

Projektowanie hybrydowych korpusów obrabiarek

Design of hybrid machine tool frames

JAN KOSMOL*

DOI: 10.17814/mechanik.2016.8-9.328

Prezentowano metodykę projektowania hybrydowych korpusów obrabiarek – żeliwnych odlewanych lub stalowych spawanych, wypełnionych polimerobetonem. W procesie projektowania przyjęto kryterium wymaganej sztywności statycznej i opracowano algorytm postępowania, który pozwala na uzyskanie korpusu spełniającego założone wymagania. Korpus hybrydowy jest tańszy w produkcji i cechuje się korzystniejszymi właściwościami eksploatacyjnymi, m.in. lepiej tłumi drgania i ma dobre charakterystyki dynamiczne. Konstrukcyjne cechy hybrydowego korpusu stalowego lub żeliwnego, m.in. grubości ścianek i wymiary innych przekrojów poprzecznych, zoptymalizowano według kryterium ekonomicznego, z równoczesnym spełnieniem wymagań technicznych.
SŁOWA KLUCZOWE: hybrydowy korpus obrabiarki, sztywność statyczna, polimerobeton

The paper presents a methodology of designing machine tools frames called hybrid frames, it means iron cast or welded steel frames fulfilled by polymer concrete. For assumed design criterion, for example static stiffness a methodology of proceeding was shown which makes possible to obtain a technical appropriate frame, which is chipper and has better properties like vibration damping or dynamic. Such frames, iron casts or steel called hybrid frames are fulfilled by polymer concrete, but their design feature like thickness of walls, dimensions of cross-section are optimized for the point of view of economic criterion.
KEYWORDS: machine tool, frame, static stiffness, polymer concrete, hybrid

Wymagania stawiane współczesnym obrabiarkom są w dużym stopniu determinowane obróbką skrawaniem HSC (*high speed cutting*) i dotyczą przede wszystkim właściwości eksploatacyjnych, takich jak: wysoka sztywność statyczna, intensywniejsze tłumienie drgań, dobra stabilność cieplna, stabilność dynamiczna układu nośnego obrabiarki (rozumiana jako występowanie drgań własnych układu nośnego o wyższej częstotliwości i mniejszej amplitudzie), odporność na występowanie drgań samowzbudnych. Jednocześnie w procesach HSC dąży się do zmniejszenia: poziomu hałasu towarzyszącego dużym parametrom kinematycznym, zużycia energii oraz kosztów wytworzenia i eksploatacji maszyn.

Cechy użytkowe obrabiarki zależą w dużej mierze od jej korpusu, który ma znaczący udział w masie/objętości całej maszyny. Zaprojektowanie tego elementu jest dość trudne, zwłaszcza że jego masa istotnie wpływa na zjawiska statyczne i dynamiczne towarzyszące procesowi skrawania. Korpusy nowoczesnych obrabiarek bardzo często mają konstrukcję zbliżoną do korpusów maszyn poprzedniej generacji – jako rozwiązań sprawdzonych.

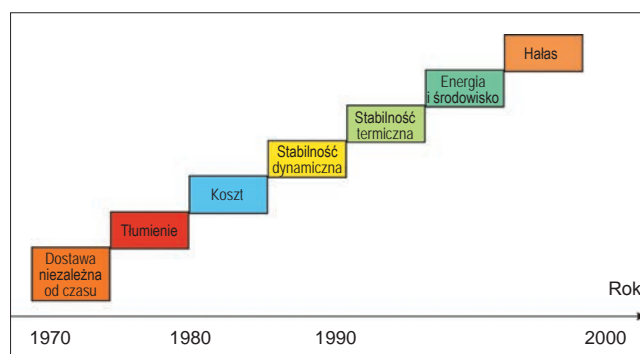
Stworzenie nowej, lepszej konstrukcji jest procesem kosztownym i wymagającym zaawansowanych narzędzi projektowo- optymalizacyjnych. Biura konstrukcyjne producentów obrabiarek nie zawsze są do tego przygotowane.

Istotnym ograniczeniem w rozwoju konstrukcji korpusów obrabiarek są również materiały. Muszą one mieć dobre właściwości tłumienia drgań, dlatego powszechnie stosuje się odlewane korpusy żeliwne. Żeliwo ma też inne korzystne cechy, np. dobrą skrawalność i leżność, a ponadto jest stosunkowo tanie. Właściwości mechaniczne żeliwa – wytrzymałość na rozciąganie i wytrzymałość na zginanie – są stosunkowo niskie, więc przekroje poprzeczne korpusów i tym samym ich masa są duże.

Wadą odlewanych korpusów jest ograniczona możliwość modyfikowania ich konstrukcji. Każda tego rodzaju zmiana wymaga bowiem modernizacji lub wykonania modelu odlewniczego i formy od nowa, co jest kosztowne i czasochłonne. Z tego powodu producenci obrabiarek stosują odlewane korpusy dopóty, dopóki spełniają one minimalne założenia konstrukcyjne dotyczące m.in. sztywności i właściwości dynamicznych.

Wspomniane niedogodności nie dotyczą stalowych korpusów spawanych. Mają one mniejszą masę i znacznie lepsze parametry wytrzymałościowe, a modyfikowanie ich konstrukcji jest łatwiejsze i tańsze. Niestety, korpusy stalowe mają małą zdolność do rozpraszania energii i tłumienia drgań, a dodatkowo muszą być poddawane wyżarzaniu, zapewniającemu stabilizację stanu naprężenia po procesie spawania.

Analiza danych z literatury wskazuje, że podstawowym czynnikiem sprzyjającym zastępowaniu korpusów jednolitych (żeliwnych lub stalowych) hybrydowymi było skrócenie czasu wytworzenia korpusu [1]. Producenci obrabiarek uznali, że ponieważ czas wykonania nowego korpusu jest długi (rys. 1), działania prowadzące do jego redukcji zasługują na poparcie. Przyjęcie tego kryterium jest podstawą rozwoju oraz stosowania hybrydowych korpusów obrabiarek.



