Spis treści

Wybrane oznaczenia ……..... 5

1. Wstęp ……... 7

2. Analiza literatury ……..... 11

3. Cel i plan badań ……. 21

4. Badania właściwości mechanicznych odlewów mineralnych ……. 23
4.1. Materiały, próbki, urządzenia oraz przeprowadzenie badań …… 23
4.1.1. Materiały ……. 23
4.1.2. Próbki …….. 24
4.1.3. Urządzenia …….. 25
4.1.4. Przeprowadzenie badań …….. 25
4.2. Wyniki badań wytrzymałościowych …… 26
4.3. Wnioski z badań wytrzymałościowych …… 31
4.4. Badania mikroskopowe …… 31

5. Wprowadzenie do teoretycznej analizy modalnej ……... 33
5.1. Wstęp …… 33
5.2. Analiza modalna w programie Autodesk Inventor ……..... 34

6. Badania numeryczne dynamicznych właściwości korpusów obrabiarki ….. 37
6.1. Teoretyczna analiza modalna żeliwnego korpusu obrabiarki ……..... 37
6.2. Teoretyczna analiza modalna hybrydowego korpusu obrabiarki ……..... 40
6.3. Teoretyczna analiza modalna mineralnego korpusu obrabiarki (ścianki grubości 12 mm) ……... 42
6.4. Teoretyczna analiza modalna mineralnego korpusu obrabiarki (ścianki grubości 40 mm) ……... 43
6.5. Podsumowanie …….. 44

7. Badania numeryczne statycznych właściwości korpusów obrabiarki …….. 49
7.1. Badania statyczne żeliwnego korpusu obrabiarki …… 50
7.2. Badania statyczne hybrydowego korpusu obrabiarki ……..... 51
7.3. Podsumowanie numerycznych badań statycznych ……..... 52

8. Wprowadzenie do eksperymentalnej analizy modalnej ……. 55
8.1. Wstęp …… 55
8.2. Metodyka eksperymentalnej analizy modalnej …… 56

9. Badania doświadczalne dynamicznych właściwości korpusów obrabiarki .. 63

10. Porównanie teoretycznych i eksperymentalnych wyników badań dynamicznych właściwości korpusów obrabiarki ……... 69

11. Badania doświadczalne statycznych właściwości korpusów obrabiarki …... 87

12. Porównanie teoretycznych i eksperymentalnych wyników badań statycznych właściwości korpusów obrabiarki ……... 95

13. Podsumowanie i wnioski ……..... 97

Spis rysunków …… 99
Spis tabel …….. 105
Spis wzorów …… 107
Bibliografia …….. 109

Wybrane oznaczenia

A – amplituda estymaty funkcji przejścia H_1 [(mm/s^2)/N],
dr – współczynnik tłumienia drgań [%],
f – rzeczywiste odkształcenie [μm],
f_{K0} – odkształcenie korpusu bez obciążenia [μm],
f_{K1} – odkształcenie korpusu z obciążeniem [μm],
f_K – odkształcenie korpusu [μm],
f_{R0} – odkształcenie ramy korpusu bez obciążenia [μm],
f_{R1} – odkształcenie ramy korpusu z obciążeniem [μm],
f_R – odkształcenie ramy korpusu [μm],
Fr – częstotliwość drgań swobodnych [Hz],
$F(t)$ – przebieg czasowy sygnału wejściowego (siły) F,
$F(\omega)$ – widmo sygnału wejściowego $F(t)$,
$F^*(\omega)$ – liczba zespolona sprzężona do $F(\omega)$,
$G_{FF}(\omega)$ – gęstość widmowa mocy własna sygnału wejściowego,
$G_{xx}(\omega)$ – gęstość widmowa mocy własna sygnału odpowiedzi układu,
$G_{xF}(\omega)$ – gęstość widmowa mocy wzajemna sygnałów $x(t)$ i $F(t)$,
$H(\omega)$ – widmowa funkcja przejścia,
$H_1(\omega)$ – estymator minimalizujący wpływ szumu w sygnale wyjściowym,
$H_2(\omega)$ – estymator minimalizujący wpływ szumu w sygnale wejścia,
i – numer próby,
k – współczynnik rozszerzenia,
n – liczba prób,
S_x – empiryczne odchylenie standardowe,
S_x^2 – wariancja,
$\Delta_{gr}(x)$ – błąd graniczny przyrządu pomiarowego,
$u_A(x)$ – niepewność pomiaru typu A,
$u_B(x)$ – niepewność pomiaru typu B,
$u_C(x)$ – złożona niepewność standardowa,
$U(x)$ – niepewność rozszerzona,

v – współczynnik zmienności,

x_i – wartość pojedynczej próby,

$\bar{x}$ – wartość średnia,

$x(t)$ – przebieg czasowy sygnału odpowiedzi układu (przemieszczenia) *x*,

$X(\omega)$ – widmo sygnału odpowiedzi układu $x(t)$,

$X^*(\omega)$ – liczba zespolona sprzężona do $X(\omega)$.

1. Wstęp

Światowy przemysł ciągle poszukuje nowych rozwiązań konstrukcyjnych i zastosowania nowych materiałów, które dzięki swoim właściwościom pozwolą na poprawę jakości wytwarzanych produktów, zmniejszą koszty związane z procesem produkcyjnym, zwiększą elastyczność tego procesu itd. [12, 38]. Niestety większość firm produkcyjnych nadal bazuje na technologii oraz maszynach z lat osiemdziesiątych ubiegłego stulecia, a nawet starszych. W powszechnej opinii te maszyny były bardzo trwałe, a dokładność z jaką można było wykonać produkt była wystarczająca, jak na tamte czasy. W dzisiejszych halach technologicznych coraz częściej pojawiają się nowe obrabiarki. Ich konstrukcja z biegiem czasu uległa zmianie z jednolitej na modułową, jednakże niektóre elementy obrabiarek, np. łoża, nadal wykonywane są tradycyjnymi metodami, jakimi są procesy odlewania. Żeliwo, używane na różnego rodzaju korpusy, jak i łoża obrabiarek, posiada bardzo dobrą zdolność tłumienia drgań, co podczas procesu produkcyjnego przekłada się na dokładność wykonania przedmiotu, tj. możliwość zawężenia tolerancji wymiarowo-kształtowej, obniżenia chropowatości powierzchni czy poprawy stanu warstwy wierzchniej.

