

TŁUMIENIE W POLU MAGNETYCZNYM  
DRGAŃ WIRUJĄCEJ PIŁY TARCZOWEJ*Antoni Strzelecki*

Katedra Fizyki SGGW

**Synopsis.** Paper gives results of studies concerning the use of the magnetic field for vibration damping in the whirling circular saw. The decrease in the resultant of the vibration amplitude for circular saw while whirling under the influence of damping by magnetic field under idle running was for different cases included within limits of 0.0—55.8%; under working conditions the maximum decrease in the vibration amplitude amounted to some 12.5%.

WSTĘP<sup>1</sup>

W ostatnich latach ukazało się szereg prac dotyczących badań nad tłumieniem drgań pił tarczowych do cięcia drewna. Dla przykładu można wymienić prace G. Pahlitzscha i W. Meinsa (3, 4). Opisane w nich urządzenia mechaniczne do tłumienia drgań (tarcze usztywniające piłę, element dociskowy itd.) okazały się skuteczne — jak wykazały dalsze badania (5) — przede wszystkim przy biegu luzem i to głównie w tych przypadkach, kiedy przy ruchu obrotowym piły wzbudzały się silne drgania o wysokiej częstotliwości; przy cięciu nie dawały te urządzenia zadowalających rezultatów.

Zastosowanie pola magnetycznego do tłumienia drgań pił tarczowych zostało podjęte przez J. Abłamowicz-Ledwoń (1). W pracy tej jednak ograniczono się jedynie do badań nad zastosowaniem tłumienia magnetycznego do zmniejszenia hałasu wywołanego drganiami wirującej piły; same drgania, które są przede wszystkim źródłem hałasu, nie były w ogóle badane.

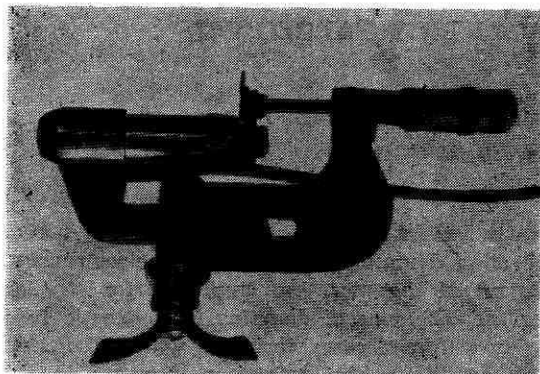
Tłumienie drgań piły tarczowej powoduje nie tylko zmniejszenie hałasu, ale ma również znaczenie technologiczne, jak zmniejszenie szerokości rzazu, zmniejszenie chropowatości obrabianej powierzchni itd.

<sup>1</sup> Publikacja niniejsza oparta jest na materiałach pracy doktorskiej, której promotorem był prof. dr inż. Tadeusz Orlicz.

## I. METODYKA BADAŃ

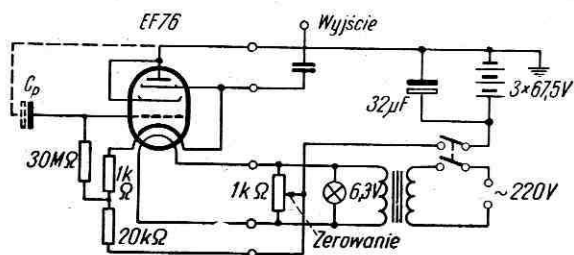
## 1. CHARAKTERYSTYKA CZUJNIKA

Jako przetwornik drgań mechanicznych na drgania elektryczne stosowano czujnik pojemnościowy. Czujnik był tak skonstruowany (rys. 1), że jego odległość od płaszczyzny piły można było regulować za pomocą śruby mikrometrycznej z dokładnością do 0,01 mm.



Rys. 1. Czujnik pojemnościowy do badania drgań

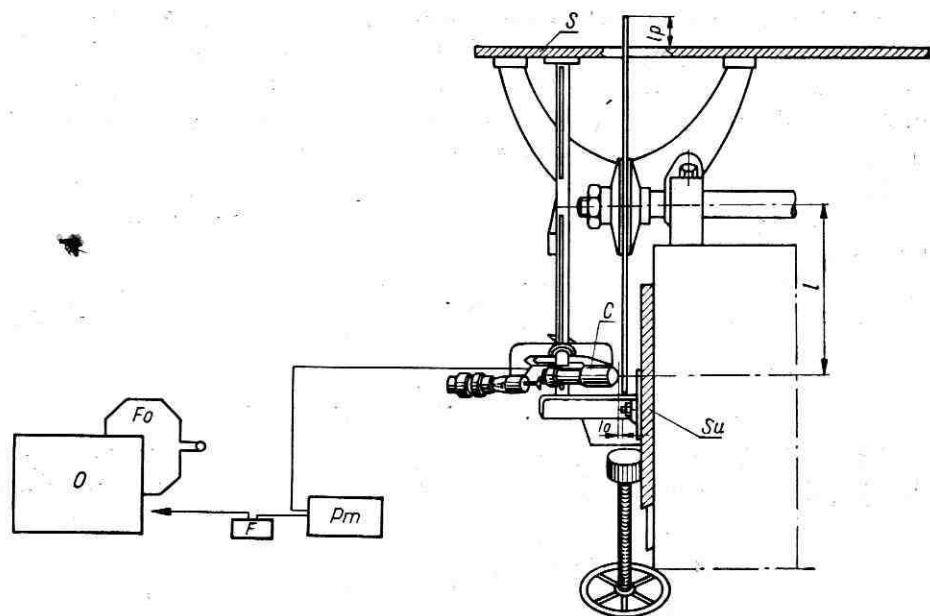
Podstawowym elementem czujnika był płaski kondensator  $C_p$  (rys. 2), którego okładzinami były tarcza piły i okrągła elektroda pomiarowa średnicy 12 mm. Między okładzinami tego kondensatora przyłożono napięcie (tzw. napięcie polaryzacji). Aby zapewnić dużą stabilność pracy