Rys. 1. Czynniki sprzyjające zastępowaniu żeliwa i stali w korpusach obrabiarek polimerobetonem [1]

* Prof. dr hab. inż. Jan Kosmol (jan.kosmol@polsl.pl) – Politechnika Śląska

Ogólna charakterystyka jednolitych i hybrydowych korpusów obrabiarek

Korpus hybrydowy najczęściej jest wykonany z żeliwa lub ze stali, przy czym jego wnętrze wypełnia materiał o określonych właściwościach użytkowych – zwykle polimerobeton. Rozwój i stosowanie nowych materiałów przeznaczonych na korpusy obrabiarek zapoczątkował szwajcarski producent F. Studer, gdy w 1957 r. opatentował Polymer Concrete (PC) [2] – materiał z grupy polimerobetonów. Powstały też inne nowe materiały należące do polimerobetonów, m.in. Granitan o zawartości cząstek stałych ok. 80% i żywicy ok. 20%, a także zawierający ponad 90% cząstek stałych Philly-cast stworzony przez ITW Philadelphia Resins [2].

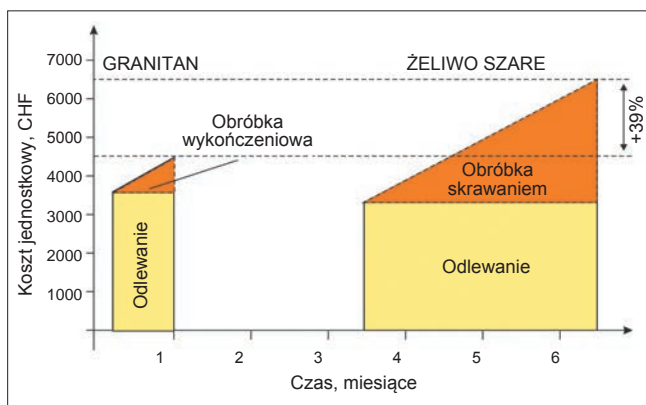
Właściwości polimerobetonu zależą od: rodzaju i rozmiarów cząstek stałych, rodzaju żywicy oraz udziału cząstek stałych i żywicy. Analiza prac K. Paderewskiego [3], J. Honczarenki [4], N. Kępczaka [5], R. Kreienbuhla [1] oraz innych potwierdza zalety konstrukcji z polimerobetonu i uzasadnia stosowanie tego materiału w korpusach obrabiarek.

Rozwój polimerobetonowych korpusów obrabiarek był podyktowany wieloma czynnikami (rys. 1), jednak najważniejszym okazał się krótszy czas w połączeniu z niższym kosztem wytworzenia nowego korpusu (rys. 2). Wypro-

dukowanie odlewane go korpusu żeliwnego lub stalowego korpusu spawanego, a następnie ich sezonowanie i obróbka skrawaniem, zajmuje miesiące (zwłaszcza że producent obrabiarki najczęściej zleca te usługi – poza obróbką skrawaniem – firmom zewnętrznym). Poza tym koszt produkcji tradycyjnych korpusów jest o ok. 30% wyższy w porównaniu z kosztem wytworzenia korpusu polimerobetonowego. Co istotne, w wielu przypadkach producent obrabiarki może wykonać taki korpus w swoim zakładzie.

Równie istotnym argumentem przemawiającym za zastępowaniem korpusów jednolitych korpusami hybrydowymi jest zdolność do tłumienia drgań (tabl. 1). Wartość logarytmicznego dekrementu tłumienia drgań polimerobetonu jest o rząd większa w porównaniu z żeliwem szarym.

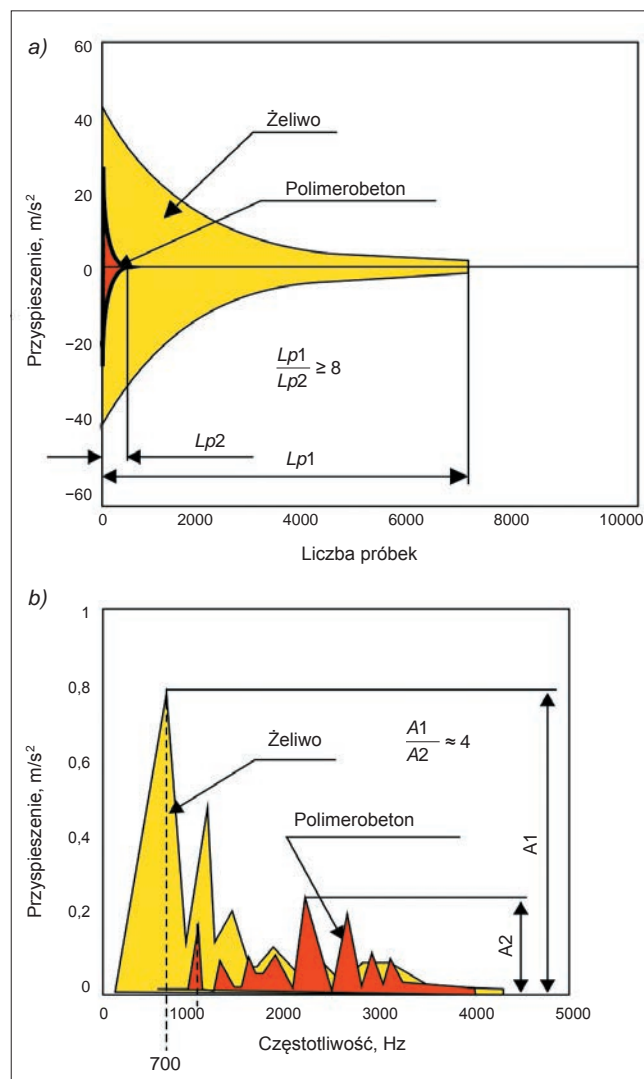
Kolejne czynniki to koszt materiałów oraz technologia. Jednostkowy koszt polimerobetonu jest 2–3 razy niższy w porównaniu z żeliwem i stalą (tabl. 1), jednak materiał ten ma znacznie gorsze właściwości mechaniczne, co oznacza konieczność zwiększenia jego objętości w konstrukcji. Pod tym względem korpus hybrydowy nie zawsze jest więc tańszy od korpusu żeliwnego czy stalowego, choć technologia wykonania (rys. 2), a zwłaszcza obróbka skrawaniem, pozwala zredukować jego koszt. W przypadku korpusu hybrydowego koszty przygotowania odlewu (modelu i formy) i samego procesu odlewniczego są niższe.



