

Jan KOSMOL

Politechnika Śląska, Wydział Mechaniczny Technologiczny, Katedra Budowy Maszyn

e-mail: jan.kosmol@polsl.pl

Zastosowanie polimerobetonów w budowie korpusów obrabiarek

Streszczenie: W artykule przedstawiono wymagania stawiane korpusom obrabiarkowym w świetle rozwoju obrabiarek do obróbki szybkościowej. Stwierdzono konieczność zastosowania nowoczesnych materiałów konstrukcyjnych, takich jak polimerobeton. Omówiono własności mechaniczne dostępnych na rynku polimerobetonów w kontekście wymagań stawianych obrabiarkom HSC (High Speed Cutting). Dokonano porównania właściwości eksploatacyjnych obrabiarek wykorzystujących głównie żeliwo szare i stale z nowymi konstrukcjami obrabiarek, wykorzystujących tzw. struktury hybrydowe, czyli wykorzystujących zarówno żeliwo czy stal z polimerobetonem. Przedstawiono wyniki badań symulacyjnych przykładowego korpusu żeliwnego i hybrydowego.

Słowa kluczowe: polimerobeton, korpus, obrabiarka

APPLICATION OF POLYMER CONCRETE IN MACHINE TOOLS DESIGN

Summary: The paper presents requirements of machine frames for the point of view of machine tools development. It was confirmed necessity of application of modern materials like Polymer Concrete (PC). Mechanical properties of market availability Polymer concrete were analyzed for the point of view of requirements of HSC machine tools. Exploitation properties of grey cast iron, steel and so called hybrid structures (grey cast iron or steel plus polymer concrete) used in machine design were compared. Some simulation results, using FEM, for grey cast iron frame and hybrid frame was shown.

Keywords: polymer concrete, corps, machine tool

1. WPROWADZENIE

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

Dotychczas, podstawowym materiałem w budowie korpusów obrabiarkowych jest żeliwo szare. Głównie z powodu dobrych własno-

ści tłumiących drgania i stosunkowo niskiego kosztu materiałowego. Spotyka się też korpusy stalowe (spawane), ale gorsze własności tłumiące drgania, wyższy koszt materiałowy, gorsza stabilność wymiarowa ograniczają ich stosowanie do maszyn o niższych wymaganiach dokładnościowych.

Jednym z milowych kroków w rozwoju materiałów do budowy obrabiarek stało się opatentowanie w 1957r przez szwajcarskiego producenta obrabiarek F. Studera materiału nazwanego Polymer Concrete (PC) [5], czyli polimerobetonu, o nazwie własnej Granitan [4]. Można to uznać za początek stosowania nowego materiału w budowie korpusów obrabiarkowych. W późniejszym czasie pojawiły się inne materiały, które kwalifikują się do polimerobetonów. Granitan zawierał ok. 80% cząstek stałych i ok. 20% żywicy. Drugą, znaczącą grupą polimerobetonów to materiał Philly-cast opracowany, przez ITW Philadelphia Resins [5], w którym udział cząstek stałych wynosił ponad

90%. Ponieważ własności polimerobetonu zależą od rodzaju cząstek stałych, od ich rozmiarów, od rodzaju żywicy, od % udziału cząstek stałych i żywicy, w miarę upływu czasu pojawiały się kolejne odmiany polimerobetonów.

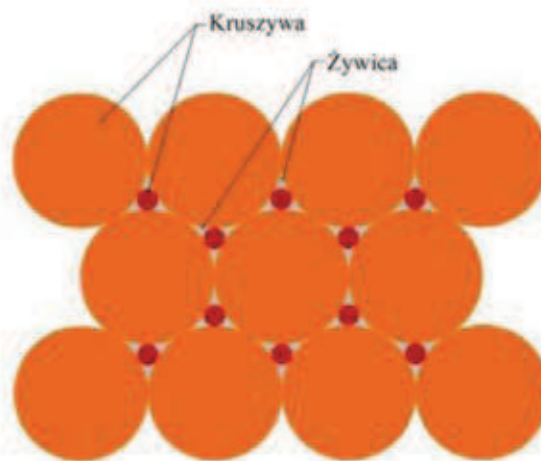
2. WŁASNOŚCI MECHANICZNE POLIMEROBETONU

Polimerobeton (Polimer Concrete) z formalnego punktu widzenia jest mieszaniną kruszywa (cząstek stałych) i wypełniacza pełniącego rolę spoiwa. Na Rys. 1 przedstawiono hipote-

tyczną strukturę takiej mieszaniny. Istotne jest to, że najkorzystniejsze efekty, z punktu widzenia materiału na korpusy obrabiarek, jest taka struktura cząstek stałych, w której można wyróżnić cząstki o dużych wymiarach (8-20 mm) i bardzo małych ($\ll 5$ mm).

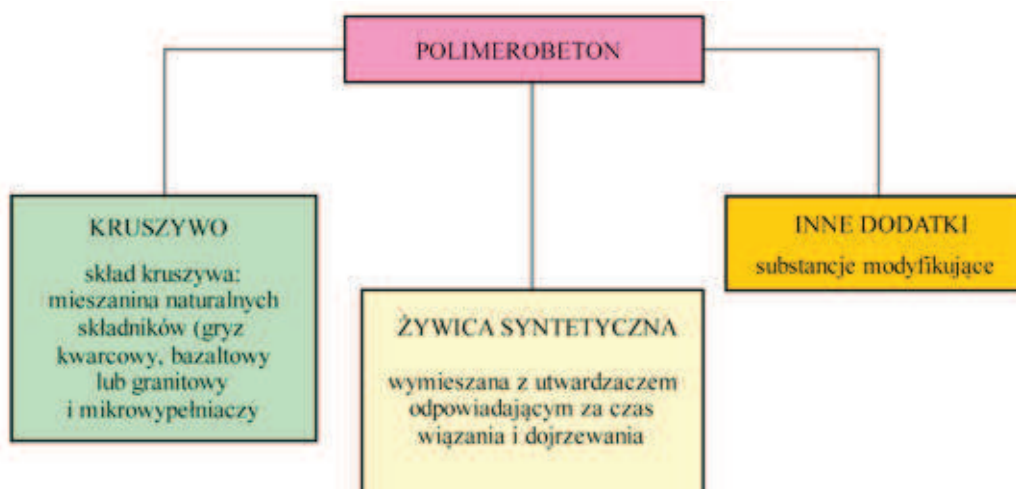
Z punktu widzenia materiałów tworzących polimerobeton, można posłużyć się Rys. 2, który dobrze obrazuje różnorodność tworzyw składających się na polimerobeton.