Rys. 2. Schemat aparatury do badania drgań

czujnika i uniezależnić ją od zakłóceń elektrycznych pochodzących z sieci, zastosowano jako źródło napięcia polaryzacji i napięcia anodowego baterię ogniw suchych. Przedwzmacniacz zbudowano na bezszumowej pentodzie EF 76 umieszczonej w metalowej obudowie czujnika bezpośrednio przy elektrodzie pomiarowej. Zasilacz znajdował się w oddzielnej obudowie i był połączony z czujnikiem 4-żyłowym kablem ekranowym. Czujnik wyskalowany był w zakresie odległości od płaszczyzny piły zawartej w granicach 0,5–6,0 mm, tzn. w tym zakresie znana była jego czułość jako funkcja tej odległości.

Dane techniczne miernika przedstawiają się następująco: Zasilanie z sieci prądem o napięciu 220 V, częstotliwości 50 Hz oraz z 3 baterii ano-



Rys. 3. Schemat ideowy połączenia aparatury do badania drgań i schemat zamocowania czujnika

C — czujnik, Pm — pojemnościowy miernik drgań, F — filtr, woltomierz lampowy lub selektywny woltomierz lampowy, O — oscylograf, Fo — fotokamera, S — stół obrabiarki lp — wystawianie piły od powierzchni stołu, l — odległość punktu pomiarowego od środka piły, lo — odległość elektrody pomiarowej czujnika od płaszczyzny piły, Su — suport

dowych o napięciu 67,5 V każda. Czułość przy stosowanej podczas badań odległości elektrody pomiarowej od płaszczyzny piły  $l_0 = 1,46$  mm wynosiła 2,15 V/mm. Zakres częstotści 20 Hz — 20 kHz. Oporność wejściowa przedwzmacniacza 150 M $\Omega$ . Oporność wyjściowa 25 k $\Omega$ . Zakres regulacji odległości 20 mm. Dokładność pomiaru amplitudy drgań 5%.



Rys. 4. Zamocowanie czujnika na przewodnicy. Po obu stronach przewodnicy widoczne są elektromagnesy

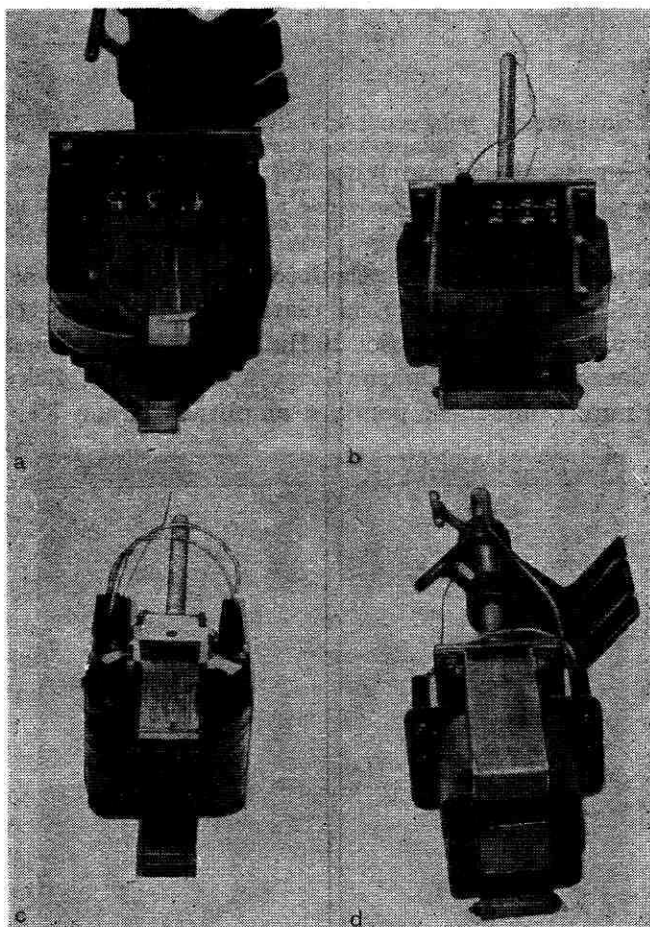
Czujnik przykręcony był za pomocą śruby mocującej pod stołem obrabiarki do stalowej prowadnicy (rys. 3 i 4) ustawionej równolegle do płaszczyzny piły. Po ustawieniu elektrody pomiarowej w odpowiedniej odległości od płaszczyzny piły, unieruchomiono czujnik za pomocą specjalnej śruby blokującej umieszczonej z boku czujnika.

Opisane rozwiązanie zamocowania czujnika pozwalało:

- zmieniać w kierunku pionowym odległość  $l$  elektrody pomiarowej od środka piły,
- regulować odległość  $l_0$  elektrody czujnika od płaszczyzny piły,
- ustawiać płaszczyznę elektrody pomiarowej równoległe do płaszczyzny piły.