Przez ostatnie dziesięciolecia sposoby wytwarzania korpusów znacznie się rozwinęły. Obecnie korpusy produkuje się tradycyjnymi metodami, stosując następujące technologie:

- odlewniczą (korpusy żeliwne),
- spawalniczą (stalowe korpusy spawane),
- ubytkową (np. korpusy aluminiowe kształtowane obróbką skrawaniem).

Na korpusy obrabiarek stosowane jest żeliwo szare maszynowe, które można podzielić na trzy grupy: żeliwo szare zwykłe, żeliwo modyfikowane oraz żeliwo sferoidalne. Żeliwa szare mogą cechować się następującą strukturą osnowy: ferrytyczną, ferrytyczno-perlityczną oraz perlityczną. Wytrzymałość na ściskanie żeliwa perlitycznego wynosi ok. 350÷450 MPa przy twardości 200÷250 HB. Żeliwa szare cechuje dobra zdolność do tłumienia drgań [32].

Korzystniejsze właściwości niż żeliwo szare zwykłe ma żeliwo modyfikowane o osnowie perlitycznej. Jego granica wytrzymałości na rozciąganie może wynosić 300÷400 MPa, stąd modyfikację stosuje się często do żeliw szarych o podwyższonej wytrzymałości. Żeliwo modyfikowane, podobnie jak żeliwo szare zwykłe, wykazuje bardzo niskie właściwości plastyczne [32].

Bardzo dobre właściwości zarówno wytrzymałościowe, jak i plastyczne wykazuje żeliwo sferoidalne, w którym grafit występuje w postaci kulistej [32].

Korpusy stalowe spawane w porównaniu z żeliwnymi mają około dwukrotnie mniejszą masę, przy zachowaniu tej samej sztywności, co tłumaczy się tym, że moduł sprężystości stali jest 1,8÷2,6 razy większy od modułu sprężystości żeliwa. Proces spawania wprowadza do konstrukcji naprężenia cieplne skutkujące zmianą geometrii zespołu. Po spawaniu konieczne jest więc przeprowadzenie obróbki cieplnej w postaci wyżarzania odprężającego oraz często obrobienie odkształconego korpusu przy

zastosowaniu technologii obróbki skrawaniem. Korpusy spawane ustępują żeliwnym pod względem możliwości uzyskania skomplikowanych kształtów. Ich wadą jest też niskie tłumienie drgań, gdyż logarytmiczny dekrement tłumienia stali jest mniejszy niż żeliwa. Korpusy stalowe, spawane stosowane są przede wszystkim w jednostkowej produkcji obrabiarek unikatowych. Są także używane jako korpusy zespołów przesuwnych obrabiarek o dużych prędkościach przesuwu i wysokich przyspieszeniach [32].

Korpusy aluminiowe są najczęściej stosowane w przypadku małych obrabiarek dydaktycznych, gdzie zarówno siły skrawania, jak i momenty na wrzecionie są znacznie mniejsze niż w przypadku klasycznych obrabiarek produkcyjnych.

W XXI wieku od nowoczesnych obrabiarek wymaga się zapewnienia dużej dokładności obróbki, dobrej jakości powierzchni obrabianych oraz wysokiej wydajności [85, 86]. W procesie obróbki skrawaniem mogą pojawić się następujące trzy rodzaje drgań, które negatywnie wpływają na parametry kształtowo-wymiarowe przedmiotu obrabianego [32, 39, 61, 63, 68, 91]:

- drgania własne (swobodne),
- drgania wymuszone,
- drgania samowzbudne.

Drgania własne (swobodne) powstają na skutek wychylenia układu sprężystego z położenia równowagi chwilową siłą lub momentem (np. przy wychodzeniu noża tokarskiego z materiału, szybkim ruszaniu z miejsca, hamowaniu, nagłym spadku ciśnienia w obwodzie hydraulicznym itd.). Drgania te są zawsze drganiami tłumionymi o zanikającej amplitudzie [32, 68].

Drgania wymuszone są wywoływane stale działającą, okresowo zmienną siłą zewnętrzną. Ich przyczyną może być: niewyrównoważenie statyczne i dynamiczne elementów wirujących, zmienność przekroju warstwy skrawanej, nieciągłości procesu skrawania, niedokładność wykonania elementów napędu itd. [32, 68].

Drgania samowzbudne, których źródłem jest np. proces skrawania lub charakterystyka procesu tarcia współpracujących zespołów przesuwnych, powstają bez udziału zewnętrznych sił wymuszających o charakterze oscylacyjnym, bez zmiany parametrów układu i są podtrzymywane kosztem energii doprowadzonej do układu drgającego np. przez napęd obrabiarki [32, 68].