Kruszywo (cząstki stałe) to mieszaniny naturalnych składników jak granitu (najdroższy), kwarcu, piasku i innych. Żywice syntetyczne



Rys. 1. Hipotetyczna struktura polimerobetonu

Fig. 1. Hypothetical structure of the polymer



Rys. 2. Podstawowe składniki polimerobetonu [7]

Fig. 2. Basic components of polymer concrete [7]

to żywice epoksydowe, poliestrowe, metakrylowe i inne. Poza tym, występują jeszcze inne dodatki, które modyfikują własności polimerobetonu. W Tab. 1 przedstawiono najważniejsze własności mechaniczne polimerobetonu w porównaniu do własności żeliwa szarego i stali. Uwzględniono jedynie te cechy, które decydują o właściwościach korpusów.

Polimerobeton ma wielokrotnie mniejszy moduł Younga w porównaniu do stali (ok. 7 razy) i żeliwa (ok. 2-4 razy), co oznacza, że jest bardziej podatny na działanie obciążeń. Jest też znacznie mniej odporny na zginanie, co w wielu wypadkach eliminuje możliwość tworzenia korpusu tylko z polimerobetonu. W takich przypadkach, korpus powinien być stalowy czy żeliw-

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

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

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

Z ekonomicznego punktu widzenia na podkreślenie zasługuje niski koszt jednostkowy polimerobetonu (ok. dwukrotnie niższy niż żeliwa i trzykrotnie niższy niż stali) oraz niska gęstość (ok. trzykrotnie niższa niż stali i żeliwa). Ponadto, koszty energii związane z procesem technologicznym korpusu są w przypadku polimerobetonu 5-6 razy niższe niż w przypadku żeliwa czy stali.

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

ny i dodatkowo wypełniony polimerobetonem.

Analiza literatury dotyczącej polimerobetonów, np. [2], [3] pozwala na sformułowanie następujących ogólnych wniosków:

1. Własności polimerów bardzo istotnie zależą od cząstek stałych i ich rozdrobnienia (wielkości cząstek).
2. Własności polimerobetonu zależą istotnie od rodzaju żywic. Dominują żywice epoksydowe, jakkolwiek, w pewnych specyficznych przypadkach, spotyka się i inne.
3. Bardzo silny wpływ na własności polimerobetonów posiada udział masowy kruszywa. Można mówić o pewnym optymalnym udziale objętościowym na poziomie 80%, jakkolwiek, spotyka się polimerobeton z większym udziałem (ponad 90%).

4. Jako inne dodatki (substancje modyfikujące) stosuje się wzmacniacze w postaci włókien stalowych, szklanych, polipropylenowych, nylonowych i inne. Wpływają one znacząco na wytrzymałość polimerobetonu na ściskanie i zginanie oraz na pękanie.

5. W [2] przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w 12 instytucjach badawczych wpływu wzmacniaczy (włókien) dla różnych kruszyw i wypełniaczy. Te badania pozwoliły na sformułowanie poglądu o najlepszym udziale objętościowym kruszyw na poziomie 75-80% a wypełniaczy o udziale masowym 10-20%.

6. W [2] przedstawiono wyniki badań z 22 ośrodków badawczych o wpływie kruszyw, wypełniaczy i wzmacniaczy na własności mechaniczne polimerobetonów. Najkorzystniejsze okazują się wypełniacze epoksydowe. Za najkorzystniejsze wzmacniacze uznano włókna szklane. Stwierdzono ponadto, że dodanie niewielkich ilości popiołu (do 15%) podnosi wytrzymałość nawet o 30%. Najlepszy skład cząstek kruszywa jest wtedy, kiedy duże cząstki mieszczą się w przedziale 8-20 mm a małe, poniżej 5 mm.

7. Artykuł [3] dotyczy przede wszystkim badań logarytmicznego dekrementu i współczynnika tłumienia drgań. Porównano te wielkości dla próbek żeliwnych i próbek z polimerobetonu, który składał się z cząstek granitu i wypełniacza epoksydowego. Badaniu poddano wpływ udziału żywicy i wielkości ziaren cząstek stałych. Najkorzystniejsze efekty dotyczące tłumienia drgań uzyskano kiedy udział żywicy nie przekraczał 20%, a ziarna granitu zawierały się w przedziale 0,5 - 8 mm. Logarytmiczny dekrement drgań dla takiego polimerobetonu był nawet 3-krotnie wyższy niż dla żeliwa, a współczynniki tłumienia wynosiły odpowiedni 1,48% dla polimerobetonu i 0,418% dla żeliwa, czyli różniły się ponad 3-krotnie.

Ogólny wniosek z analizy literatury dotyczącej struktury i składu polimerobetonu jest jednak taki, że uzyskanie materiału o korzystniejszych własnościach eksploatacyjnych niż żeliwo, wymaga dużej wiedzy i doświadczenia.

3. POLIMEROBETON W BUDOWIE OBRABIAREK

Elementami obrabiarek szczególnie wrażliwymi na rodzaj materiału konstrukcyjnego są korpusy. Wynika to z ich zadań jak i znaczącego wpływu na koszt wytworzenia obrabiarki. Korpusom obrabiarek stawia się następujące wymagania:

- Kształty i wymiary korpusów oraz ich połączeń nie ulegają zmianom w czasie eksploatacji obrabiarki.

- Dokładność geometryczna zapewniająca właściwe, wzajemne położenia powierzchni korpusu. Dokładność wykonania powinna zapewnić zmieszczenie się w granicach przyjętych błędów prostoliniowości i równoległości danych powierzchni – np. w przypadku prowadnic.

- Duża sztywność statyczna i dynamiczna – minimalizowanie wpływu odkształceń na dokładność obróbki.

- Dobre właściwości tłumienia drgań.
- Niewielkie odkształcenia termiczne.
- W przypadku korpusów zespołów przesuwnych wymaga się jak najmniejszych mas.