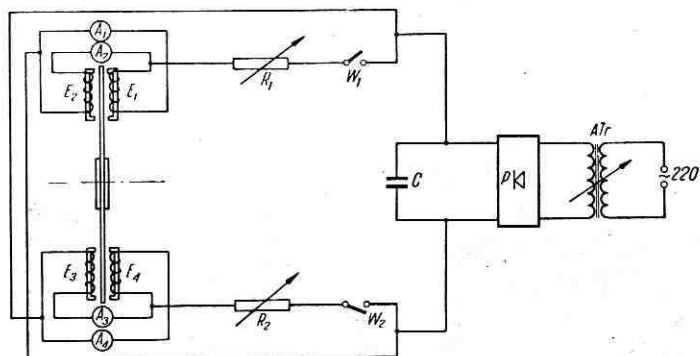
## 2. CHARAKTERYSTYKA ELEKTROMAGNESÓW

W celu zbadania wpływu pola magnetycznego na wielkość drgań wirującej piły tarczowej i ustalenia optymalnych warunków tłumienia



Rys. 5. Typy elektromagnesów stosowanych do tłumienia drgań pił tarczowych: a — typ A3, b — typ A2, c — typ A1, d — typ B1

drgań stosowano w początkowej fazie badań elektromagnesy o różnych kształtach i różnych powierzchniach biegunów (rys. 5), zasilane prądem wyprostowanym i wygładzonym (schemat zasilania elektromagnesów pokazany jest na rys. 6), rozmieszczone parami (po dwa identyczne elektromagnesy), w pobliżu obwodu piły, symetrycznie względem płaszczyzny piły (rys. 7), tak że odległości wszystkich biegunów (identycznych elektromagnesów) od płaszczyzny piły były jednakowe, a powierzchnie biegunów były równoległe do płaszczyzny piły biegunami jednoimiennymi naprzeciw siebie. Strumienie magnetyczne elektromagnesów przechodziły więc przez piłę, która wirowała w strefie utworzonej przez dwa przylegające do siebie strumienie magnetyczne.



Rys. 6. Schemat zasilania i kontroli elektromagnesów

$E_1, E_2, E_3, E_4$  — elektromagnesy,  $A_1, A_2, A_3, A_4$  — amperomierze kontrolne (UM — 3),  $R_1, R_2$  — oporniki suwakowe,  $W_1, W_2$  — wyłączniki,  $C$  — bateria kondensatorów (1700  $\mu F$ ),  $P$  — prostownik dwupółówkowy,  $ATr$  — autotransformator (0—250 V)

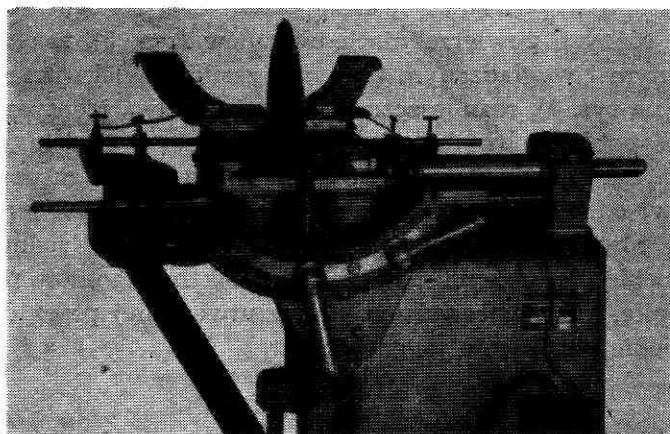
Elektromagnesy były tak zamocowane (rys. 8), że odległość biegunów od powierzchni piły jak i od jej środka można było zmieniać w pewnych granicach w sposób ciągły.

Indukcję magnetyczną mierzono z dokładnością do 2% gausmierzem w szczelinie powietrznej, utworzonej przez powierzchnię bieguna i powierzchnię piły.

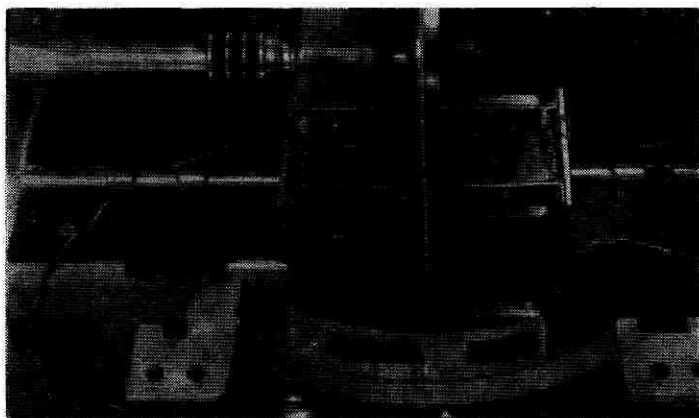
### 3. CHARAKTERYSTYKA BADANYCH PIŁ

Badaniami objęto piły płaskie, fabrycznie nowe, wstępnie naprężone, wykonane ze stali NCV1, obrobione cieplnie do twardości zawartej dla wszystkich pił w granicach 44—48 HRC. Charakterystykę badanych pił podaje tab. 1.

Zasadnicze badania przeprowadzono przy zastosowaniu kołnierzy zaciskowych średnicy 160 mm. Uzupełniająco zbadano również wpływ średnicy kołnierzy na tłumienie drgań, stosując kołnierze o średnicy 80 i 240 mm.



