structures for machine tool moving body applications”, *Compos. Struct.*, t. 66, nr 1–4, s. 429–438, 2004.
- [71] J. Do Suh, H. S. Kim, i J. M. Kim, „Design and manufacture of composite high speed machine tool structures”, *Compos. Sci. Technol.*, t. 64, nr 10–11, s. 1523–1530, 2004.
- [72] H. Y. Hwang i H. G. Lee, „Clamping effects on the dynamic characteristics of composite machine tool structures”, *Compos. Struct.*, t. 66, nr 1–4, s. 399–407, 2004.
- [73] D. I. Kim, S. C. Jung, J. E. Lee, i S. H. Chang, „Parametric study on design of composite–foam–resin concrete sandwich structures for precision machine tool structures”, *Compos. Struct.*, t. 75, nr 1–4, s. 408–414, 2006.
- [74] L. Kroll, P. Blau, M. Wabner, U. Frieß, J. Eulitz, i M. Klärner, „Lightweight components for energy-efficient machine tools”, *CIRP J. Manuf. Sci. Technol.*, t. 4, nr 2, s. 148–160, 2011.
- [75] V. Kulisek, M. Janota, M. Ruzicka, i P. Vrba, „Application of fibre composites in a spindle ram design”, *J. Mach. Eng.*, t. 13, nr 1, s. 7–23, 2013.
- [76] J. D. Suh, D. G. Lee, i R. Kegg, „Composite machine tool structures for high speed milling machines”, *CIRP Ann.*, t. 51, nr 1, s. 285–288, 2002.
- [77] S.-K. Cho, H.-J. Kim, i S.-H. Chang, „The application of polymer composites to the table-top machine tool components for higher stiffness and reduced weight”, *Compos. Struct.*, t. 93, nr 2, s. 492–501, 2011.
- [78] J. D. Suh i D. G. Lee, „Design and manufacture of hybrid polymer concrete bed for high-speed CNC milling machine”, *Int. J. Mech. Mater. Des.*, t. 4, nr 2, s. 113–121, 2008.
- [79] H. Sonawane i T. Subramanian, „Improved Dynamic Characteristics for Machine Tools Structure Using Filler Materials”, *Procedia CIRP*, t. 58, s. 399–404, 2017.
- [80] H. Haddad i M. Al Kobaisi, „Optimization of the polymer concrete used for manufacturing bases for precision tool machines”, *Compos. Part B Eng.*, t. 43, nr 8, s. 3061–3068, grudz. 2012, doi: 10.1016/j.compositesb.2012.05.003.

- [81] S. Orak, „Investigation of vibration damping on polymer concrete with polyester resin”, *Cem. Concr. Res.*, t. 30, nr 2, s. 171–174, luty 2000, doi: 10.1016/S0008-8846(99)00225-2.
- [82] H. Haddad i M. Al Kobaisi, „Influence of moisture content on the thermal and mechanical properties and curing behavior of polymeric matrix and polymer concrete composite”, *Mater. Des.*, t. 49, s. 850–856, sie. 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2013.01.075.
- [83] E. Budak i Y. Altintas, „Analytical Prediction of Chatter Stability in Milling—Part I: General Formulation”, *J. Dyn. Syst. Meas. Control*, t. 120, nr 1, s. 22–30, mar. 1998, doi: 10.1115/1.2801317.
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.
- 5.3. Staż badawczy w Królewskim Instytucie Technicznym (KTH) w Sztokholmie (wg QS Quacquarelli Symonds uczelnia sklasyfikowana w rankingu ogólnym na 73 miejscu na świecie i na 23 miejscu w dyscyplinie inżynieria mechaniczna). Okres trwania stażu 18 marca – 6 maja (7 tygodni). Staż badawczy realizowany był na Wydziale Inżynierii Produkcji (IPU) w zespole Inżynierii Precyzyjnej i Metrologii (PEM). Opiekunem stażu był z prof. Andreas Archenti, dyrektor Centrum Projektowania i Zarządzania Systemami Wytwarzania oraz kierownik katedry Wytwarzania i Systemów Metrologicznych (ang. *Manufacturing and Metrology Systems*, MMS), w której skład wchodzi PEM. Profesor Archenti jest członkiem stowarzyszonym Międzynarodowej Akademii Inżynierii Produkcji (fr. *College International pour la Recherche en Productique*, CIRP) oraz w jej ramach przewodniczy Komitetowi Naukowo-Technicznemu ds. Inżynierii Precyzyjnej i Metrologii (ang. *Scientific Technical Committee Precision Engineering and Metrology*, STC-P). Ponadto profesor Andreas Archenti jest wiceprzewodniczącym Europejskiego Towarzystwa Inżynierii Precyzyjnej i Nanotechnologii (ang. *European Society for Precision Engineering and Nanotechnology*, Euspen) oraz członkiem zarządu Międzynarodowego Towarzystwa Nanowytwarzania (ang. *The International Society for*

Nanomanufacturing, ISNM). Profesor Archenti jest również współredaktorem m.in. czasopisma *Precision Engineering* (IF 3.6, MEiN 200 pkt.).