- Ergonomiczność konstrukcji – łatwa obsługa narzędzi i przedmiotów obrabianych – ma to istotne znaczenie w przypadku automatyzacji stanowiska obróbkowego.

- Spełnianie wymagań BHP.
- Minimalne koszty wytworzenia.
- Odporność na działanie korozji.

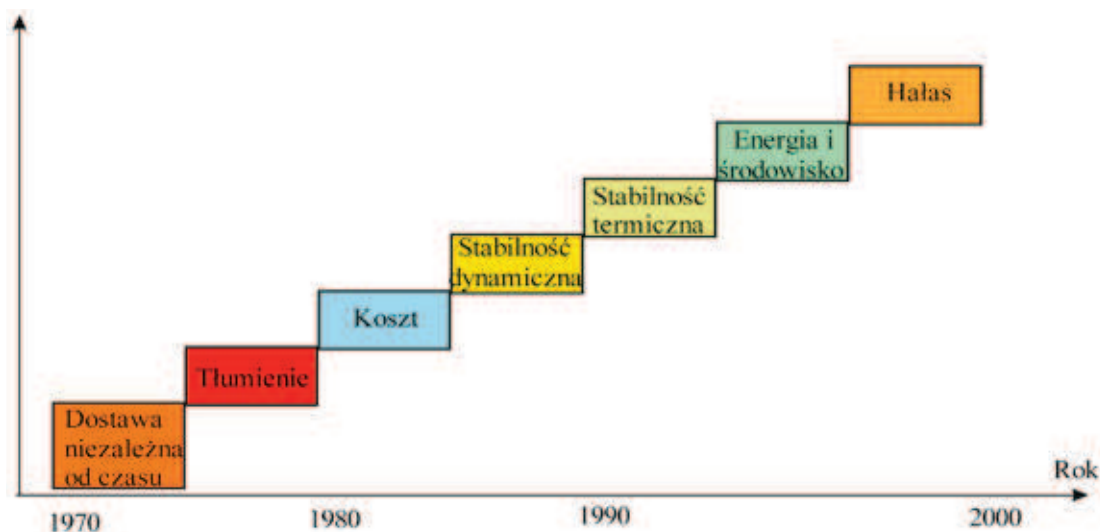
W dalszym ciągu, przedstawione zostaną zalety stosowania polimerobetonu w budowie korpusów na podstawie [4]. Na Rys. 3 przedstawiono bodźce, które przyczyniały się do zastępowania żeliwa i stali polimerobetonem w budowie korpusów.

Dostawa korpusu niezależna od czasu

Wytworzenie odlewu (żeliwnego) korpusu lub jego spawanie (stalowego), sezonowanie oraz obróbka mechaniczna skrawaniem pochłania dużo czasu, najczęściej wyrażanego w miesiącach. Ponadto, najczęściej producent obrabiarki musi te usługi zlecać na zewnątrz (z wyjątkiem

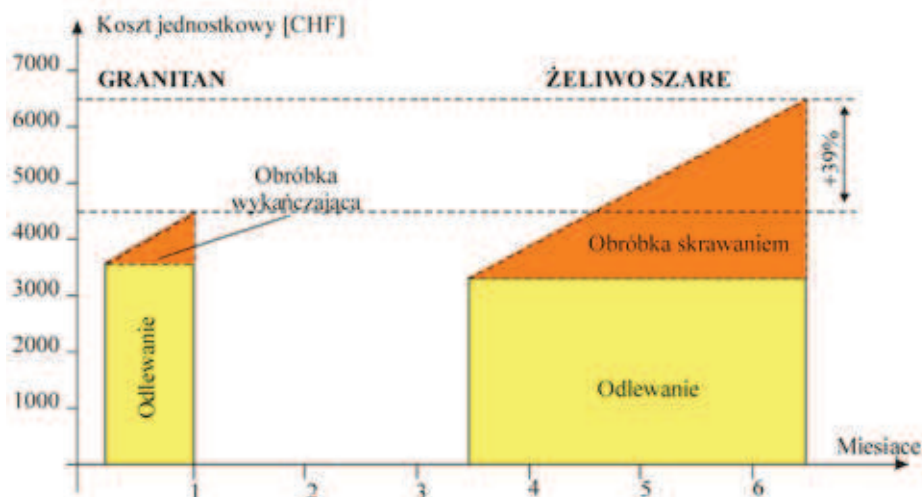
obróbki mechanicznej), z dostatecznie dużym wyprzedzeniem czasowym. W przypadku korpusu polimerobetonowego koszt jego wytworzenia jest ok. 30% niższy niż żeliwnego i w wielu przypadkach, producent obrabiarki może wytworzyć ten korpus w swoim zakładzie. Na Rys. 4 przedstawiono to zagadnienie w odniesieniu do polimerobetonu Granitan, który uważa się za najlepszy polimerobeton dla obrabiarek.

W przemyśle, możliwość skrócenia czasu dostawy korpusu, a także obniżenia kosztu jego wytworzenia, należy do najważniejszych kryteriów wyboru technologii. Z porównania na Rys. 4 wynika, że w tym przykładzie obniżenie kosztu wytworzenia korpusu sięga prawie 40%, natomiast skrócenie czasu jego wytworzenia nawet do 300%. Jeżeli więc korpus polimerobetonowy spełnia wymagania tech-



Rys. 3. Boddce przyczyniające się do zastępowania żeliwa i stali polimerobetonem w budowie korpusów obrabiarkowych [4]

Fig. 3. Incentives contribute to the substitution of cast iron and steel polymer concrete in the construction of machine tool bodies [4]



Rys. 4. Przebieg czasowy i kosztowy wytworzenia korpusu żeliwnego i z polimerobetonu Granitan [4]

Fig. 4. Time course and cost produce cast iron body and the polymer concrete Granitan [4]

niczne, to zastąpienie żeliwa wydaje się bezdyskusyjne. Z Rys. 3 wynika, że skrócenie czasu dostawy korpusu było pierwszym kryterium zastąpienia żeliwa polimerobetonem.

Poprawa własności tłumiących

W obróbce skrawaniem drgania odgrywają niezwykle istotną rolę, jeżeli chodzi o jakość powierzchni obrobionej i trwałość narzędzi skrawających oraz mechanizmów obrabiarki. Właśnie bardzo dobre własności tłumiące żeliwa stały się głównym powodem jego szerokiego stosowania w budowie korpusów.