Rys. 7. Rozmieszczenie elektromagnesów



Rys. 8. Zamocowanie elektromagnesów

Tabela 1

Charakterystyka badanych pił tarczowych

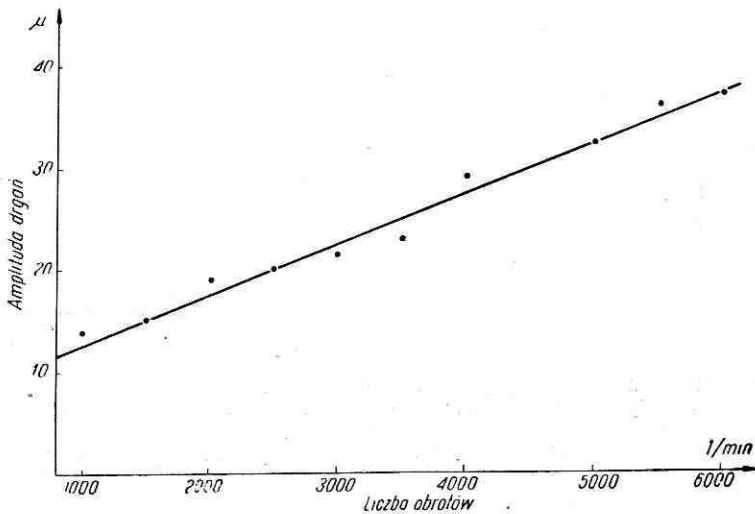
Nr pi- ły	Średnica mm		Grubość mm	Rozwar- cie zębów mm	Kąty		Licz- ba zębów	Kształt zębów, typ uzę- bienia	Ciężar kG
	piły	otwo- ru			$\gamma$	$\beta$			
1	496		3,56		33°	32°			4,968
2	497		3,06		33°	32°			4,328
3	495	30	2,56	0,4	33°	32°	48	A (trój- kątnie)	3,597
4	449		2,57		29°	35°			3,008
5	396		2,50		30°	35°			2,198

4. CHARAKTERYSTYKA PILARKI TARCZOWEJ I STOSOWANEGO NAPĘDU

Badania przeprowadzono na pilarence tarczowej stolarskiej typ TPSe z wrzecionem ułożyskowanym w łożyskach dwurzędowych, wahlowych, kulkowych.

Zależność bicia osiowego wrzeciona od liczby obrotów podano na rys. 9.

Do napędu stosowano silnik bocznikowy prądu stałego o mocy 2,9 kW pracujący w układzie Leonarda, który pozwalał regulować obroty wrzeciona w sposób ciągły od 500 do 6000 1/min.



Rys. 9. Zależność amplitudy bicia osiowego wrzeciona od liczby obrotów

W układzie doprowadzającym prąd elektryczny do silnika bocznikowego wmontowany był amperomierz i woltomierz (klasy 1,5), co umożliwiało odczytywanie mocy. Do posuwu stosowano urządzenie posuwowe firmy C. Reich Holz — Her typ ETX.

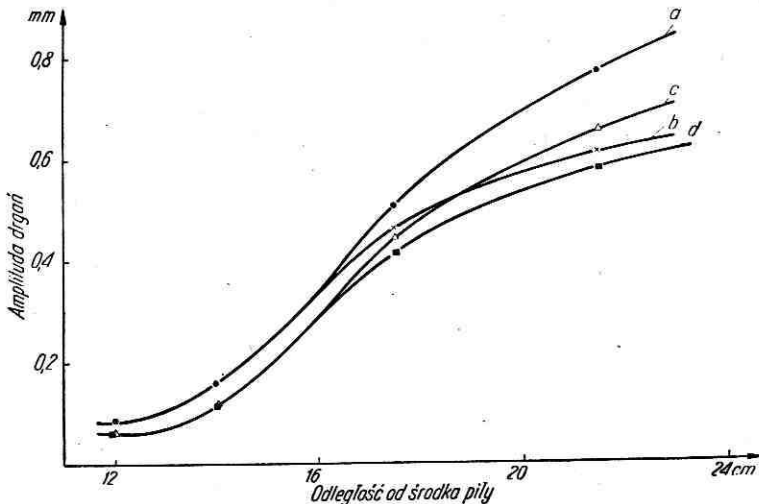
II. WYNIKI BADAŃ

1. TŁUMIENIE DRGAŃ PRZY BIEGU LUZEM

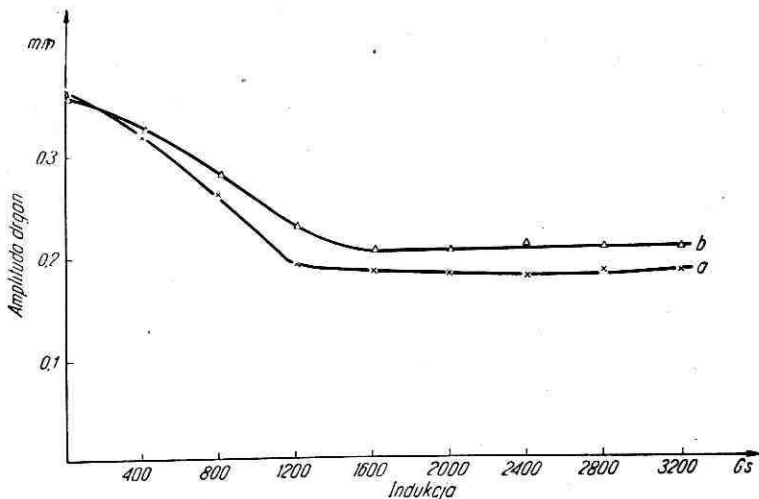
a. Optymalne warunki tłumienia drgań. Stosując do badań różne elektromagnesy stwierdzono, że najlepsze efekty tłumienia otrzymuje się dla elektromagnesów w kształcie podkowy, przy czym zmniejszenie amplitudy drgań pod wpływem tłumienia magnetycznego nie zależy od liczby par stosowanych elektromagnesów. Wystarczy zastosować jedną parę elektromagnesów możliwie najbliżej obwodu piły (przy obwodzie jest największa amplituda drgań — rys. 10), a efekt tłumienia nie będzie gorszy niż przy większej liczbie par.

Badając tłumienie drgań przy różnych położeniach biegunów względem środka piły (rys. 11), a przy stałej odległości elektromagnesów od

środką piły stwierdzono, że najlepsze efekty tłumienia otrzymuje się przy położeniu cięciwowym (położenie pokazane na rys. 7), a najmniejsze w położeniu promieniowym (w położeniu promieniowym środki powierzchni biegunów leżą wzdłuż promienia piły).