W procesie projektowania, konstruowania oraz wytwarzania maszyn i urządzeń powinno się stosować takie rozwiązania, aby ograniczać do minimum generowanie drgań swobodnych, wymuszonych i samowzbudnych. Eliminacja źródeł drgań lub minimalizacja skutków drgań powinna być poprzedzona dokładnym poznaniem procesów dynamicznych zachodzących w układzie drgającym maszyny, co może przyczynić się do dobrania właściwego sposobu likwidacji zaburzeń, nie powodując zakłóceń w normalnym funkcjonowaniu realizowanego procesu technologicznego. Ogólnymi sposobami eliminacji źródeł drgań m.in. są [27]:

- odpowiedni dobór kształtów i wymiarów par kinematycznych współpracujących elementów oraz ich parametrów funkcjonalnych pod kątem minimalizacji składowych dynamicznych sił reakcji,

- unikanie wymuszeń parametrycznych generowanych przez łożyska toczne np. przez ich zamianę na ślizgowe lub magnetyczne,
- stosowanie sprzęgieł hydrokinetycznych, które nie przenoszą drgań skrętnych, a w wielu przypadkach kompensują wpływ niewspółosiowości połączonych wałów,
- stosowanie elementów maszyn i mechanizmów o zredukowanej wibroaktywności,
- zabezpieczenie przed powstaniem sił hydrodynamicznych lub aerodynamicznych przez stosowanie kierownic przepływu, właściwe wyprostowanie i rozdzielenie strumienia, właściwą geometrię urządzeń przepływowych itp.,
- odpowiednia eksploatacja urządzeń i maszyn, unikanie zbytniego zużycia i powodowanych przez nich luzów, odpowiednie smarowanie, eliminacja zanieczyszczenia pomieszczeń, gdzie pracują urządzenia, odpowiednie zabezpieczenie węzłów specjalnie podatnych na zużycie,
- zmniejszenie amplitud drgań przy obciążeniach krótkotrwałych w drodze zwiększenia czasu trwania obciążenia,
- zmniejszenie nierównomierności ruchu obrotowego przez stosowanie odpowiednich kół zamachowych, stosowanie urządzeń symetrycznych pracujących w przeciwfazie,
- zmniejszenie sił bezwładności występujących na skutek niewyrównoważenia statycznie i dynamicznie elementów maszyn pozostających w ruchu obrotowym, jak również w ruchu posuwisto-zwrotnym mechanizmów,
- modyfikacje strukturalne przez wprowadzenie dodatkowych połączeń wewnętrznych, przerwanie ciągłości struktury, dodatkowe elementy sprężysto-tłumiące,
- modyfikacje parametryczne poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu technologicznego.

W celu zmniejszenia wpływu drgań na proces skrawania wykorzystuje się różne metody redukcji amplitudy drgań. Metody te można podzielić na dwie zasadnicze grupy, te związane z konstrukcją obrabiarki i te związane z procesem skrawania [63]. Do metod związanych z konstrukcją obrabiarki można zaliczyć [84, 85]:

- zapewnienie odpowiedniej sztywności,
- dobór mas, masowych momentów bezwładności i odpowiedniego ich rozkładu,
- zapewnienie odpowiedniego tłumienia drgań (konstrukcyjnego i materiałowego),
- zastosowanie w układzie podatnego elementu o wysokiej częstotliwości własnej i możliwie wysokim tłumieniu (zasada „łabędziej szyi”),
- dobór odpowiednich luzów i wykorzystanie nieliniowości elementów układu,
- odpowiednie posadowienie eliminujące wpływ zakłóceń przenoszonych przez fundament z otoczenia.

Natomiast do metod związanych z procesem skrawania można przypisać [84, 85]:

- wykorzystanie odpowiedniej orientacji przestrzennej,
- zapewnienie dogodnych położeń elementów konstrukcyjnych,
- optymalizacja warunków skrawania,
- zastosowanie nierównomiernej podziałki wieloostrzowych narzędzi skrawających;

- modulacja prędkości obrotowej napędu głównego,
- zastosowanie elementów podporowych (np. podtrzymek, okularów itp.).

Jedną z wyżej wymienionych metod jest zapewnienie odpowiedniego tłumienia drgań zarówno pod kątem konstrukcyjnym, jak i materiałowym. Do tej pory materiałem powszechnie stosowanym w dziedzinie konstrukcji obrabiarek było żeliwo ze względu na bardzo dobre właściwości tłumiące drgania. Najnowsze badania oraz trendy rozwojowe pokazują, że w dziedzinie konstrukcji odlewanych korpusów obrabiarkowych istnieje wyraźna tendencja odchodzenia od tradycyjnych odlewów żeliwnych, w kierunku odlewów mineralnych, ze względu na jeszcze lepsze właściwości dynamiczne.

Rozwiązaniem, w którym można wykorzystać zalety tradycyjnego materiału konstrukcyjnego (żeliwa) oraz nowoczesnych odlewów mineralnych jest równoczesne zastosowanie obu materiałów w konstrukcji odlewanych korpusów obrabiarek. Taki sposób konstrukcji dużych elementów obrabiarki np. łóż, wymaga zachowania pewnych zasad i procedur technologicznych, aby skutecznie wyeliminować lub zminimalizować wady obu materiałów, a jednocześnie zapewnić możliwie efektywne wykorzystanie ich zalet. Zarówno możliwości technologiczne, jak i ograniczenia wynikające z właściwości materiałów zastosowanych w tzw. metodzie konstrukcji hybrydowych korpusów maszyn zostały w niniejszej pracy poddane wnikliwej analizie.

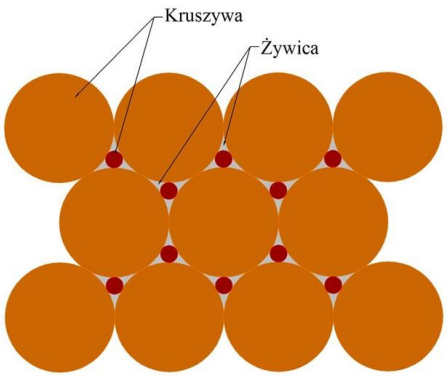
2. Analiza literatury

W 1944 roku firma Boehringer jako pierwsza zbudowała łoże tokarki z materiału ceramicznego zwanego betonem cementowym. Od tego czasu podjęto szereg prób łączenia betonowych elementów obrabiarki, które najczęściej stanowiły podstawę maszyny, z korpusami pozostałych mechanizmów wykonanymi z żeliwa. Przy takim sposobie połączenia beton nie miał wypływu na dokładność obrabianego elementu [64]. W 1988 r. japoński naukowiec Sugishita wraz z grupą współpracowników skonstruował centrum obróbcze zbudowane z łoża i kolumn wykonanych z cementu portlandzkiego, połączonych z żeliwnymi płytami [87]. Sztywność statyczna takiej konstrukcji była porównywalna ze sztywnością konstrukcji żeliwnej.