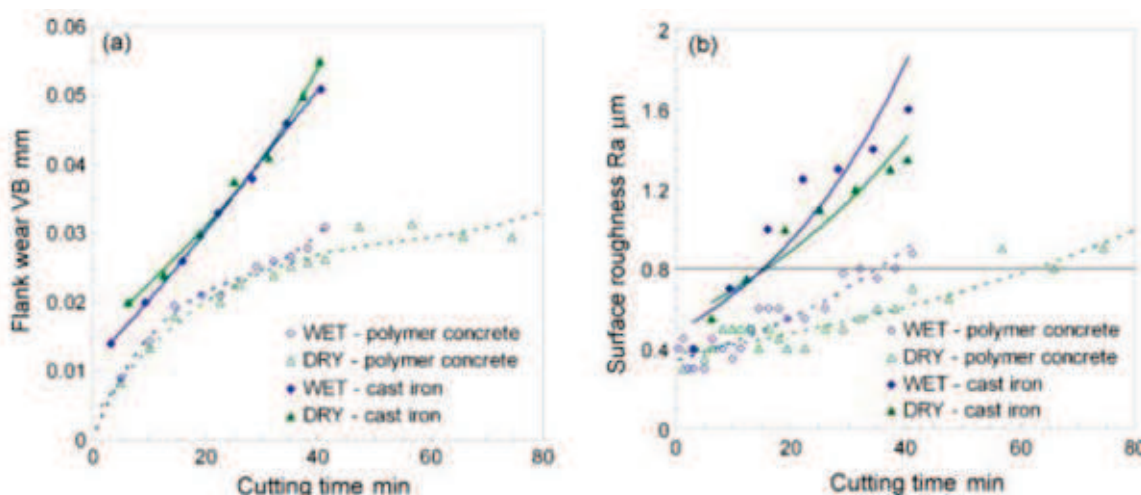
Dane zawarte w Tab. 1 jak i wyniki badań przedstawione w Rozdz. 2 wskazują na wyraźną wyższość polimerobetonu w tłumieniu drgań. W [4] napisano, że polimerobeton epoksydowy

powierzchni w przypadku obrabiarki z łożem z polimerobetonu oraz obrabiarki z łożem z żeliwa [12].

Wnioski z Rys. 5 są jednoznaczne: stosunek czasu pracy narzędzia do umownego zużycia wzrasta w przypadku łoża polimerobetonowego ok. 3 razy a chropowatość powierzchni po upływie takiego samego czasu obróbki jest w przypadku łoża polimerowego ok. 2-krotnie lepsza. Taki stan rzeczy uzasadnia, dlaczego tłumienie drgań było drugim kryterium (po kryterium ekonomicznym) zastępowania korpusów żeliwnych i stalowych polimerobetonowymi.

Poprawa stabilności dynamicznej

Z Rys. 3 wynika, że podniesienie stabilności dynamicznej korpusu jest następnym, po



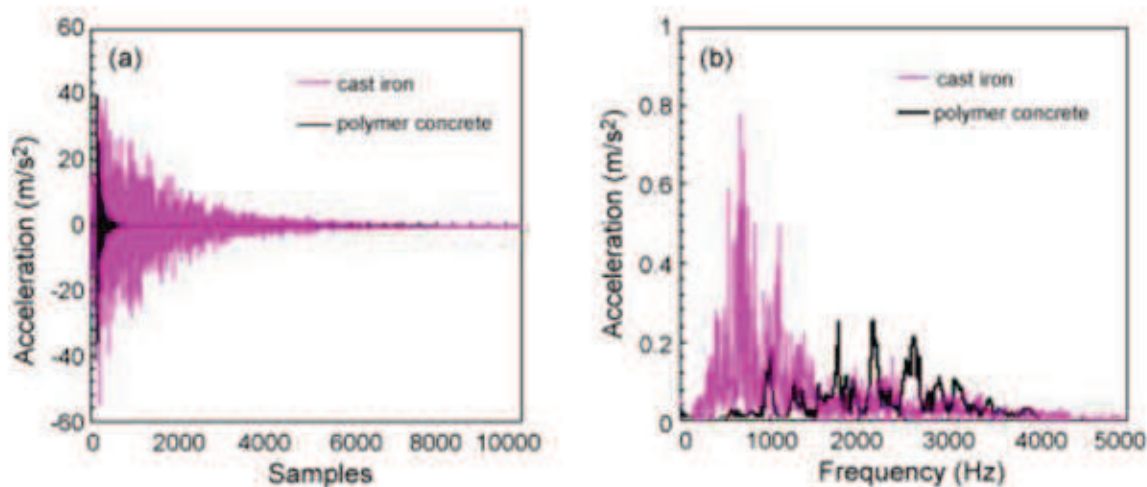
Rys. 5. Przebieg czasowy zużycia ostrza skrawającego (a) i chropowatości powierzchni (b) na obrabiarce z łożem z polimerobetonu i z żeliwa [12]

Fig. 5. Time course wear of cutting tool (a) and surface roughness (b) on the machine with the bed made of polymer concrete and iron [12]

cechuje tłumienie drgań 8-10 razy wyższe niż tłumienie drgań żeliwa szarego czy spawanej stali. Powołując się na własne doświadczenia i informację literaturową Kreienbuhl autor [4] podkreśla, że jakość powierzchni obrobionej (chropowatość) jest o ok. 30% lepsza w przypadku korpusów polimerobetonowych. Także trwałość narzędzi skrawających wzrasta o ok. 30%.