Rys. 2. Czas i koszt wytworzenia korpusu żeliwnego oraz hybrydowego z polimerobetonu Granitan [1]

TABLICA. I. Właściwości fizyczne i mechaniczne stali, żeliwa i polimerobetonu [6]

Materiał	Stal	Żeliwo szare	Polimerobeton
Gęstość, g/cm ³	7,85	7,2	2,1+2,4
Wytrzymałość na ściskanie, MPa	250+1200	350+450	140+170
Wytrzymałość na zginanie, MPa	400+1600	150+400	25+40
Moduł Younga, GPa	210	80+120	30+40
Współczynnik przewodności cieplnej, W/m·K	50	50	1,3+20
Współczynnik cieplnej rozszerzalności, 1/K	12·10 ⁻⁶	10·10 ⁻⁶	(12+20)·10 ⁻⁶
Umowne ciepło właściwe, kJ/kg·K	0,45+0,50	0,5	0,9+1,3
Logarytmiczny dekrement tłumienia	0,002	0,003	0,02+0,03
Koszt, euro/dm ³	7,67	5,11	2,56
Zapotrzebowanie na energię przy wytwarzaniu, MJ/dm ³	160	120	25



Rys. 3. Obwiednie sygnałów z czujników przyspieszeń dla obrabiarki z łożem żeliwnym i polimerobetonowym (a) oraz obwiednie widma drgań (b) [7]

Uzasadnieniem stosowania polimerobetonu w hybrydowych korpusach obrabiarek są ponadto stabilność dynamiczna i stabilność cieplna.

Na rys. 3 przedstawiono wyniki badań drgań (przyspieszeń) stojaka obrabiarki z łożem polimerobetonowym i żeliwnym [7]. Jak widać, obrabiarka z łożem polimerobetonowym ośmiokrotnie intensywniej tłumi drgania niż obrabiarka z łożem żeliwnym. Maksymalne wartości przyspieszenia są zaś ok. czterokrotnie mniejsze w obrabiarence z łożem polimerobetonowym niż w obrabiarence z łożem żeliwnym. Jednocześnie pierwsze częstotliwości rezonansowe dla obrabiarki z łożem polimerobetonowym są o ok. 30% większe.

Stabilność cieplna ma istotny wpływ na dokładność obróbki skrawaniem. Po pierwsze w trakcie procesu wydziela się duża ilość ciepła, co bywa przyczyną odkształceń zespołów obrabiarki. Po drugie w ciągu dnia roboczego temperatura pokojowa może się zmieniać nawet o kilkanaście stopni, co w przypadku obrabiarki o tradycyjnym korpusie – stalowym lub żeliwnym – powoduje spadek powtarzalności pozycjonowania. Jest to konsekwencją dobrych właściwości cieplnych (wysokich współczynników przewodności i przenikalności cieplnej) żeliwa i stali. W porównaniu z tymi materiałami współczynnik przewodności cieplnej polimerobetonu jest ok. 12 razy mniejszy [1], a jego cieplna stała czasowa – ok. trzykrotnie większa w porównaniu z żeliwem. Na rys. 4 przedstawiono przykład zmian temperatury stojaka szlifierki pod wpływem zmian temperatury otoczenia. Można zauważyć, że korpus polimerobetonowy nagrzewa się wolniej i – co ważne – do niższej temperatury niż korpus żeliwny.

W ocenie obrabiarki uwzględnia się zużycie energii i oddziaływanie na środowisko – zarówno podczas wytwarzania maszyny, jak i jej użytkowania. Przeciętne zapotrzebowanie na energię potrzebną do wytworzenia korpusu polimerobetonowego jest mniejsze ok. 4÷5 razy w porównaniu z korpusem żeliwnym lub stalowym (tabl. 1).

Literatura przedmiotu potwierdza korzystne właściwości polimerobetonu z punktu widzenia jego przydatności jako materiału na korpusy obrabiarek, aczkolwiek w tym przypadku problemem są zjawiska korozyjne. Ponadto z uwagi na niskie parametry mechaniczne polimerobetonu zasadne jest stosowanie konstrukcji hybrydowych, czyli spawanych korpusów stalowych lub odlewanych korpusów żeliwnych, wypełnionych polimerobetonem. Niestety, obec-

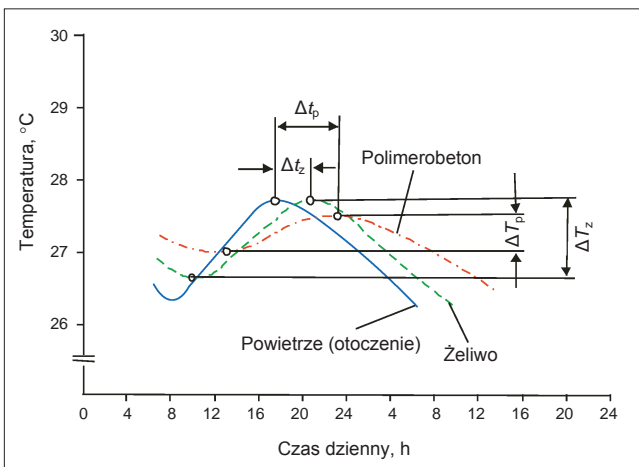
nie brakuje informacji na temat projektowania hybrydowych korpusów obrabiarek. Jak się wydaje, proces ich projektowania należałoby powiązać z optymalizacją, w której zmiennymi byłyby udziały masy żeliwa/stali i polimerobetonu, a jej globalnym kryterium – koszt wytworzenia korpusu lub jego masa.