W ramach stażu opracowano metodykę modelowania, interfejsu obrabiarka-fundament, uwzględniając ponadto interakcję fundamentu z podłożem. Podejmowany temat stanowił rozwinięcie aspektów modelowania właściwości dynamicznych obrabiarek poruszanych w dotychczasowej pracy. Bezpośrednią motywacją była potrzeba rozwiązania problemu niewystarczającej dokładności modelowania niskoczęstotliwościowych postaci drgań obrabiarki (ang. *rocking vibrations*), przedstawionego w pracy [B]. Opracowaną metodykę poddano doświadczalnej weryfikacji i walidacji. Następnie dla zwalidowanych modeli przeprowadzono analizę wrażliwości oraz analizy wariantowe oraz parametryczne, określające wpływ parametrów interfejsu obrabiarka-fundament na właściwości eksploatacyjne maszyny.

Wyniki prac zreferowano na konferencji *Konstelacja Szkół Naukowych w Inżynierii Mechanicznej 2023* mającej miejsce w Dźwirzynie w dniach 16 – 18 października 2023; tytuł referatu: „Problems related with modeling the dynamic interactions between machine tools and their foundations”.

Ponadto zgłoszono referat oraz artykuł pt. „On vibration transmissibility in a machine tool-support-foundation-soil system” na konferencję *Euspen’s 24th International Conference & Exhibition* odbywającą się w Dublinie w Irlandii w dniach 10 – 14 czerwca 2024. Przygotowywana jest również publikacja będąca rozwinięciem tematu zgłoszonego na tę konferencję.

Planuje się rozwijanie współpracy oraz kolejne wyjazdy badawcze – złożony został wniosek o sfinansowanie stypendium na wyjazd badawczy w ramach Programu im. Mieczysława Bekkera Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej (sygnatura wniosku BPN/BEK/2023/1/00340).

- 5.4. Współpraca z zespołem dr. Jaspreeta Dhupia’i z University of Auckland w Nowej Zelandii w ramach realizacji projektu badawczego INNO-GLOBO/1/ITWA/20/2021 „Inteligentna tokarka z wrzecionem adaptro-nicznym” finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju. Współpraca obejmuje modelowanie uszkodzeń łożysk,

monitorowanie stanu wrzeciona tokarskiego, opracowanie algorytmów wykrywania uszkodzeń oraz konserwacji predyktywnej.

- 5.5. Współpraca z Politechniką Morską w Szczecinie z zespołem prof. dr hab. inż. Katarzyny Gawdzińskiej z obejmująca modelowanie i badania doświadczalne właściwości dynamicznych oraz przewodności cieplnej kompozytów przekładkowych z rdzeniem wykonanym z piany aluminiowej. Współpraca realizowana w ramach projektu Inkubator innowacyjności 4.0 – Minigrant nr 1/CIAM/202 „Nowatorskie stanowisko pomiaru przewodności cieplnej materiałów niejednorodnych, ze szczególnym uwzględnieniem sandwicha z aluminiowych pian kompozytowych,„. Projekt finansowany przez konsorcjum MareMed w składzie: Pomorski Uniwersytet Medyczny w Szczecinie oraz Centrum Innowacji Akademii Morskiej w Szczecinie spółka z o.o. (obecnie InnoPM Sp. z o.o.) – Załącznik W.9.
- 5.6. Współpraca z Politechniką Morską w Szczecinie (dr hab. inż. Krzysztof Nozdrzykowski, prof. PM, oraz dr inż. Zenon Grządziel) obejmująca modelowanie i badania doświadczalne dotyczące problemów wyznaczania odchyłek geometrycznych wałów korbowych (publikacje z pozycji 4.3, 4.7 oraz 4.9 z punktu II wykazu osiągnięć naukowych). Współpraca realizowana w ramach pracy badawczej 1/S/KPBMIM/21 „Poprawa efektywności funkcjonowania systemów technicznych poprzez zmianę ich struktury i wykorzystanie nowoczesnych materiałów” finansowanej przez Ministerstwo Edukacji i Nauki.
- 5.7. Współpraca Berkay'em Mizrakiem z Yildiz Technical University w Turcji, obejmująca modelowanie właściwości dynamicznych stalowo-polimerowych korpusów maszyn technologicznych z zastosowaniem metody sztywnych elementów skończonych (publikacja z pozycji 4.10 z punktu II wykazu osiągnięć naukowych). Współpraca realizowana w ramach programu Erasmus.
- 5.8. Współpraca z Pomorskim Uniwersytetem Medycznym w Szczecinie, obejmująca realizację projektów badawczo-rozwojowych w ramach konkursu grantowego „Odpowiedzialny społecznie Proto_lab” realizowanego w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Zachodniopomorskiego 2014-2020, Oś Priorytetowa I: Gospodarka, Innowacje, Nowoczesne Technologie, Działanie 1.18 Tworzenie i rozbudowa regionalnego