Na Rys. 5 przedstawiono wyniki badań zużycia ostrza skrawającego i chropowatości

tłumieniu drgań i koszcie wytworzenia korpusu, kryterium przemawiającym za korpusami polimerobetonowymi. Korpusy przejmują wszystkie siły i drgania występujące w trakcie obróbki, wynikające z otoczenia (np. drgania sąsiednich maszyn). Stabilność dynamiczna obrabiarki nie wynika z wytrzymałości lub masy, ale przede wszystkim ze stosunku sztywności do masy. Wzrost masy przyczynia się do pogorszenia stabilności dynamicznej,



Rys. 6. Przebieg sygnałów z czujników przyspieszeń w przypadku obrabiarki z łóżem żeliwnym i polimerobetonowym (a) i widma drgań (b) [12]

Fig. 6. Course of signals from the acceleration sensors for the machine tool bed and iron polimerobetonowym (a) and the vibration spectrum (b) [12]

ponieważ maleje najniższa częstotliwość drgań własnych i wzrasta amplituda drgań wraz ze wzrostem masy. Korpusy polimerobetonowe mają korzystniejszy stosunek sztywności do masy. Taki sam korpus może być wykonany z polimerobetonu o większej sztywności, chociaż o takiej samej masie jak żeliwny. To przemawia za korpusami polimerobetonowymi zamiast stalowych lub żeliwnych.

Na Rys. 6 przedstawiono wyniki badań drgań (przyspieszeń) w wybranym punkcie obrabiarki wyposażonej w łożo polimerobetonowe i żeliwne. [12]. Wnioski z tego rysunku także są jednoznaczne. Tłumienie drgań (Rys. 6a) jest 8-krotnie intensywniejsze w przypadku łoża polimerobetonowego a maksymalne wartości przyspieszeń (Rys. 6b) dla łoża polimerobetonowego są ok. 4 razy mniejsze. Ponadto, co ważne, pierwsze częstotliwości rezonansowe dla łoża polimerobetonowego są ok. 30% większe.

Poprawa stabilności termicznej.

Jakość obrabiarki oceniana jest przez jej dokładność, ale i powtarzalność. Jeżeli np. temperatura otoczenia zmienia się w trakcie dnia roboczego, to powtarzalność pozycjonowania się pogarsza. Wynika to z dobrych własności

cieplnych żeliwa i stali, tzn. z ich wysokiego współczynnika przewodności i przenikalności cieplnej. Ciepło z zewnątrz szybko wpływa do korpusu, przyczyniając się do jego rozszerzalności cieplnej. Można mówić o krótkiej cieplnej stałej czasowej korpusu z żeliwa lub stali. Natomiast polimerobeton ma złe własności cieplne, tzn. jego współczynnik przenikalności cieplnej jest wg [4] ok. 12 razy mniejszy. W takim przypadku, cieplna stała czasowa jest ok. 3 razy większa niż w przypadku żeliwa. Wchłanianie ciepła do korpusu będzie, więc odbywało się wielokrotnie wolniej.

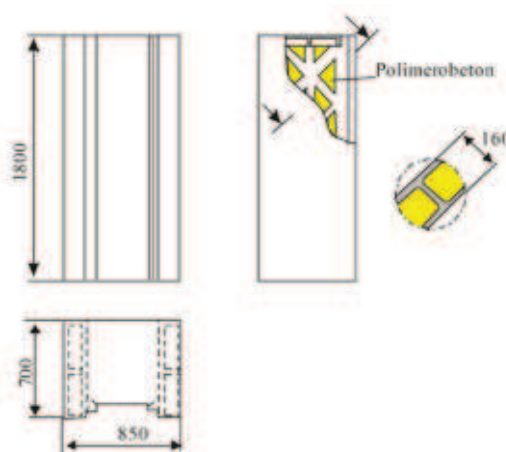
Zmniejszanie liczby operacji technologicznych i zużycia energii.

Proces technologiczny korpusu żeliwnego czy stalowego różni się znacząco od procesu technologicznego korpusu polimerobetonowego. Przede wszystkim liczba operacji w tym drugim procesie jest mniejsza, co najmniej o 50%. Także zużycie energii na wyprodukowanie korpusu żeliwnego w stosunku do polimerobetonowego jest wyraźnie większe. W [4] podano, że odlanie 1 kg żeliwa to koszt energetyczny ok. 7 kWh, a dla odlania 1 kg polimerobetonu to ok. 5 kWh. Dalsza obrób-

ka (kształtowanie) korpusu żeliwnego to ok. 14 kWh a dla polimerobetonowego (Granitan) to ok. 3 kWh. Tak więc zużycie energii na wytworzenie korpusu polimerobetonowego stanowi ok. 1/5 energii na wytworzenie żeliwnego.

Większość doniesień literaturowych dotyczy takich przypadków, kiedy żeliwne łożo obrabiarki zostaje zastąpione łożem polimerobetonowym. Znacznie mniej jest doniesień o wypełnianiu żeliwnych lub stalowych korpusów dodatkowo polimerobetonem, czyli o tworzeniu tzw. korpusów hybrydowych. Jednym z nielicznych doniesień na ten temat jest artykuł [13]. Autorzy porównali własności korpusu szlifierki wykonanej z żeliwa szarego oraz wypełnionego dodatkowo, polimerobetonem (Rys. 7).

2) Dodatkowe wypełnienie korpusu żeliwnego tworzywem polimerobetonowym istotnie zmienia własności dynamiczne korpusu hybrydowego. Rośnie najniższa częstotliwość drgań własnych (w stosunku do korpusu żeliwnego), Rys. 8. W badanym przykładzie, dla łoża, wzrost wyniósł ok. 50% (z 97 Hz do 150 Hz) i jest on przede wszystkim wynikiem wytłumienia drgań o niższych częstotliwościach (97 Hz i 126 Hz). Natomiast w odniesieniu do stojaka szlifierki (Rys. 7), zaobserwowano istotne zmiany odnośnie sztywności skrętnej. Amplitudy drgań skrętnych stojaka hybrydowego zmalały od 40–70% w stosunku do żeliwnego, co oznacza wzrost własności tłumiących drgania skrętne.