Projektowanie korpusów hybrydowych

Hybrydowy korpus obrabiarki to najczęściej spawany korpus stalowy, który dodatkowo jest wypełniony polimerobetonem. Podstawowym zagadnieniem jest zatem ustalenie: proporcji obu materiałów, wymiarów korpusu stalowego i polimerobetonowego oraz właściwości eksploatacyjnych opracowanego korpusu hybrydowego. Zaproponowano następującą procedurę postępowania:

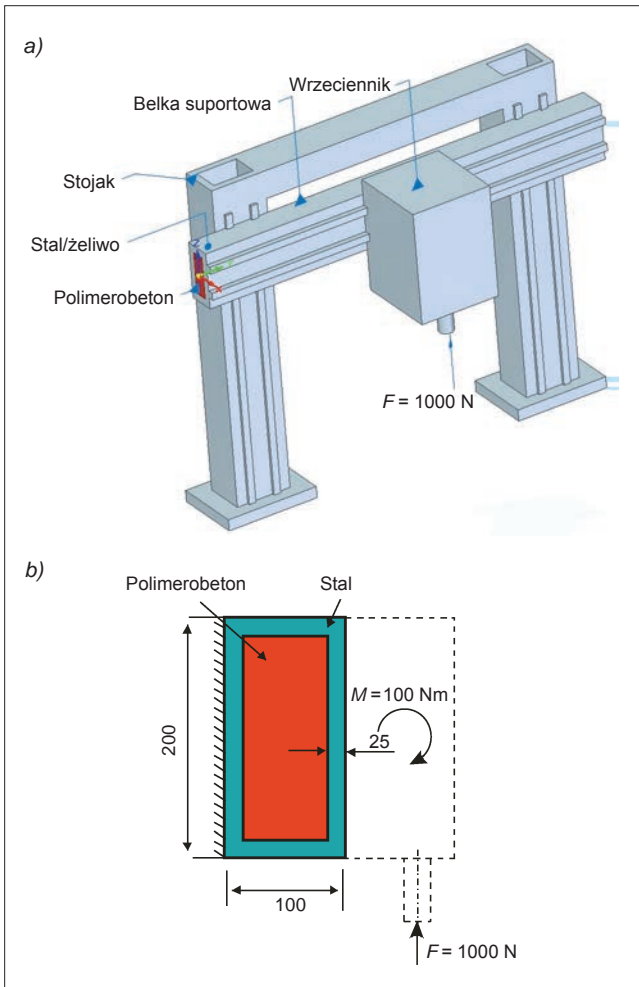
1. Wybór korpusu odniesienia – może nim być obecnie stosowany w obrabiarence albo nowo zaprojektowany korpus jednolity pod względem materiału (żeliwny lub stalowy).
2. Wyznaczenie kryteriów oceny (takich jak: wskaźnik sztywności statycznej, pierwsza częstotliwość drgań własnych, amplituda drgań własnych dla pierwszej częstotliwości i in.), które jednocześnie będą kryteriami optymalizacji korpusu hybrydowego.
3. Dobór kryterium ogólnego (może nim być koszt wytworzenia lub koszt materiału albo masa korpusu). Istnieje możliwość przyjęcia złożonego algorytmu optymalizacji i utworzenia funkcji celu, łączącej wymagania techniczne i ekonomiczne.
4. Przeprowadzenie symulacji numerycznych dla korpusów hybrydowych – zmniejszanie masy lub objętości stali z jednoczesnym zwiększaniem udziału polimerobetonu. Dla każdego przyjętego wariantu korpusu hybrydowego określa się wartości poszczególnych kryteriów (pkt 2) oraz masę i koszt materiału.
5. Ustalenie na podstawie symulacji wariantu korpusu hybrydowego, dla którego wartości kryteriów są zbliżone do parametrów korpusu odniesienia lub lepsze, a koszt materiału lub masa korpusu są mniejsze.
6. Prowadzenie optymalizacji dla każdego kryterium oddzielnie albo zdefiniowanie funkcji celu i wykonanie optymalizacji wielokryterialnej.
7. Sprawdzenie, czy opracowany (optymalny) korpus hybrydowy spełnia warunki wytrzymałościowe. W korpusach hybrydowych zmniejsza się objętościowy udział stali, a rośnie udział polimerobetonu. Może więc zaistnieć sytuacja, że ze względu na mniejszą wytrzymałość polimerobetonu maksymalne naprężenia będą większe od dopuszczalnych (w porównaniu z żeliwem wytrzymałość polimerobetonu na zginanie jest mniejsza 10÷20 razy).

Procedurę projektowania korpusu hybrydowego przedstawiono na przykładzie belki suportowej wirtualnej tokarki karuzelowej albo frezarki bramowej (rys. 5). Schemat takiej obrabiarki obejmuje tylko konstrukcję nośną: stojaki i belkę suportową. Dodatkowo dla uproszczenia przyjęto, że belka obciążona jest siłą skupioną ($F = 1000 \text{ N}$) i momentem skręcającym wynikającym z niesymetrycznego położenia wektora siły względem osi podłużnej belki. Ponadto założono, że belka jest trwale połączona ze stojakami (pominięto sztywność kontaktową belki i stojaków), podobnie jak wrzeciennik, który połączony jest z belką. Te uproszczenia zmieniają charakterystykę statyczną i dynamiczną belki, lecz umożliwiają przedstawienie opracowanej metodyki projektowania.