W 1983 roku w firmie Emil Prinzig zastosowano wypełnienie stalowych ram betonem o spoiwie hydraulicznym, co wpłynęło na poprawę właściwości statycznych, dynamicznych oraz termicznych takiej konstrukcji. W dzisiejszych czasach nowe technologie wykorzystujące nanostruktury są stosowane do wytwarzania bardzo wytrzymałych materiałów betonowych (np. UHPC). Ten materiał jest stosowany do budowy ram maszyn bez konieczności odlewania różnych części z metalu [81]. W odróżnieniu od zwykłego betonu wykonanego z cementu, wody i kruszyw, UHPC zawiera dodatki w postaci mikrokrzemionek, popiołu lotnego lub superplastyfikatorów.

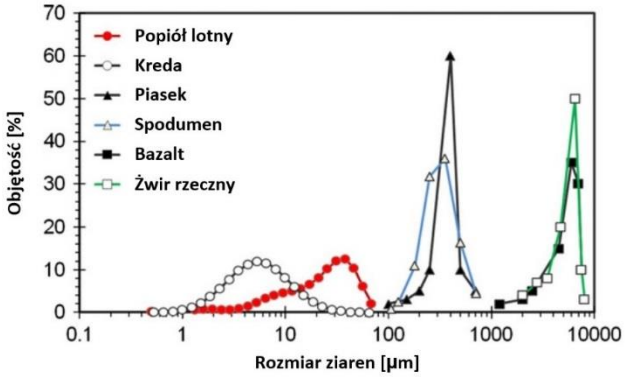
Od lat 70. XX w., kiedy zaczęto używać żywic utwardzanych na zimno, pojawiła się możliwość produkcji odlewów mineralnych lub betonów polimerowych na ramy maszyn do obróbki precyzyjnej.

Odlew mineralny (PC – polymer concrete, polimerobeton) jest to złożony materiał składający się z drobnych ziaren nieorganicznych kruszyw, takich jak bazalt, spodumen, popiół lotny, żwir rzeczny, piasek, kreda itd. połączonych ze sobą żywicą (najczęściej epoksydową) [1, 28, 93]. Stosunek objętościowy wypełniacza (kruszyw) do spoiwa (żywicy) zwykle wynosi około 9÷1 [12]. Na rysunku 1 przedstawiono przykładową strukturę odlewu mineralnego uwzględniającą względne wielkości ziaren poszczególnych kruszyw, natomiast nieuwzględniającą ich kształtu [40, 45, 47, 49].



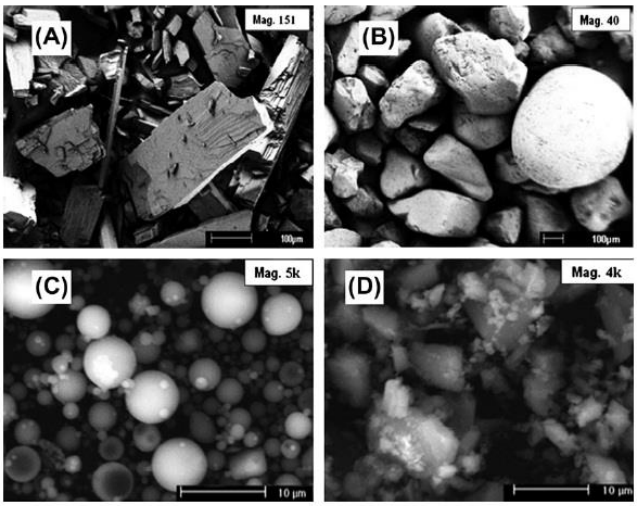
Rysunek 1. Przykładowa struktura odlewu mineralnego uwzględniająca wielkości ziaren kruszyw [40, 45, 47, 49]

W zależności od rodzajów zastosowanych kruszyw ziarna w odlewie mineralnym mogą mieć rozmiar od dziesiątych części mikrometrów do około dziesięciu milimetrów [28] (rysunek 2).



Rysunek 2. Wykres zależności udziału procentowego kruszyw od ich rozmiaru [28]

Za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM) zostały wykonane obrazy prezentujące widoki poszczególnych kruszyw (rysunek 3) [28].



Rysunek 3. Widoki poszczególnych kruszyw [28]
A – spodumen, B – piasek, C – pył lotny, D – kreda

Zależnie od rodzaju i wymiaru użytych kruszyw oraz ilości żywicy utwardzenie może trwać od kilku minut do kilku godzin. Proces utwardzania zachodzi w temperaturze pokojowej. W zależności od wymagań dotyczących osiąganej precyzji, tolerancji wymiarowych, chropowatości powierzchni odlewy mineralne można wykonywać w formach drewnianych, plastikowych, metalowych, żeliwnych lub kombinowanych [21]. Obszerny opis cementów polimerowych, odlewów mineralnych

oraz żywic wykorzystywanych w procesach odlewniczych kompozytów na osnowie ceramicznej został umieszczony w pracach [3, 4, 6, 13, 17, 18, 34, 35, 55, 79, 82, 83].

Obecne trendy rozwoju konstrukcji obrabiarek obejmują stosowanie odlewów mineralnych zamiast odlewów żeliwnych [8, 33, 54, 56, 69, 71, 80]. W niektórych przypadkach, np. w przemyśle precyzyjnym, stosuje się odlewy mineralne tylko na wybrane podzespoły obrabiarek, np. prowadnice. Spowodowane jest to nieodpowiednimi właściwościami wytrzymałościowymi odlewów mineralnych [21, 23]. W innych przypadkach obróbki skrawaniem, gdzie dokładność wykonania przedmiotu nie musi być tak wysoka, a względy wytrzymałościowe na to pozwalają, stosuje się nawet całe łoża wykonane z odlewu mineralnego [11, 88].