Rys. 10. Zależność amplitudy drgań wirującej piły tarczowej (piła nr 2) od odległości od osi obrotu — dla liczby obrotów  $n = 2500$  1/min. (a — bez tłumienia, b — tłumienie polem magnetycznym o indukcji  $B = 1600$  Gs) i dla liczby obrotów  $n = 2000$  1/min. (c — bez tłumienia, d — tłumienie polem magnetycznym o indukcji  $B = 1600$  Gs)



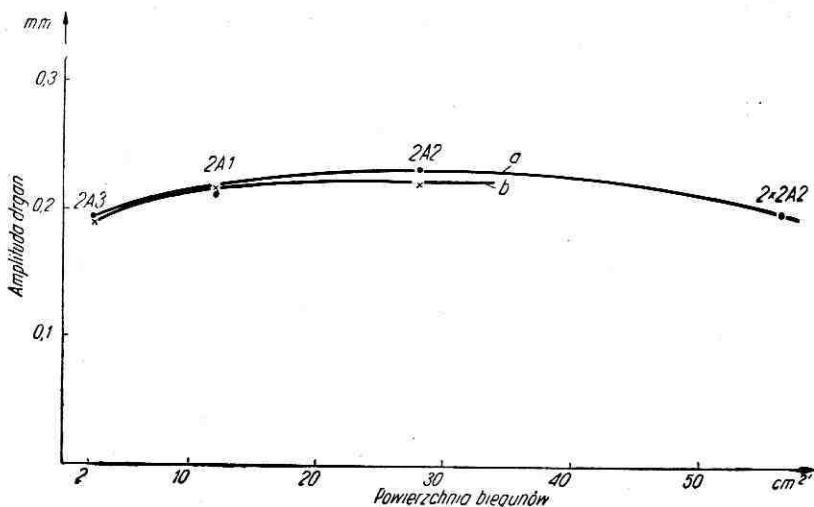
Rys. 11. Tłumienie amplitudy drgań wirującej ( $n = 2500$  1/min.) piły tarczowej (nr 1) w polu magnetycznym w zależności od wielkości indukcji magnetycznej: a — elektromagnesy w pozycji cięciwowej, b — elektromagnesy w pozycji promieniowej

Badając tłumienie amplitudy drgań (wypadkowych) w zależności od wielkości powierzchni biegunów stosowanych elektromagnesów (rys. 12)

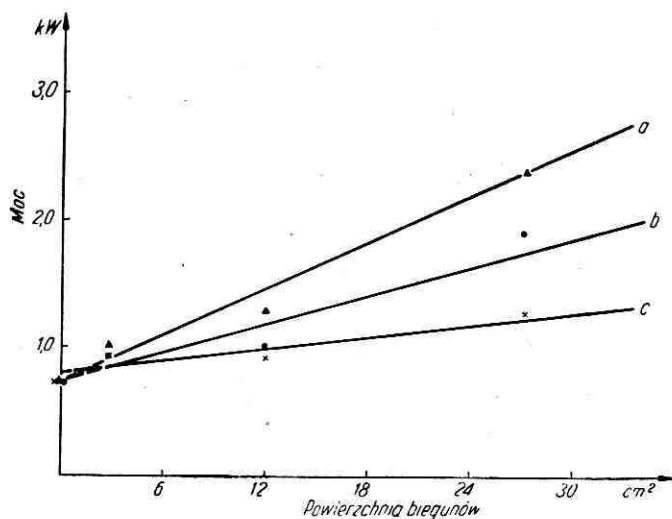


stwierdzono, że wielkość powierzchni nie ma istotnego wpływu na wielkość tłumienia. W doświadczeniach tych przy indukcji  $B = 1600$  Gs zastosowano tylko jedną parę elektromagnesów A2, gdyż przy dwóch parach wystąpił bardzo duży pobór mocy na wrzecionie.

Wielkość powierzchni biegunów ma natomiast istotny wpływ na dodatkowy pobór mocy związany z wirowaniem piły w polu magnetycznym (rys. 13). Jak wynika z tego rysunku, pobór mocy mierzony na wrzecionie

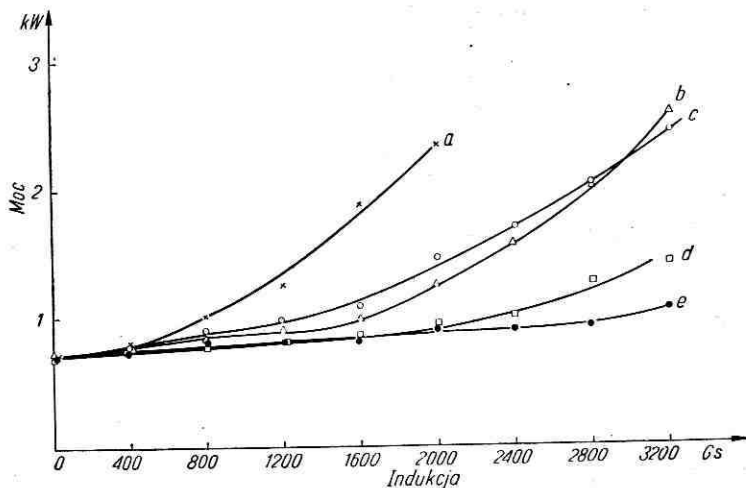


Rys. 12. Zależność amplitudy drgań wirującej ( $n = 2500$  1/min.) piły tarczowej (nr 1) w polu magnetycznym od powierzchni biegunów: a — indukcja  $B = 1200$  Gs, b — indukcja  $B = 1600$  Gs



Rys. 13. Zależność poboru mocy podczas wirowania ( $n = 2500$  1/min.) piły (nr 1) w polu magnetycznym od powierzchni biegunów: a —  $B = 2000$  Gs, b —  $B = 1600$  Gs, c —  $B = 1200$  Gs

rośnie liniowo wraz ze wzrostem powierzchni biegunów. Rys. 14 ilustruje zależność dodatkowego poboru mocy od wielkości indukcji magnetycznej dla różnych elektromagnesów (o różnych kształtach powierzchni biegunów). Dodatkowy pobór mocy wzrasta wraz ze wzrostem indukcji magnetycznej wg linii krzywej.