Rys. 4. Zmiana temperatury korpusu obrabiarki (polimerobetonowego i żeliwnego) w zależności od zmian temperatury otoczenia [8]: Δt_p , Δt_z – przyrosty czasu; ΔT_p , ΔT_z – przyrosty temperatury





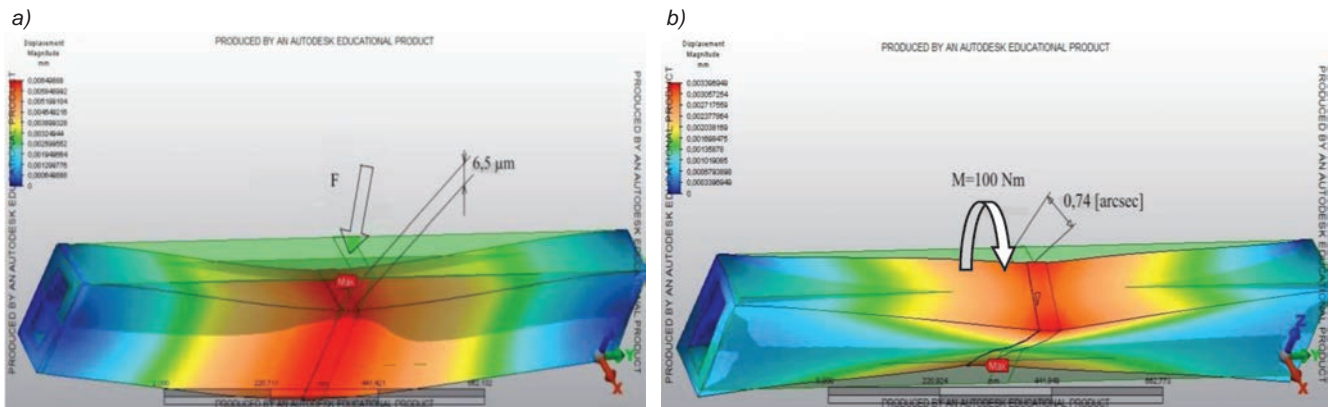
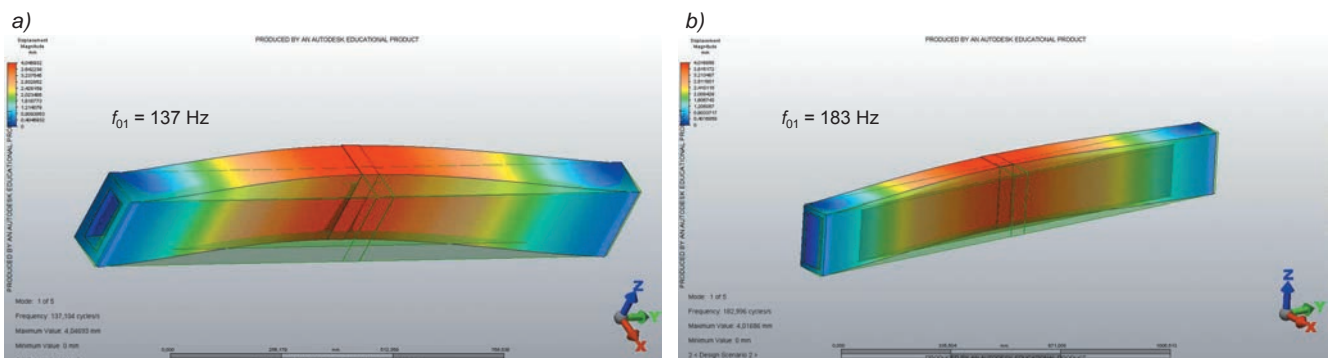
Rys. 5. Konstrukcja nośna obrabiarki z hybrydową belką suportową

Belka odniesienia jest typową żeliwną konstrukcją o długości $L = 1500$ mm, przekroju prostokątnym i grubości ścianek 25 mm (rys. 5). Dla tej belki prowadzono symulacje numeryczne metodą elementów skończonych w programie Algor. Wyznaczono następujące wartości (przyjęte kryteria):

- sztywność statyczną liniową belki oraz maksymalne przemieszczenie liniowe $z_{ref} = 6,5 \mu\text{m}$ dla obciążenia $F = 1000$ N (rys. 6a),
- sztywność statyczną kątową belki oraz maksymalne przemieszczenie kątowe $\phi_{ref} = 3,6 \cdot 10^{-6}$ rad dla momentu $M = 100$ Nm (rys. 6b),
- pierwszą częstotliwość drgań własnych $f_{ref} = 137$ Hz oraz amplitudę drgań własnych dla tej częstotliwości $A_{ref} = 4,04$ mm (rys. 7a),
- masę belki $m_{ref} = 137$ kg,
- koszt materiału $K_{ref} = 696,5$ euro.

Na rys. 6 pokazano postać odkształcenia belki suportowej po obciążeniu jej siłą F (rys. 6a) i momentem M (rys. 6b). Zaznaczone wielkości przemieszczeń – liniowego i kątowego – stanowią wartości odniesienia w procesie optymalizacji. Na rys. 7 przedstawiono natomiast postaci drgań własnych dla pierwszej częstotliwości drgań (137 Hz) belki odniesienia oraz belki hybrydowej (belki stalowej o grubości ścianki 15 mm, wypełnionej polimerobetonem).