systemu innowacji (pozycje 9.4, 9.6, 9.9 z punktu II wykazu osiągnięć naukowych).

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Osiągnięcia dydaktyczne

Promotor pomocniczy w przewodach doktorskich (3 przewody):

- 6.3. Jan Tomaszewski, „Projekt i budowa inteligentnego wrzeciona tokarskiego”, doktorat wdrożeniowy realizowany z Andrychowską Fabryką Maszyn DEFUM S.A., promotor: prof. dr hab. inż. Bartosz Powąłka. Recenzenci: dr hab. inż. Szymon Wojciechowski, prof. PP (Politechnika Poznańska), dr hab. inż. Sławomir Kciuk, prof. PŚ (Politechnika Śląska) oraz dr hab. inż. Piotr Niesłony (Politechnika Opolska). Rozprawa obroniona z wyróżnieniem dn. 23.10.2023 r.
- 6.4. Beata Niesterowicz, „Modelowanie belek stalowo polimerobetonowych z zastosowaniem modeli ciągłych”, promotor: prof. dr hab. inż. Stefan Berczyński. Recenzenci: dr hab. inż. Krzysztof Mendrok, prof. AGH. (Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie), dr hab. inż. Marek Galewski, prof. uczelni (Politechnika Gdańska). Rozprawa po pozytywnych recenzjach, planowana data obrony: 17.11.2023 r.
- 6.5. Arkadiusz Charuk, „Modelowanie właściwości dynamicznych paneli strukturalnych przeznaczonych do produkcji mebli dla jednostek pływających przy zastosowaniu metody elementów skończonych”, doktorat wdrożeniowy realizowany z Morska Stocznia Remontowa „Gryfia” S.A, promotor: dr hab. inż. Piotr Pawełko, prof. ZUT. Planowana data obrony: 3. kwartał 2024 r.

Promotor prac magisterskich (10 prac):

- 6.6. Małgorzata Budna, „Projekt i analiza wytrzymałościowa przenośnika pionowego”, 2024 r. (praca w realizacji).
- 6.7. Alicja Zubrewicz, „Analiza właściwości dynamicznych kompozytu przekładkowego z rdzeniem wykonanym z korka”, 2024 r. (praca w realizacji).
- 6.5 Mateusz Warakomski, „Projekt i analiza wytrzymałościowa podpory jezdnej do obróbki rur gabarytowych”, 2022 r.

- 6.6. Paweł Wiśniewski, „Projekt i analiza wytrzymałościowa części mechanicznej autonomicznego inspekcyjnego pojazdu rolniczego”, 2022 r.
- 6.7. Dominik Kamiński, „Projekt i analiza wytrzymałościowa efektora aparatu serologicznego”, 2022 r.
- 6.8. Szymon Marcinkowski, „Projekt i analiza wytrzymałościowa wspornika uniwersalnego do montażu kabli światłowodowych”, 2022 r.
- 6.9. Aleksandra Ogórska, „Projekt i analiza wytrzymałościowa rolatora dla osób starszych”, 2022 r.
- 6.10. Stanisław Agaciak, „Wykrywanie uszkodzeń w belkach stalowo-polimero-betonowych z zastosowaniem metody elementów skończonych”, 2021 r.
- 6.11. Dawid Jeleński, „Analiza wpływu sposobu modelowania połączeń śrubowych na odwzorowanie właściwości dynamicznych złożonych konstrukcji skręcanych”, 2020 r.
- 6.12. Sebastian Sobczak, „Analiza właściwości statycznych oraz dynamicznych drukarko-frezarki”, 2020 r.