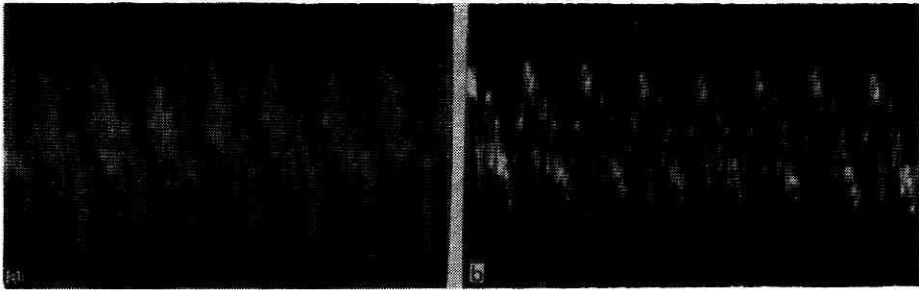
Rys. 14. Zależność poboru mocy podczas wirowania ( $n = 2500$  1/min.) piły (nr 1) w polu magnetycznym od wielkości indukcji magnetycznej: a — elektromagnes A2, b — elektromagnes A1, c — elektromagnes B1, d — elektromagnes A3, e — elektromagnes A3 w położeniu promieniowym

Jak widać z rys. 14 najbardziej ekonomiczny i jednocześnie najbardziej skuteczny jest elektromagnes A3. Elektromagnes ten w warunkach optymalnego tłumienia w zakresie indukcji skutecznych 2000—2400 Gs, tj. takich, przy których uzyskiwano maksimum tłumienia, charakteryzował się dodatkowym poborem mocy 0,24—0,38 kW. Miał on ścięte bieguny o powierzchni wydłużonej o wymiarach  $6 \times 23$  mm. We wszystkich dalszych badaniach stosowano jedynie elektromagnes A3 (w pozycji cięciwowej).

b. Tłumienie drgań w zależności od wielkości indukcji magnetycznej. Celem tych badań było ustalenie zakresów indukcji skutecznych (indukcji, przy których występuje maksimum tłumienia) dla różnych pił i różnych obrotów.

Rys. 11 przedstawia tłumienie drgań (wypadkowych) w polu magnetycznym, w zależności od wielkości indukcji magnetycznej. Jak widać z tego wykresu, amplituda drgań wypadkowych początkowo maleje wraz ze wzrostem indukcji magnetycznej, osiąga minimum w zakresie indukcji 2000—2400 Gs, a następnie powoli wzrasta.

Na rys. 15 pokazane są oscylogramy drgań dla omawianego przypadku, wykonane przy prędkości przesuwu taśmy filmowej  $v = 200$  mm/s.



Rys. 15. Oscylogramy drgań (piła nr 1,  $n = 2500$  1/min.): a — nie tłumionych, b — tłumionych magnetycznie ( $B = 2400$  Gs)

Na oscylogramie drgań nie tłumionych występują obok drgań podstawowych (tj. drgań o częstości  $f_p = n/60$  wynikających z odkształceń statycznych płaskości piły i ruchu obrotowego z częstością  $n$  obrotów na minutę) drgania o wysokiej częstości (powyżej 800 Hz) wzbudzone podczas ruchu obrotowego piły.

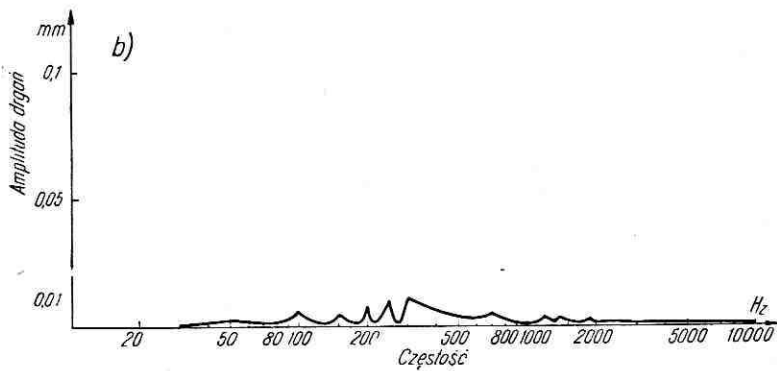
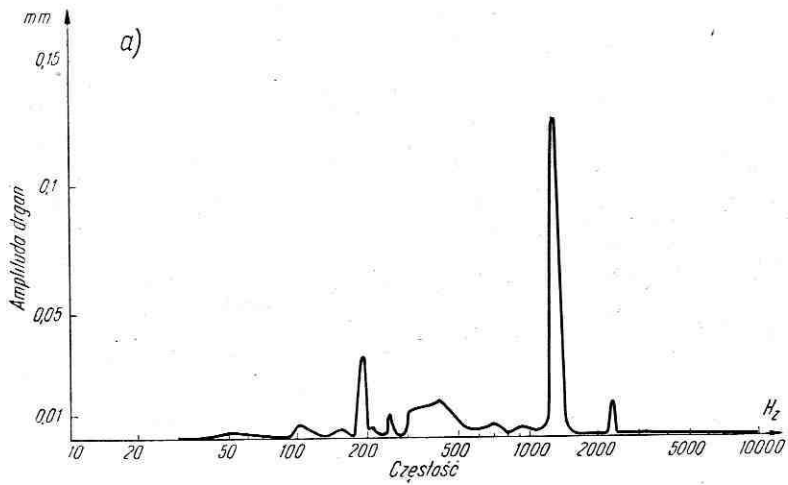
Na oscylogramie drgań tłumionych występują tylko drgania podstawowe; drgania o wysokiej częstości zostały całkowicie wytłumione, dzięki czemu amplituda drgań wypadkowych dla tego przypadku zmniejszyła się o blisko 50%. Analiza widmowa drgań omawianego przypadku przedstawiona jest na rys. 16.