Na kolejnym etapie procesu projektowania prowadzono symulacje numeryczne MES dla belek stalowej i żeliwnej, wypełnionych polimerobetonem. Przyjęto następującą zasadę: przy zachowaniu stałych wymiarów przekroju poprzecznego 100×200 mm (belka odniesienia) grubość ścianki korpusu stalowego lub żeliwnego zmniejszono o 5 mm. Dla każdej takiej belki określono wartości przyjętych kryteriów, np. ustalono odkształcenia stalowej belki o grubości ścianki 15 mm (jednolitej i wypełnionej

Rys. 6. Odształcenia belki odniesienia poddanej obciążeniu: a) siłą $F = 1000$ N, b) momentem $M = 100$ Nm

Rys. 7. Postaci drgań: a) belki odniesienia, b) hybrydowej (stalowej o grubości ścianki 15 mm, wypełnionej polimerobetonem) dla pierwszej częstotliwości drgań własnych

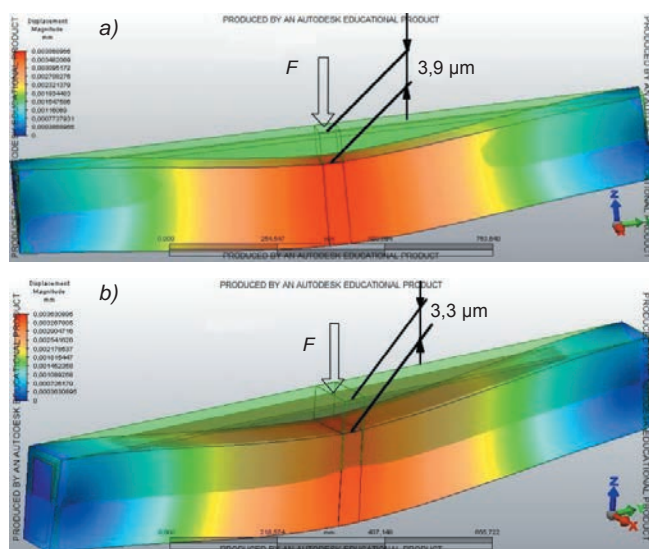


polimerobetonem) przy obciążeniu $F = 1000$ N (rys. 8). Wyznaczone maksymalne przemieszczenia dla belki jednolitej i hybrydowej – odpowiednio 3,9 i 3,3 μm – uwzględniono przy ocenie sztywności statycznej tych dwóch wariantów belki.

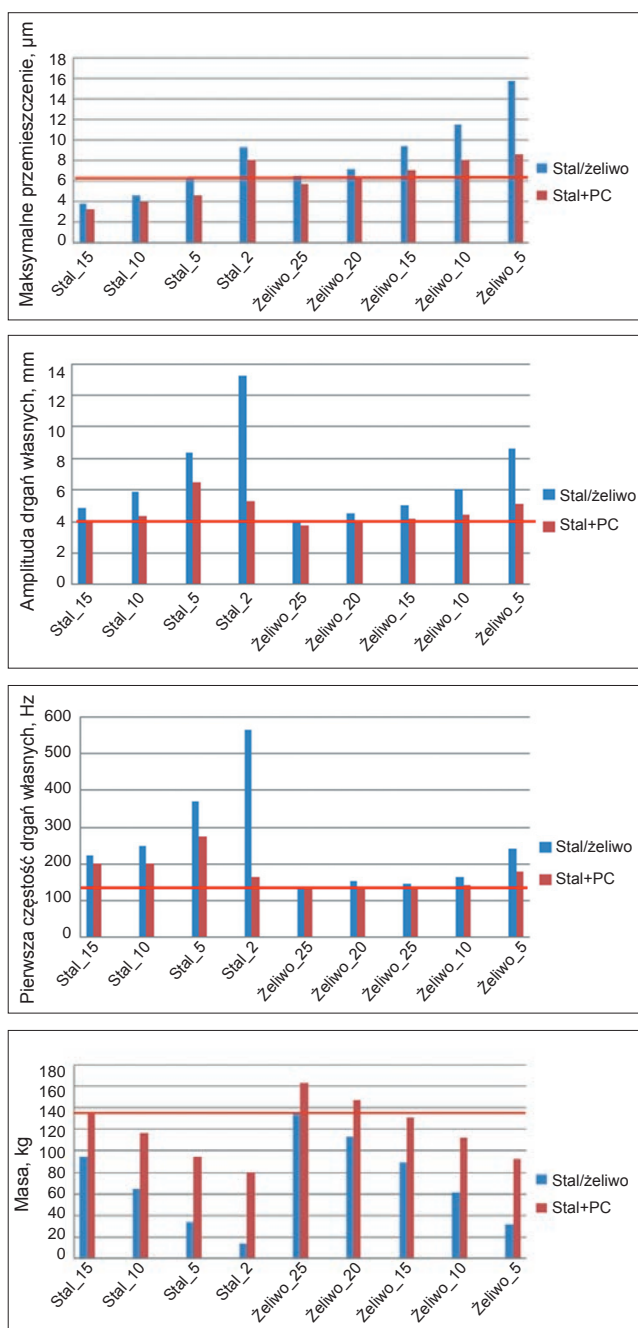
Uzyskane w procesie symulacji wartości przyjętych kryteriów optymalizacji dla belek jednolitych i hybrydowych zamieszczono w tabl. II.

Analiza wyników badań (tabl. II i rys. 9) prowadzi do wniosku, że belki hybrydowe o przekroju poprzecznym oraz belki jednolite mają większą sztywność statyczną oraz mniejszą pierwszą częstotliwość i amplitudę drgań własnych. Cechują je większa masa i większy koszt materiałowy. Korzyści z zastosowania tak skonstruowanych belek hybrydowych są dyskusyjne. Ponadto, jeśli jako kryteria doboru belki przyjmie się wielkości odpowiadające belce odniesienia (linia pozioma na rys. 9: belka żeliwna Żeliwo_25, grubość ścianki 25 mm) – tj. maksymalne przemieszczenie 6,5 μm , pierwszą częstotliwość drgań własnych 137 Hz, amplitudę drgań własnych 4,04 mm i masę 136,3 kg – wówczas można stwierdzić, że:

- kryterium maksymalnego przemieszczenia spełniają belki stalowe jednolite i hybrydowe o grubości ścianki $5 \div 15$ mm,