Rys. 7. Stojak szlifierki z korpusem hybrydowym [13]

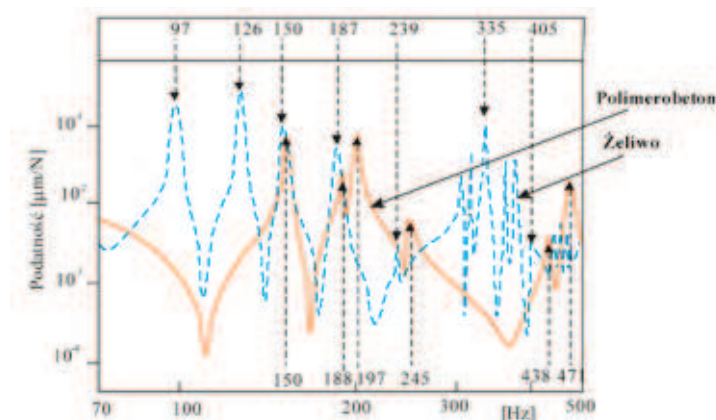
Fig. 7. Stand grinders with hybrid body [13]

Najważniejsze wnioski z badań są następujące:

1) Z uwagi na bardzo dobre własności przyczepności (adhezji) polimerobetonu do metali niektóre z własności korpusu hybrydowego można traktować, jako sumę własności żeliwa i polimerobetonu. Dotyczy to przede wszystkim wytrzymałości na zginanie (w zakresie małych odkształceń). Tak, więc wytrzymałość takiej hybrydy jest o ok. 15-20% większa niż samego żeliwa szarego. W odniesieniu do wytrzymałości na skręcanie, ta korzyść jest jeszcze większa, niż suma wytrzymałości na skręcanie żeliwa i polimerobetonu.

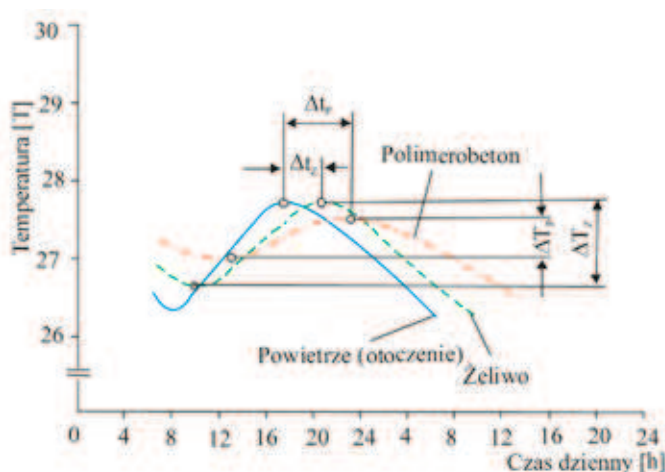
3) Wzrasta tłumienie drgań. W badanym przypadku tłumienie korpusu hybrydowego było 2 - 6 razy większe od tłumienia w korpusie żeliwnym (dla takich samych postaci drgań).

4) Badania własności cieplnych korpusów hybrydowych wykazały znaczącą korzyść w postaci wolniejszego nagrzewania się korpusów (korpus żeliwny osiągał maksymalną temperaturę ok. 4 godziny później niż ciepłe powietrze, otaczające szlifierkę, natomiast korpus hybrydowy ok. 8 godzin później), Rys. 9. Ponadto, różnica pomiędzy maksymalną i minimalną temperaturą korpusu hybrydowego



Rys. 8. Charakterystyki widmowe łoża polimerobetonowego i żeliwnego szlifierki [13]

Fig. 8. The spectral characteristics of the polymer concrete and cast-iron grinding body [13]



Rys. 9. Przebieg temperatury korpusu polimerobetonowego, żeliwnego i otoczenia [13]: Δt - czas, ΔT - temperatura

Fig. 9. Course of temperature of polymer concrete, iron body and environment [13]: Δt - time ΔT - temperature

wyniosła ok. $0,5^{\circ}\text{C}$, podczas kiedy dla żeliwa szarego ok. $1,1^{\circ}\text{C}$ (temperatura otaczającego powietrza wahała się w granicach $1,3^{\circ}\text{C}$).

4. PROJEKTOWANIE KORPUSÓW POLIMEROBETONOWYCH

Projektowanie korpusu maszyny wykonanego z polimerobetonu wymaga od konstruktora działań optymalizujących. Dla przybli-

żenia metodyki postępowania przedstawiony zostanie przykład projektowania belki suportowej obrabiarki.

Na Rys. 10 przedstawiono schemat obrabiarki, zawierającej belkę suportową. Na tę belkę działają siły grawitacji i siły skrawania ($F=500\text{N}$). Przekrój poprzeczny belki powinien być tak dobrany, aby uzyskać możliwie dużą sztywność statyczną, a materiał belki powinien mieć bardzo dobre własności tłumiące drgania.

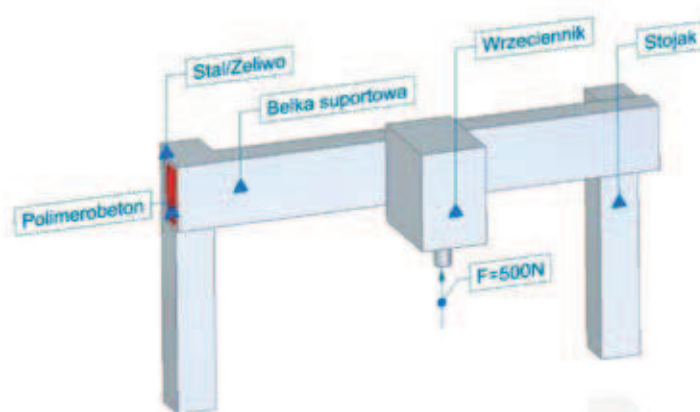
To drugie kryterium stwarza ograniczenia, co do materiału belki. Na ogół, jest nim żeliwo, które jednak ma gorsze własności mechaniczne niż np. stal. Stąd próby zastosowania materiału mocniejszego (stali) i materiału dobrze tłumiącego drgania, np. polimerobetonu, czyli rozwiązania hybrydowego.