Maksimum amplitudy drgań nie tłumionych przypada na częstość 1300 Hz (rys. 16a), która jest częstością drgań własnych. Jest to częstość silnego tonu gwizdzącego, jaki towarzyszy ruchowi piły. Po zastosowaniu tłumienia magnetycznego (rys. 16b) częstość 1300 Hz, jak i niektóre inne częstości, została wytłumiona.

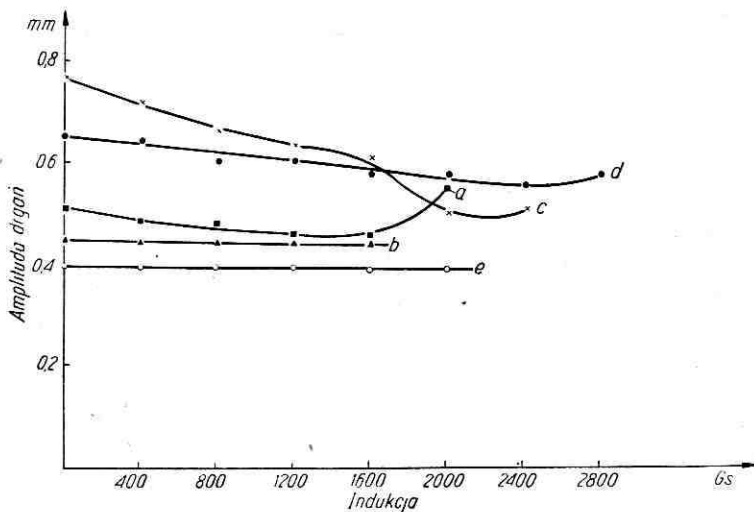
Wyniki badań dotyczące piły nr 2 przedstawione są na rys. 17 i 18. Z wykresów tych wynika, że wielkość tłumienia jest różna dla różnych obrotów. Tłumienie jest duże przy tych obrotach, przy których wzbudzają się silne drgania o wysokiej częstości. Jeżeli drgania takie nie występują (rys. 18a), to tłumienie jest minimalne (rys. 18b), gdyż pole magnetyczne tłumি przede wszystkim wysokie częstości.

Największe tłumienie dla rozpatrywanej piły występuje przy obrotach  $n = 2500$  1/min. Zastosowanie tłumienia magnetycznego o indukcji skutecznej doprowadziło do zmniejszenia amplitudy drgań (wypadkowych) przy tych obrotach o 32%, przy obrotach  $n = 2000$  1/min. tłumienie to wynosi 14%, przy  $n = 3500$  1/min. — 10%, przy  $n = 1500$  1/min. — 1% i przy  $n = 3200$  1/min. — 0,9%. Zakres indukcji skutecznych dla badanej piły przy obrotach  $n = 2000$  1/min. i  $n = 2500$  1/min. zawiera się w granicach 2000—2400 Gs, przy obrotach  $n = 3500$  1/min. wynosi 1200—1600 Gs.

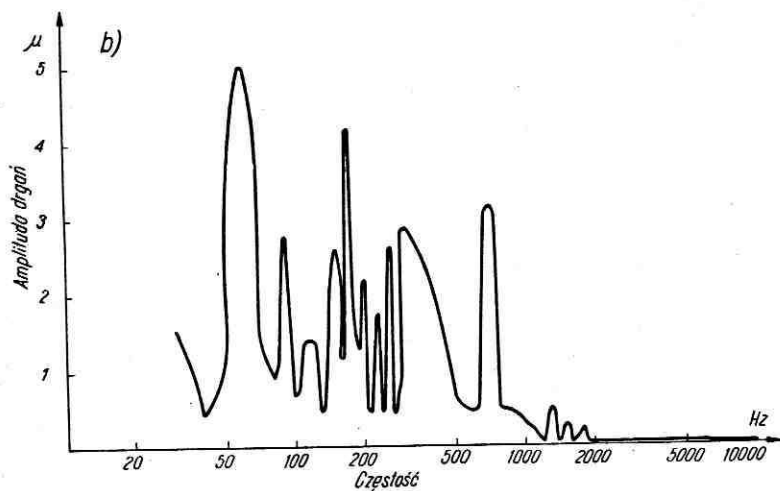
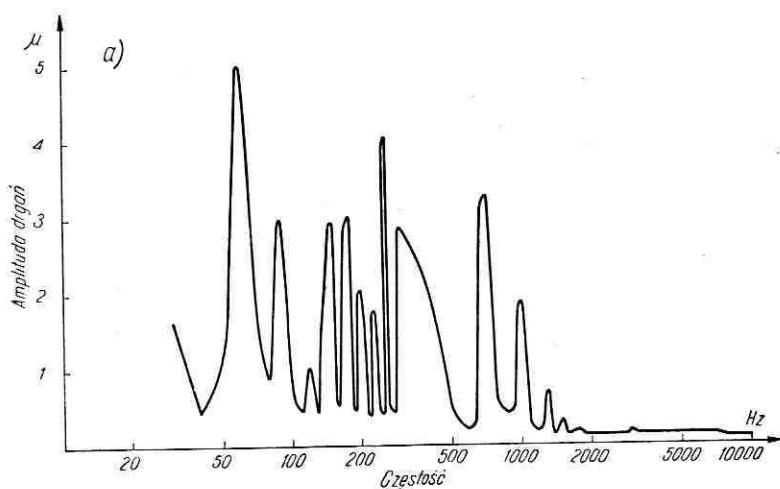
Wyniki badań dotyczące piły nr 3 przedstawione są na rysunkach od 19 do 22. Zakres indukcji skutecznych dla tej piły zawierał się w grani-