Rys. 8. Odształcenia stalowej belki (grubość ścianki 15 mm, obciążenie $F = 1000$ N): a) jednolitej, b) hybrydowej



Rys. 9. Zestawienie wybranych wielkości kryterialnych dla belek jednolitych i hybrydowych

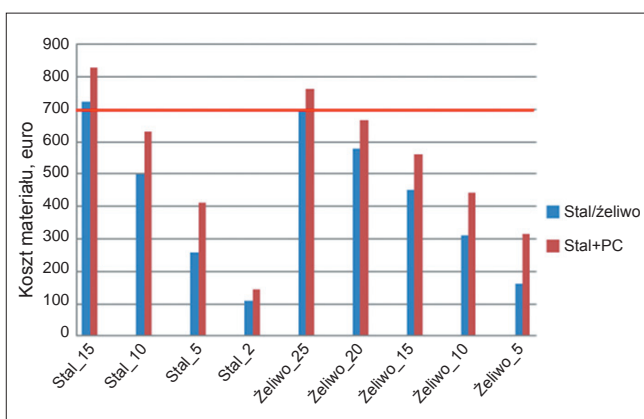
TABLICA II. Kryteria optymalizacji dla belek jednolitych stalowych i żeliwnych oraz hybrydowych (czerwoną czcionką zaznaczono warianty spełniające wymagania)

Belka referencyjna	Belka jednolita	Belka hybrydowa	Belka jednolita	Belka hybrydowa	Belka jednolita	Belka hybrydowa	Belka jednolita	Belka hybrydowa
	Przemieszczenie, μm		Pierwsza częstotliwość, Hz		Amplituda drgań, mm		Masa, kg	
	6,5		137		4,04		136,3	
Stal_15	3,9	3,3	222,7	200,5	4,87	4,06	94,2	136,3
Stal_10	4,7	4	249,9	202,4	5,85	4,36	65,1	116
Stal_5	6,4	4,66	370,4	273	8,35	6,45	33,8	94,3
Stal_2	9,3	8,1	562	165	13,2	5,27	14	80,6
Żeliwo_25	6,5	5,8	137	137	4,04	3,72	136,3	162,9
Żeliwo_20	7,2	6,3	152,5	136,9	4,5	3,9	113,5	147,5
Żeliwo_15	7,2	6,3	152,5	136,9	4,5	3,9	113,5	147,5
Żeliwo_10	9,4	7,1	146,5	138,6	5,02	4,16	88,5	130,6
Żeliwo_5	11,5	8,1	164	141,9	6,03	4,45	61,2	112,2



- kryterium pierwszej częstotliwości drgań własnych spełniają wszystkie przyjęte warianty belek,
- kryterium amplitudy drgań własnych spełniają tylko hybrydowa belka stalowa i hybrydowa belka żeliwna o grubości ścianki 15 mm,
- kryterium masy spełnia większość belek, poza hybrydowymi belkami żeliwnymi, o grubości ścianki 15+25 mm.

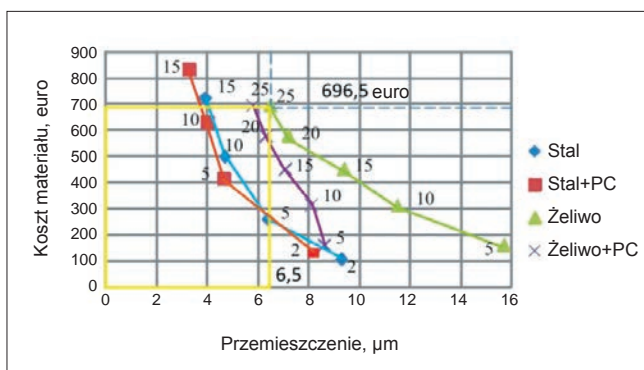
Na kolejnym etapie procesu projektowania wprowadzono kryterium ekonomiczne – koszty zastąpienia belki jednolitej belką hybrydową. Uwzględniając cenę jednostkową stali, żeliwa i polimerobetonu (tabl. I) oraz masę tych materiałów, dla każdej wersji belki można oszacować koszt materiału potrzebnego do wykonania belki suportowej (rys. 10).



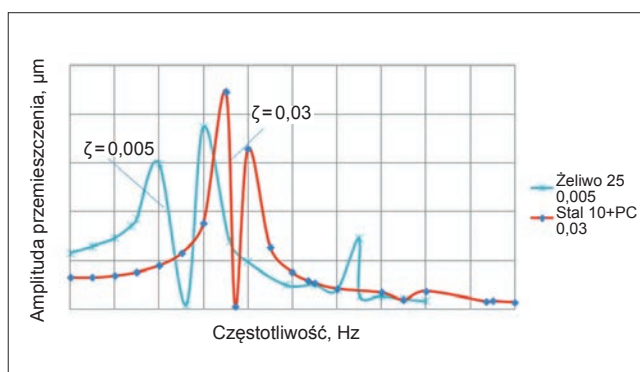
Rys. 10. Zestawienie kosztu materiału dla przyjętych wariantów belki suportowej

Uzyskane wyniki (rys. 10) wskazują, że prawie każdy wariant belki hybrydowej (z wyjątkiem belki stalowej o grubości ścianki 15 mm) jest tańszy od belki odniesienia. Aby więc wybrać wariant *quasi*-optymalny, należy wprowadzić dodatkowe kryterium.