Podczas obróbki materiałów trudnoobrabialnych wymagana jest wysoka sztywność układu Obrabiarka-Uchwyt-Przedmiot-Narzędzie [37]. Z tego punktu widzenia proces konstruowania elementów korpusów obrabiarek, jak i same materiały konstrukcyjne odgrywają dużą rolę [38]. Kilka materiałów takich jak siatkobeton, beton hydrauliczny czy beton polimerowy zostały przebadane w porównaniu do tradycyjnie używanych materiałów (odlew żeliwny i stal) [15, 24, 53, 66, 77]. Spośród nich beton polimerowy okazał się najlepszy pod względem tłumienia drgań, wysokiej sztywności oraz bardzo dobrej stabilności termicznej.

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe właściwości mechaniczne odlewów żeliwnych i mineralnych [21, 32, 40, 54, 72, 97].

Tabela 1. Właściwości mechaniczne odlewów żeliwnych i mineralnych

	Jednostka	**Odlewy żeliwne**	**Odlewy mineralne**
Wytrzymałość na ściskanie	MPa	600-1000	≤ 100
Wytrzymałość na rozciąganie	MPa	410-560	≤ 10
Wytrzymałość na zginanie	MPa	150-400	25-40
Gęstość	kg/m^3	7150-7250	2100-2400
Moduł Young'a	GPa	80-140	15-40
Pojemność cieplna	$J/(kg \cdot K)$	0,5	0,9-1,1
Przewodność cieplna	$W/(m \cdot K)$	45-50	1,3-2
Rozszerzalność cieplna	$10^{-6}/K$	9-12	12-20
Logarytmiczny dekrement tłumienia	---	0,003	0,02-0,03

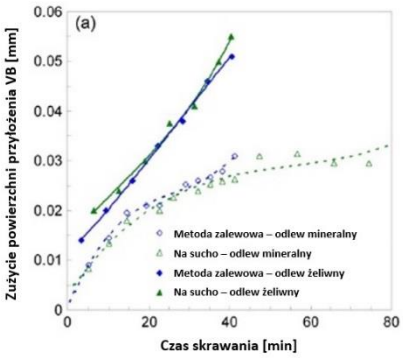
Jak wynika z tabeli 1 odlewy mineralne, jak i odlewy żeliwne posiadają różne wartości wytrzymałości na rozciąganie jak i na ściskanie. Niezależnie od rodzaju spoiwa stosunek wytrzymałości na ściskanie do wytrzymałości na rozciąganie wynosi około 10:1. Bardzo ważną cechą odlewów mineralnych jest także niska gęstość, która jest 3-krotnie mniejsza w porównaniu z odlewami żeliwnymi, co czyni odlewy mineralne relatywnie lekkim materiałem konstrukcyjnym. Właściwości mechaniczne odlewów mineralnych są zależne od temperatury. Przy wzroście temperatury z 20°C do 80°C następuje obniżenie wytrzymałości na ściskanie o 50%. Zjawisko pełzania może występować w zakresie dziesiątych części mikrometrów, jeżeli obciążenia ściskające przekraczają 20% nominalnej wytrzymałości na ściskanie. Przewodność cieplna odlewów mineralnych jest o rząd wielkości mniejsza niż odlewów żeliwnych, pojemność cieplna jest dwa razy

większa, a rozszerzalność cieplna jednych, jak i drugich odlewów jest na podobnym poziomie [21, 40]. Ta ostatnia właściwość ma bardzo istotne znaczenie w kontekście prób łączenia obu materiałów konstrukcyjnych w jednym elemencie nośnym obrabiarki.

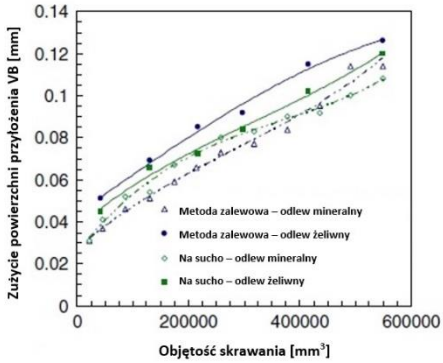
Tłumienie drgań materiału konstrukcyjnego jest jednym z ważniejszych czynników determinujących właściwości dynamiczne maszyn i ma znaczny wpływ na możliwości obróbkowe maszyny technologicznej. Zwykle korpusy maszyn technologicznych są wykonywane z odlewu żeliwnego, który posiada wysoki współczynnik tłumienia drgań. Jednakże procesy odlewania wymagają otwartej struktury i cienkich ścianek, ze względu na możliwość powstania jam skurczowych, co skutkuje m.in. niskimi częstotliwościami rezonansowymi. Dzięki zastosowaniu odlewu mineralnego w procesie technologicznym istnieje możliwość stosowania zamkniętych struktur o grubszych ściankach, co prowadzi do uzyskania wyższych częstotliwości rezonansowych [16].

Przeprowadzono badania obróbki przedmiotów wykonanych ze stali stopowej 39NiCrMo3 w stanie utwardzonym i stali nierdzewnej AISI 420B podczas toczenia wykańczającego w różnych warunkach skrawania (podczas konwencjonalnego chłodzenia metodą zalewową, przy minimalnym wydatku cieczy obróbkowej – MQL oraz na sucho), wykorzystując centrum tokarskie wyposażone w łoże z odlewu mineralnego i żeliwa [11, 12]. Badano wpływ warunków skrawania oraz rodzaju zastosowanego łoża na zużycie narzędzia oraz chropowatość powierzchni po obróbce.