Promotor prac inżynierskich (8 prac):

- 6.13. Kacper Smacha, „Projekt i analiza wytrzymałościowa wycinarki wodnej”, 2024 r. (praca w realizacji).
- 6.14. Krzysztof Wąsik, „Modelowanie właściwości dynamicznych kompozytów przekładkowych z rdzeniem z piany aluminiowej”, 2023 r.
- 6.15. Alicja Zubrewicz, „Projekt i analiza właściwości dynamicznych belki poprzecznej wycinarki laserowej”, 2023 r.
- 6.16. Tomasz Kozłowski, „Projekt konstrukcji ramy kontenera hakowego”, 2022 r.
- 6.17. Wojciech Bałut, „Projekt i obliczenia wytrzymałościowe zderzaka samochodu terenowego”, 2022 r.
- 6.18. Karolina Zielińska, „Modelowanie właściwości dynamicznych wrzeciona tokarskiego z zastosowaniem metody elementów skończonych”, 2021 r.
- 6.19. Paweł Wiśniewski, „Projekt i obliczenia wytrzymałościowe wózka do transportu drewna”, 2021 r.
- 6.20. Magdalena Śmigielska, „Opracowanie modelu połączenia spawanego z użyciem metody elementów skończonych”, 2020 r.

Prowadzone przedmioty:

Studia trzeciego stopnia:

- 6.21. Dynamika maszyn (wykłady i projekty, studia prowadzone w Szkole Doktorskiej w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie).
- 6.22. Analizy konstrukcji w projektowaniu maszyn (wykłady i projekty, studia prowadzone w Szkole Doktorskiej w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie).

Studia drugiego stopnia:

- 6.23. Modelowanie w projektowaniu maszyn i procesów (wykłady i laboratoria, studia stacjonarne i niestacjonarne).
- 6.24. Metody optymalizacji (wykłady i laboratoria, studia stacjonarne i niestacjonarne).
- 6.25. Dynamika układów mechatronicznych (wykłady i ćwiczenia audytoryjne, studia stacjonarne).
- 6.26. Doświadczalna identyfikacja własności układów mechatronicznych (wykłady i projekty, studia stacjonarne).

Studia pierwszego stopnia:

- 6.27. Dynamika układów mechanicznych (ćwiczenia audytoryjne i laboratoria, studia stacjonarne).
- 6.28. Badania doświadczalne urządzeń mechatronicznych (ćwiczenia audytoryjne i laboratoria, studia stacjonarne).

Osiągnięcia organizacyjne:

- 6.29. Uruchomienie nowych kierunków studiów: Mechatronika S2 (stacjonarne drugiego stopnia) i Mechatronika N2 (niestacjonarne drugiego stopnia) prowadzonych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki.
- 6.30. Członek komisji programowej kierunków studiów: Mechanika i Budowa Maszyn i Mechatronika.
- 6.31. Organizator zawodów studenckich WIMiM RC.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.
- 7.1. Współpraca z Andrychowską Fabryką Maszyn DEFUM SA obejmująca badania modelowe i doświadczalne obrabiarek (poz. 2.1., 4.2., 4.4, 5.2. z punktu III wykazu osiągnięć naukowych) – Załącznik W.1.
 - 7.2. Tokarka pionowa lekkiej konstrukcji wdrożona do produkcji detali krótkich typu tarcza i tuleja z kołnierzem w Andrychowskiej Fabryce Maszyn DEFUM S.A. nagrodzona została II miejscem w Konkursie na Najlepsze Osiągnięcie Techniczne 2019 roku – XIII edycja. Konkurs organizowany był przez Zarząd Główny Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich (SIMP) – Załącznik N.2.
 - 7.3. Hybrydowe centrum addytywno-obróbcze Protoplast Maker 4.0 nagrodzone zostało I miejscem w Konkursie na Najlepsze Osiągnięcie Techniczne 2022 roku – XVI edycja. Konkurs organizowany był przez Zarząd Główny Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich (SIMP) – Załącznik N.1.
 - 7.4. Nagroda Rektora ZUT za osiągnięcia naukowe I stopnia w roku 2023 (6. miejsce w skali Uczelni) – Załącznik N.3.

(podpis wnioskodawcy)