Projektowanie korpusów hybrydowych przebiega wg następującej procedury:

a) Skonstruowanie korpusu metalowego (żeliwnego lub stalowego), np. w postaci rury prostokątnej, pustej w środku, z uwagi na pod-

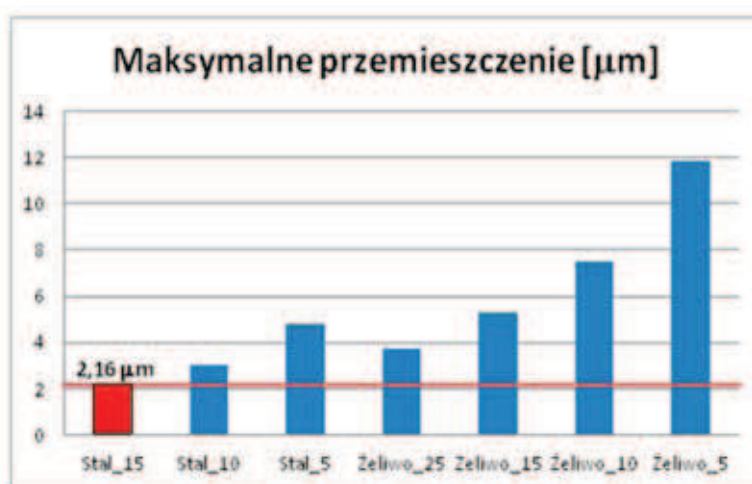
stawowe kryterium, tj. sztywności statycznej (w niniejszym przykładzie miarą sztywności statycznej było maksymalne przemieszczenie wywołane zewnętrznym obciążeniem $F=500\text{N}$). Na Rys. 11 przedstawiono wyniki obliczeń w postaci maksymalnego przemieszczenia korpusu dla obciążenia $F=500\text{N}$.

b) Wybór wielkości kryterialnej, w tym przypadku: pożądana sztywność. Przyjęto, że będzie to przemieszczenie $2,16\ \mu\text{m}$, odpowiadające stalowemu korpusowi o grubości ścianki 15 mm.



Rys. 10. Obrabiarka z belką suportową hybrydową

Fig. 10. The machine with hybrid cross-rail



Rys. 11. Maksymalne przemieszczenie korpusu pod obciążeniem $F=500\text{N}$ (_25, _15, _10, _5 - grubości ścianek korpusu)

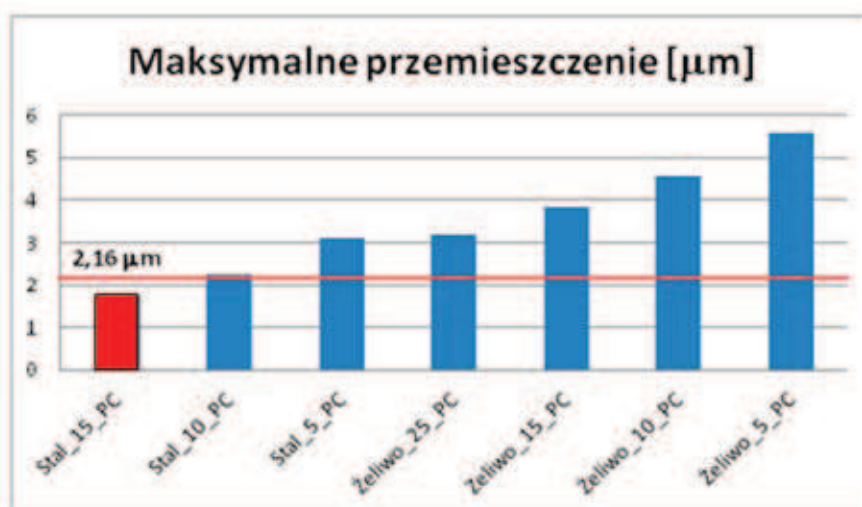
Fig. 11. The maximum displacement of the body under a load of $F=500\text{N}$ (_25, _15, _10, _5 - wall thickness of the body)

c) Przeprowadzenie podobnych obliczeń dla korpusu hybrydowego, tj. wypełnionego polimerobetonem. Na Rys. 12 przedstawiono wyniki obliczeń dla korpusów hybrydowych, tj. stal-polimerobeton i żeliwo-polimerobeton, dla kilku wartości grubości ścianek korpusu.

d) Wprowadzenie wartości kryterialnej, tj. maksymalnego przemieszczenia odpowiadającego stalowemu korpusowi o grubości ścianki 15 mm, tj. $2,16 \mu\text{m}$.

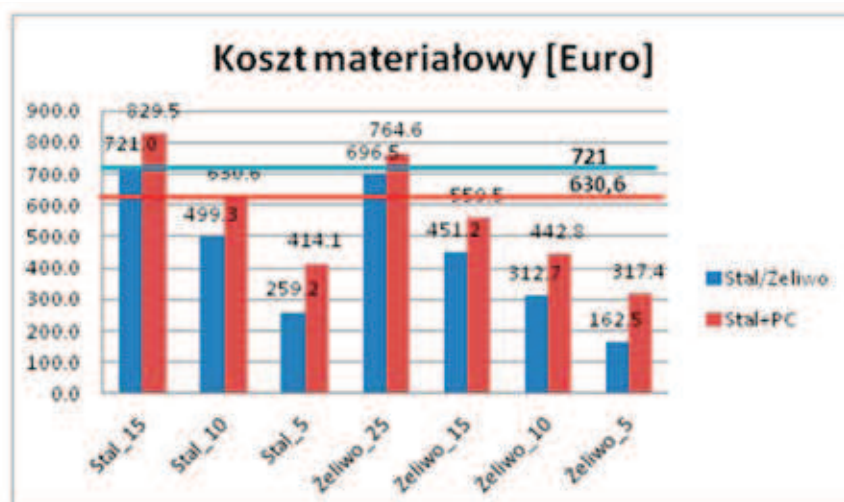
e) Wybór rozwiązania najkorzystniejszego z uwagi na przyjęte kryterium sztywności.

Z Rys. 12 wynika, że korpus hybrydowy stalowy o grubości ścianki co najmniej 10 mm spełnia oczekiwane wymagania. Pozostałe rozwiązania nie zapewniają oczekiwanej sztywności. Interesującym spostrzeżeniem jest, że nawet hybrydowy korpus żeliwny o grubości ścianki 25 mm nie spełnia wymaganego kryterium. Kryterium sztywności, jako kryterium techniczne musi zo-



Rys. 12. Maksymalne przemieszczenie korpusu hybrydowego pod obciążeniem $F=500\text{N}$ (_25, _15, _10, _5 - grubości ścianek korpusu); PC – polimerobeton

Fig. 12. The maximum displacement of the body of the hybrid load $F = 500\text{N}$ (_25, _15, _10, _5 - wall thickness of the body); PC – polymer concrete



Rys. 13. Koszty materiałowe wykonania belki suportowej

Fig. 13. The material costs of the cross-rail

stać spełnione. Ale nie oznacza to, że jest to rozwiązanie optymalne. Pod uwagę należy wziąć również koszt wytworzenia takiego korpusu i porównać go z kosztem korpusu żeliwnego lub stalowego. W tym celu, przeprowadzono badania analityczne, w postaci porównania kosztów materiałowych wykonania korpusów jednolitych i hybrydowych. Posłużono się przy tym Tab. 1, w której zamieszczono informację o koszcie jednostkowym materiałów, tj. stali, żeliwa i polimerobetonu. Dla wszystkich rozpatrywanych wariantów korpusów jednolitych i hybrydowych obliczono koszty materiałowe ich wytworzenia. Wyniki obliczeń przedstawiono na Rys. 13.