Koszt materiałowy przedstawiono w funkcji maksymalnego przemieszczenia belki jako miary jej sztywności (rys. 11). Przyjętą wartość przemieszczenia 6,5 μm (odpowiadającą belce odniesienia) spełnia kilka wariantów belek tańszych w porównaniu z belką odniesienia. Są to przede wszystkim jednolite belki stalowe i belki hybrydowe. Najtańszym rozwiązaniem – ok. 2,5-krotnie tańszym niż belka odniesienia – jest stalowa belka jednolita o grubości ścianki 5 mm, która jednak nie może być zastosowana w konstrukcji obrabiarki z uwagi na słabe właściwości tłumiące oraz amplitudę drgań własnych dwukrotnie wyższą od wartości odniesienia. Optymalnym rozwiązaniem – tańszym i sztywniejszym (mimo że charakteryzuje się ono



Rys. 11. Zestawienie kosztu materiału w funkcji maksymalnych przemieszczeń dla przyjętych wariantów belki suportowej



Rys. 12. Charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowe belki odniesienia (belki żeliwnej o grubości ścianki 25 mm i współczynniku tłumienia 0,005) oraz belki hybrydowej (belki stalowej hybrydowej o grubości ścianki 10 mm i współczynniku tłumienia 0,03)

amplitudą drgań większą w porównaniu z belką odniesienia) – jest natomiast belka stalowa hybrydowa o grubości ścianki 5 mm.

Podobną procedurę można przeprowadzić ze względu na inne kryterium techniczne – np. pierwszą częstotliwość drgań własnych. Ten parametr w praktyce służy do oceny właściwości dynamicznych obiektów, jednak nie uwzględnia właściwości tłumiących. Gdy to kryterium zastosuje się w odniesieniu do konstrukcji hybrydowych, w których przynajmniej jeden składnik ma znacznie lepsze właściwości tłumiące, można dojść do błędnych wniosków. Wydaje się, że w przypadku takich konstrukcji bardziej odpowiednim kryterium jest charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa jako miara odpowiedzi na wymuszenie okresowo zmienne.

Na podstawie charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych uzyskanych dla belki odniesienia (korpus żeliwny o grubości ścianki 25 mm) oraz belki hybrydowej stalowej o grubości ścianki 10 mm (rys. 12) stwierdzono, że belka hybrydowa spełnia większość wymagań technicznych (oprócz kryterium amplitudy drgań własnych – tabl. II), a ponadto jest tańsza od belki odniesienia. Pierwsza częstotliwość rezonansowa belki stalowej hybrydowej jest jednak o ponad 70% większa w porównaniu z wartością odniesienia. Przy częstotliwości poniżej 300 Hz amplituda drgań wymuszonych belki stalowej hybrydowej jest z kolei mniejsza niż w przypadku belki żeliwnej, co świadczy o lepszych właściwościach dynamicznych (w tym o lepszym tłumieniu drgań).

Podsumowanie

W artykule przedstawiono procedurę projektowania hybrydowych korpusów obrabiarek, tj. wypełnionych polimerobetonem odlewanych korpusów żeliwnych lub spawanych korpusów stalowych. Z uwagi na bardzo dobre właściwości tłumiące polimerobetonu oraz jego niską cenę takie rozwiązania korpusów hybrydowych są tańsze i mają lepsze właściwości eksploatacyjne. Projektowanie korpusu hybrydowego wymaga stosowania procedury optymalizacyjnej, pozwalającej na skonstruowanie korpusu o większej sztywności statycznej, większej pierwszej częstotliwości drgań własnych, lepszym tłumieniu drgań i mniejszym koszcie wytworzenia. Omówioną procedurę postępowania, mającą cechy optymalizacji, może w praktyce wykorzystać każdy konstruktor korpusów, który opanował metodę elementów skończonych w zakresie podstawowym (większość programów CAD ma opcję MES).

Efekty zastosowania opracowanej procedury postępowania pokazano na przykładzie belki tokarki. Jak się wydaje, ta procedura stanowi praktyczne narzędzie, którego można używać w warunkach przemysłowych, bez konieczności prowadzenia bardzo zaawansowanych analiz.

LITERATURA

1. Kreienbuhl R. "Epoxy Concrete for Better Machine Basis: A 20 Year Review of Incentives for Replacing Cast Iron". *State-of-the-Art Report for American Concrete Institute's Committee 548 – Polymers in Concrete*.
2. Kępczak N., Pawłowski W. „Teoretyczne badania właściwości dynamicznych łóż obrabiarki wykonanych z żeliwa i hybrydowego połączenia żeliwa z odlewem mineralnym”. *Mechanik*. Nr 8–9 (2015): s. 199÷203.
3. Paderewski K. „Zastosowanie polimerobetonów w budowie obrabiarek”. *Przegląd Mechaniczny*. Nr 13 (1984): s. 12÷15.
4. Honczarenko J. „Korpusy współczesnych obrabiarek”. *Mechanik*. Nr 2 (2009): s. 89÷92.
5. Kępczak N., Pawłowski W., Błażejowski W. "The study of the mechanical properties of the mineral cast material". *Archives of Mechanical Technology and Automation*. 34 (2014) 2: pp. 25÷32.
6. Prażmo J., Sobczak R. „Analiza możliwości wykorzystania polimerobetonu jako materiału do budowy korpusów obrabiarek wodno-ścieranych” (waterjet.org.pl).
7. Bruni C., Forcellese A., Gabrielli F., Simoncini M. "Hard turning of an alloy steel on a machine tool with a polymer concrete bed". *Journal of Materials Processing Technology*. 202 (2008) 1÷3: 493÷499.
8. Salje E., Gerloff H., Meyer J. "Comparison of machine tool elements made of polymer concrete and cast iron". *Annals of the CIRP*. 37 (1988) 1: pp. 381÷384.
9. Bedi R., Chandra R., Singh S. "Mechanical properties of polymer concrete". *Journal of Composites*. Vol. 2013 (2013): pp. 1÷12.
10. Piratelli A., Levy F. "Behavior of granite-epoxy composite beams subjected to mechanical vibrations". *Materials Research*. 13 (2010) 4: p. 10.
11. Sugishita H., Nishiyama H. "Development of concrete machining center and identification of the dynamic and the thermal structure behavior". *CIRP Annals – Manufacturing Technology*. Vol. 37, Iss. 1 (1988): pp. 377÷380. ■