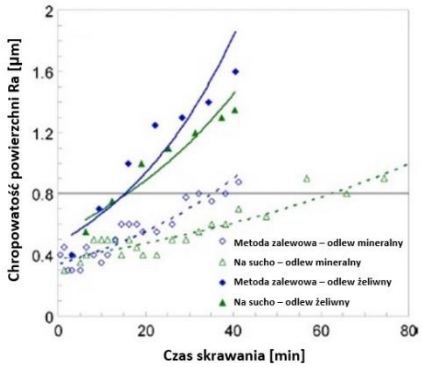
Można zauważyć, że w przypadku obu badanych materiałów zużycie powierzchni przyłożenia narzędzia, jak i chropowatość powierzchni po obróbce były znacznie mniejsze przy zastosowaniu łoża wykonanego z odlewu mineralnego niż przy zastosowaniu łoża żeliwnego (rysunek 4, 5, 6 i 7).



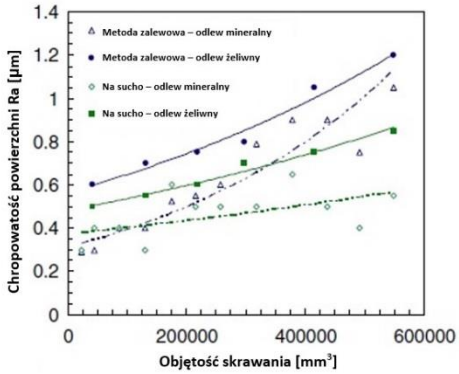
Rysunek 4. Zależność zużycia powierzchni przyłożenia narzędzia w funkcji czasu toczenia dla stali stopowej 39NiCrMo3 w stanie utwardzonym [12]



Rysunek 5. Zależność zużycia powierzchni przyłożenia narzędzia w funkcji usuniętej objętości materiału dla stali nierdzewnej AISI 420B [11]

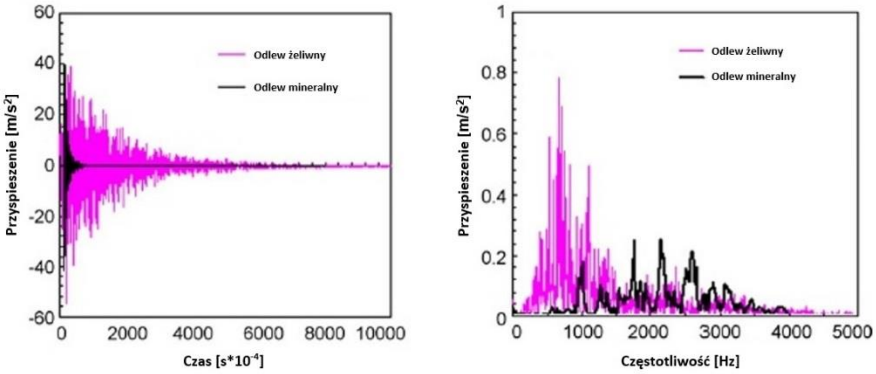


Rysunek 6. Zależność chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego w funkcji czasu toczenia dla stali stopowej 39NiCrMo3 w stanie utwardzonym [12]

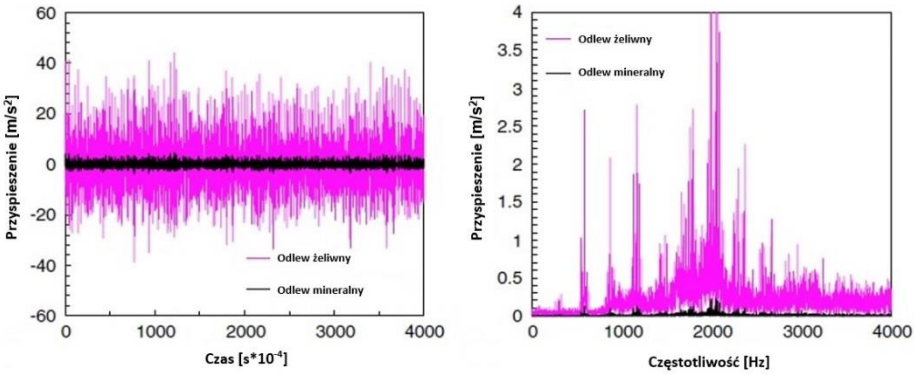


Rysunek 7. Zależność chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego w funkcji usuniętej objętości materiału dla stali nierdzewnej AISI 420B [11]

Takie wyniki wskazywały na znacznie korzystniejsze właściwości dynamiczne obrabiarki przy zastosowaniu łoża wykonanego z odlewu mineralnego. Zdecydowano się przeprowadzić dodatkowe badania właściwości dynamicznych obu obiektów. Korpusy zostały dwukrotnie wzbudzone do drgań. Za pierwszym razem było to pojedyncze, impulsowe wymuszenie dokonane młotkiem modalnym, natomiast drugie wymuszenie było wymuszeniem ciągłym, okresowym. Również tutaj zauważono, że w obu przypadkach znacznie mniejsze amplitudy drgań występują w przypadku zastosowania łoża wykonanego z odlewu mineralnego (rysunek 8 i 9).



Rysunek 8. Zależności przyspieszenia w funkcji czas oraz przyspieszenia w funkcji częstotliwości, przy pojedynczym wymuszeniu młotkiem modalnym [12]



Rysunek 9. Zależności przyspieszenia w funkcji czasu oraz przyspieszenia w funkcji częstotliwości, przy wymuszeniu ciągłym okresowym [11]

Większość literatury naukowej na temat odlewów mineralnych koncentruje się na badaniach właściwości mechanicznych, dynamicznych lub termicznych samego materiału odlewu mineralnego.

Już w latach 90. XX w. podejmowano próby wykorzystania odlewu mineralnego jako materiału konstrukcyjnego w dziedzinie budowy obrabiarek. Kim, Park i Lee przeprowadzili badania wpływu ilości wypełniacza oraz spoiwa na właściwości mechaniczne i termiczne odlewu mineralnego. W swoich badaniach wykorzystali kamienie o różnej wielkości, piasek i żywicę [52].