Analiza Rys. 13 pozwala na sformułowanie następujących wniosków:

a) Wypełnienie korpusu stalowego lub żeliwnego polimerobetonem podnosi zawsze koszt materiałowy wykonania belki.

b) Obniżenie grubości ścianki korpusu stalowego lub żeliwnego i wypełnienie go polimerobetonem w taki sposób aby sztywność takiego korpusu hybrydowego nie była niższa niż samego korpusu stalowego pozwala uzyskać korpus hybrydowy, którego koszt materiałowy jest niższy (koszt korpusu hybrydowego o grubości ścianki stalowej 10 mm wynosi 630,6 Euro, a korpusu stalowego o grubości ścianki 15 mm 721 Euro, przy czym oba korpusy mają taką samą sztywność).

c) Istnieje, zatem możliwość takiego optymalnego zaprojektowania korpusu hybrydowego, którego sztywność jest zadawalająca a koszt materiału mniejszy od kosztu korpusu stalowego.

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono zalety i wady stosowania korpusów hybrydowych, tj. korpusów metalowych wypełnianych polimerobetonem, przeznaczonych do budowy obrabiarek. Oceny korpusów hybrydowych dokonano na drodze porównania wybranych własności mechanicznych z jednolitymi korpusami metalowymi, tj. stalowymi i żeliwnymi.

Jako podstawowe kryterium eksploatacyjne przyjęto sztywność statyczną korpusu, reprezentowaną przez maksymalne przemieszczenie korpusu wywołane zewnętrzną siłą, przyłożoną do korpusu. Przyjęto, że korpusem referencyjnym jest konstrukcja stalowa spawana, o przekroju rury prostokątnej, o grubości ścianek 15 mm. Następnie skonstruowano kilka wariantów korpusów hybrydowych, których wymiary gabarytowe były takie same jak korpusu referencyjnego. Poszczególne korpusy hybrydowe różniły się grubościami ścianek i były wypełnione polimerobetonem. Dla każdego z nich wyznaczono maksymalne przemieszczenie, podobnie jak w korpusie referencyjnym. Następnie znaleziono taki wariant korpusu hybrydowego, którego sztywność była taka sama jak korpusu referencyjnego. Grubość ścianki tego korpusu była o 1/3 mniejsza niż korpusu referencyjnego. Następnie obliczono koszty materiałowe każdej wersji korpusu, i porównano je z kosztem korpusu referencyjnego. Korpusy hybrydowe zawsze były droższe od referencyjnego.

Wykazano jednak, że dla korpusu hybrydowego, którego sztywność jest taka sama jak korpusu referencyjnego, koszt materiałowy jest niższy o ok. 7%. Tym samym wykazano, że jest możliwym skonstruowanie korpusu hybrydowego, który nie ustępuje korpusom jednolitym (stalowym, żeliwnym) pod względem sztywności, który ma korzystniejsze właściwości, np. w zakresie tłumienia drgań a który może być tańszy.

LITERATURA

1. Mason F., Cast polymer machine bases. Machine Shop Guide, June 2000, p. 6.
2. Bedi R., Chandra R., Singh S., Mechanical Properties of Polymer Concrete. Journal of Composites, Vol. 2013, Hindawi Publishing Corporation, 2013, p. 12.
3. Piratelli A., Levy F., Behavior of granite-epoxy composite beams subjected to mechanical vibrations. Materials research, Vol. 13, No. 4, 2010, p. 10.
4. Kreienbuhl R., Epoxy Concrete for Better Machine Basis: A 20 Year Review of Incentives for Replacing Cast Iron. Polymers in Concrete.

5. Kępczak N., Pawłowski W., Teoretyczne badania właściwości dynamicznych łoż obrabiarki wykonanych z żeliwa i hybrydowego połączenia żeliwa z odlewem mineralnym. *MECHANIK* Nr 8-9/2015, s. 199-203.
6. Kępczak N., Pawłowski W., Błazejewski W., The Study of the Mechanical Properties of the Mineral Cast Material, *Archives of Mechanical Technology and Automation*, Vol. 34, No. 2, 2014, pp. 25-32.
7. Prażmo J., Sobczak R., Analiza możliwości wykorzystania polimerobetonu, jako materiału do budowy korpusów obrabiarek wodno-ściernych. Waterjet.org.pl
8. Schulz H., Nicklau R., Konstruktives Gestalten von Werkzeugmaschinen-gestellen aus Polymerobeton. *Werkstatt und Betrieb* Vol. 115, No. 5, 1982, p. 311-317.
9. Schulz H., Nicklau R., Werkzeug-maschinengestelle aus Polymerobeton. *Werkstatt und Betrieb* Vol. 114, No. 10, 1981, p. 747-752.
10. Paderewski K., Zastosowanie polimerobetonów w budowie obrabiarek. *Przegląd Mechaniczny*, Z. 13, 1984r, s. 12-15.
11. Honczarenko J., Korpusy współczesnych obrabiarek. *Mechanik*, Nr 2, 2009r, s. 89-92.
12. 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*, Vol. 202, No. 1-3, 2008, pp. 493-499.
13. Salje E., Gerloff H., Meyer J., Comparison of Machine Tool Elements Made of Polymer Concrete and Cast Iron. *Annals of the CIRP* Vol. 37/1/1988, pp. 381-384.
14. Sugishita H., Nishiyama H., Development of Concrete Machining Center and Identification of the Dynamic and the Thermal Structure Behavior. *Annals of the CIRP* Vol. 71/1/1988, pp. 377-379.

Publikację przyjęto do druku: 06.02.17