Lokuge i Aravinthan w swojej pracy badali wpływ popiołu lotnego i różnego rodzaju żywic wchodzących w skład odlewu mineralnego na jego właściwości mechaniczne [59]. Do badań wykorzystano trzy rodzaje żywicy: poliestrową, winylową i epoksydową. Z przeprowadzonych badań można było wywnioskować, że wartość wytrzymałości na ściskanie dla wszystkich trzech rodzajów żywic wynosiła od 90 do 100 MPa. Wartość wytrzymałości na ściskanie osiągnięto na poziomie 15 MPa dla odlewu mineralnego, który wykonano z użyciem żywicy winylowej. Dodatkowo stwierdzono, że:

- dodawanie popiołu lotnego skutkuje zmniejszeniem ilości żywicy w odlewie mineralnym i wzrostem wytrzymałości na ściskanie dla wszystkich rodzajów wykorzystanych żywic,
- plastyczność odlewu mineralnego wzrasta wraz ze zmniejszeniem ilości popiołu lotnego dla wszystkich rodzajów wykorzystanych żywic,
- moduł Young'a wzrasta wraz ze wzrostem ilości popiołu lotnego dla wszystkich rodzajów wykorzystanych żywic,
- wartości wytrzymałości na rozciąganie oraz wytrzymałości na zginanie maleją wraz ze wzrostem ilości popiołu lotnego dla wszystkich rodzajów wykorzystanych żywic.

Dzięki bardzo dobrym właściwościom tłumiącym drgania, wysokiej adhezji i szybkiemu utwardzeniu odlewy mineralne są wykorzystywane do produkcji łóż dla urządzeń do obróbki precyzyjnej. Współczynnik rozszerzalności cieplnej odlewu

mineralnego jest jednym z głównych parametrów, który może mieć znaczny wpływ na dokładność w tego typu obrabiarkach. Haddad i Al Kobaisi w swojej pracy szukali optymalnego składu odlewu mineralnego, dla którego podczas prób otrzymano największe wartości wytrzymałości na zginanie oraz najmniejsze wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej [28]. Próbki były wykonane przy użyciu 83% wypełniacza (kruszyw) i 17% spoiwa (żywicy). Wstępny, optymalny skład, który został uzyskany to bazalt, spodumen i popiół lotny. Bazalt, piasek i popiół lotny to skład, który uzyskał drugie w kolejności najlepsze wyniki obu prób. Dalsze badania polegały na znalezieniu optymalnego ze względu na właściwości wytrzymałościowe i cieplne udziału procentowego kruszyw i spoiwa w odlewie mineralnym. Przygotowano 3 próbki o różnym udziale procentowym żywicy: 17%, 15% i 13%. Okazało się, że najlepszym rozwiązaniem pod względem rodzaju ziaren wchodzących w skład odlewu mineralnego, jak i stosunku procentowego wypełniacza do spoiwa był bazalt, piasek i popiół lotny, w którym 87% stanowiły kruszywa, a 13% spoiwo.

Cortes i Castillo w swojej pracy badali moduł zespolony odlewu mineralnego oraz odlewu żeliwnego i porównywali ich zachowanie dynamiczne w zakresie częstotliwości do 160 Hz [16]. Została zastosowana metoda, w której wykorzystano belkę zawieszoną na dwóch linach oraz badano odpowiedzi tego prostego układu dynamicznego w stanach nieustalonych. W odróżnieniu od techniki logarytmicznego dekrementu tłumienia, w zaproponowanej metodzie wykorzystano setki punktów pomiarowych w celu identyfikacji układu oraz zastosowano krzywą interpolacyjną wg metody Nelder-Mead'a (sympleksowa metoda spadku). Z przeprowadzonych badań wywnioskowano, że odlew mineralny posiada znacznie lepsze właściwości tłumiące niż żeliwo. Dodatkowo stwierdzono, że odlew mineralny utrzymuje tłumienie w bardzo szerokim zakresie częstotliwościowym, podczas gdy tłumienie w żeliwie jest efektywne tylko w małym zakresie częstotliwościowym.

Orak w swojej pracy badał różne kombinacje wykonywania odlewów mineralnych wykorzystywanych do produkcji łóż obrabiarek w odniesieniu do ich właściwości tłumiących drgania [67]. Próbki do badań zostały wykonane z wykorzystaniem takiej samej ilości spoiwa (żywicy poliestrowej), natomiast z różną ilością wypełniacza (kwarcu). Wyniki zostały porównane z rezultatami otrzymanymi dla próbek wykonanych z żeliwa. Zaobserwowano, że współczynnik tłumienia w przypadku odlewu mineralnego jest od 4 do 7 razy większy niż w przypadku odlewu żeliwnego.

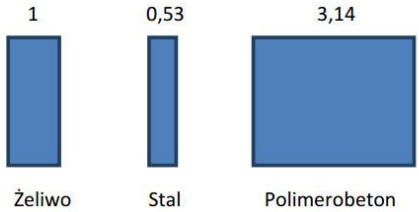
Oprócz literatury, w której prowadzono badania nad właściwościami odlewów mineralnych można znaleźć również taką, w której podejmowano próby stosowania odlewów mineralnych na różnego rodzaju elementy z dziedziny konstrukcji obrabiarek.

Kim, Park i Lee po przeprowadzeniu badań wpływu ilości wypełniacza oraz spoiwa na właściwości mechaniczne i termiczne, a także ustaleniu optymalnego ze względu na właściwości wytrzymałościowe składu odlewu mineralnego wykonali łoże szlifierki całkowicie z odlewu mineralnego i poddali je badaniom [52].

Vrtanoski i Dukovski w swojej pracy zamodelowali i przeprowadzili analizę strukturalną korpusu wrzeciona tokarki CNC, która została wykonana z różnych materiałów konstrukcyjnych (żeliwa i odlewu mineralnego) [97]. Podczas badań

statycznych nie otrzymano znacznej poprawy właściwości mechanicznych, jednakże na podstawie wyników badań dynamicznych wykazano znaczną poprawę właściwości dynamicznych (współczynnika tłumienia drgań), co najlepiej odwzorowywały wykresy częstotliwości poszczególnych postaci drgań własnych.

Praźmo i Sobczak w swojej pracy rozważali możliwość zastosowania odlewu mineralnego jako materiału do budowy korpusów obrabiarek wodno-ściernych [72]. Stwierdzili, że parametry wytrzymałościowe polimerobetonu są mniej korzystne w porównaniu do stali i żeliwa, co przy mniejszym module Younga powoduje, że aby otrzymać odpowiednią sztywność statyczną konstrukcji polimerobetonowych należy ją odpowiednio zaprojektować (dobrać odpowiednią grubość ścianek). Porównanie przykładowych przekrojów belek o tej samej sztywności z różnych materiałów przedstawiono na rysunku 10.



Rysunek 10. Porównanie przykładowych przekrojów belek o tej samej sztywności z różnych materiałów konstrukcyjnych [72]

Jak wynika z porównania proporcji przekrojów, aby uzyskać sztywność korpusu polimerowego analogiczną do korpusu żeliwnego masy obydwu konstrukcji będą zbliżone (gęstość polimerobetonu jest trzykrotnie mniejsza niż żeliwa), mimo że grubość ścianki korpusu wykonanego z polimerobetonu jest ponad 3-krotnie większa od grubości ścianki wykonanej z żeliwa.

Najnowsza literatura naukowa w temacie omawianego problemu donosi, że podejmowane są próby obróbki materiałów mineralnych oraz ceramicznych [37, 38, 50, 51]. Możliwość wykorzystania odlewów mineralnych w dziedzinie konstrukcji maszyn jest wciąż świeżym i aktualnym tematem. Liczba prac naukowych prowadzonych w tej tematyce jest znikoma, a prace są trudnodostępne, głównie ze względu na to, że prace badawcze prowadzone przez firmy produkcyjne są objęte klauzulą poufności.

Z przeprowadzonej analizy literatury wynika, że odlewy mineralne, pomimo niskich właściwości mechanicznych, posiadają bardzo dobre właściwości dynamiczne. Współczynnik tłumienia drgań w przypadku materiału odlewu mineralnego może być nawet do 10 razy wyższy niż w przypadku tradycyjnych odlewów żeliwnych. Pomimo trzykrotnie niższej gęstości odlewu mineralnego, aby uzyskać podobną sztywność statyczną korpusu żeliwnego i mineralnego, masy obu korpusów są do siebie zbliżone (konieczne jest ok. trzykrotne pogrubienie ścianki w przypadku odlewu mineralnego). Dodatkowo na podstawie analizy literaturowej stwierdzono, że większość przeprowadzonych badań w tematyce odlewów mineralnych była skoncentrowana na ustaleniu optymalnego składu takiego odlewu, dla którego uzyskiwano najlepsze właściwości mechaniczne, dynamiczne lub termiczne. Występuje natomiast bardzo mało informacji

naukowych na temat stosowania odlewów mineralnych w dziedzinie konstrukcji maszyn. Były realizowane próby zastosowania odlewu mineralnego np. na prowadnice obrabiarek, korpusy wrzecion czy nawet całe łoża, jednakże nigdzie w literaturze nie natrafiono na próby łączenia odlewów mineralnych z innymi materiałami konstrukcyjnymi, co stało się inspiracją do podjęcia badań przedstawionych w niniejszej pracy.

3. Cel i plan badań

Na podstawie przeprowadzonej analizy literatury stwierdzono, że temat łączenia odlewów mineralnych z innymi materiałami konstrukcyjnymi w dziedzinie budowy obrabiarek nie jest naukowo opracowany w sposób wyczerpujący.

Uznano, że wykorzystanie takiego hybrydowego połączenia może przynieść efekt w postaci polepszenia właściwości dynamicznych konstrukcji, czyli podwyższenia współczynnika tłumienia drgań przy zachowaniu wymaganych właściwości wytrzymałościowych korpusu obrabiarki.

Badania tradycyjnego i hybrydowego łoża obrabiarki zostały podzielone na część teoretyczną i część doświadczalną. W części teoretycznej zostały zaplanowane następujące zadania:

- stworzenie w systemie CAD trójwymiarowego modelu korpusu obrabiarki,
- przeprowadzenie teoretycznej analizy modalnej żeliwnego korpusu obrabiarki,
- przeprowadzenie teoretycznej analizy modalnej hybrydowego korpusu obrabiarki,
- przeprowadzenie teoretycznej analizy modalnej mineralnego korpusu obrabiarki o grubości ścianek odpowiadającej grubości ścianek korpusu żeliwnego,
- przeprowadzenie teoretycznej analizy modalnej mineralnego korpusu obrabiarki o grubości ścianek wynikającej z warunku porównywalnej sztywności statycznej konstrukcji mineralnej i żeliwnej,
- przeprowadzenie statycznej analizy sztywności wybranych modeli korpusów obrabiarki.

W części doświadczalnej badań zaplanowano:

- badania właściwości mechanicznych odlewów mineralnych,
- przeprowadzenie eksperymentalnej analizy modalnej żeliwnego korpusu obrabiarki w kierunku poprzecznym, wzdłużnym i pionowym,
- przeprowadzenie eksperymentalnej analizy modalnej hybrydowego korpusu obrabiarki w kierunku poprzecznym, wzdłużnym i pionowym,
- przeprowadzenie eksperymentalnej, statycznej analizy sztywności żeliwnego korpusu obrabiarki,
- przeprowadzenie eksperymentalnej, statycznej analizy sztywności hybrydowego korpusu obrabiarki.

Po przeprowadzonych badaniach zaplanowano zestawienie i porównanie ze sobą wyników badań otrzymanych teoretycznie i eksperymentalnie w celu sformułowania wniosków na temat hybrydowej konstrukcji korpusu obrabiarki.