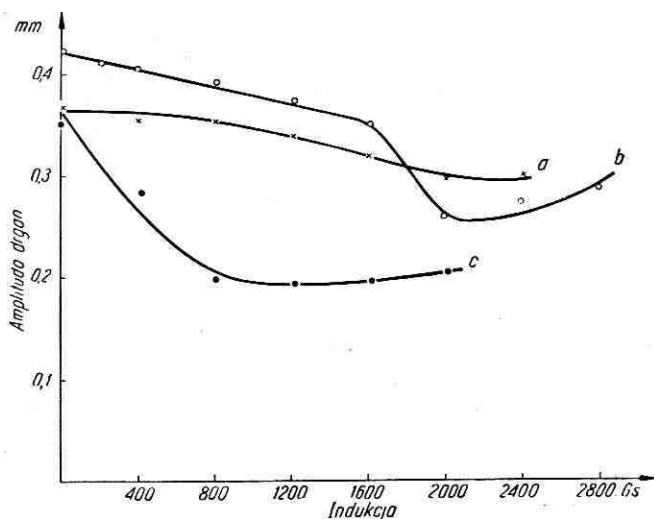
Rys. 16. Analiza widmowa drgań piły tarczowej (piła nr 1,  $n = 2500$  1/min.): a — nie tłumionej, b — tłumionej magnetycznie ( $B = 2400$  Gs)



Rys. 17. Tłumienie amplitudy drgań wirującej piły tarczowej (nr 2) w polu magnetycznym w zależności od wielkości indukcji magnetycznej, a —  $n = 3500$  1/min., b —  $n = 3200$  1/min., c —  $n = 2500$  1/min., d —  $n = 2000$  1/min., e —  $n = 1500$  1/min.



Rys. 18. Analiza widmowa drgań piły tarczowej (nr 2,  $n = 1500$  1/min.): a — nie tłumionej, b — tłumionej magnetycznie ( $B = 1600$  Gs)



Rys. 19. Tłumienie amplitudy drgań wirującej piły tarczowej (nr 3) w polu magnetycznym w zależności od wielkości indukcji magnetycznej: a —  $n = 3500$  1/min., b —  $n = 2500$  1/min., c —  $n = 1700$  1/min.

cach 2000—2400 Gs przy wyższych obrotach i od 1200 do 1600 Gs przy  $n = 1700$  1/min.

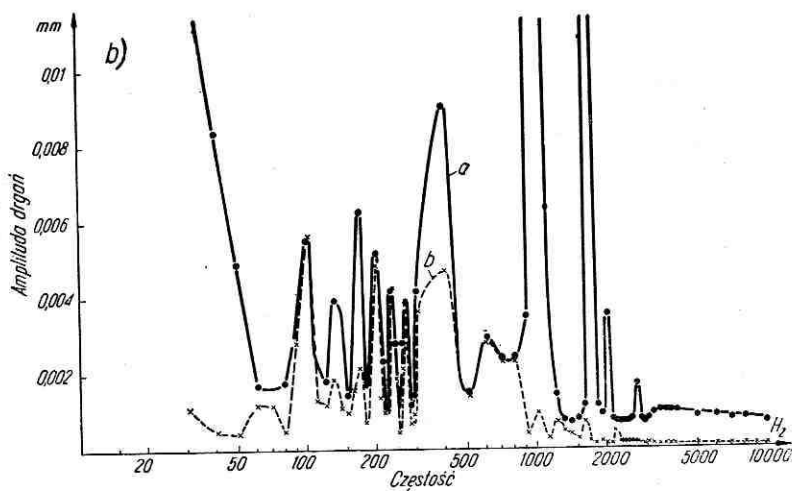
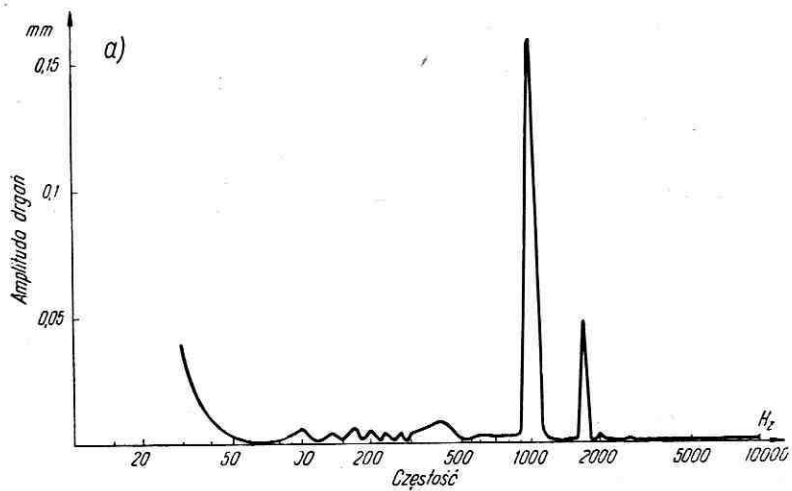
Uzyskane maksymalne zmniejszenie amplitudy drgań (wypadkowych) pod wpływem tłumienia magnetycznego wynosiło odpowiednio (rys. 19) 43,5% przy  $n = 170$  1/min., 39,0% przy  $n = 2500$  1/min. i ok. 18% przy  $n = 3500$  1/min.

Jak wynika z analizy widmowej drgań przedstawionej na rys. 20—22, w przypadku badanej piły przy wszystkich stosowanych obrotach wzbudzają się silne drgania o wysokiej częstotliwości, które w polu magnetycznym zostały całkowicie wytłumione (zanikł silny gwizd towarzyszący ruchowi piły bez tłumienia).

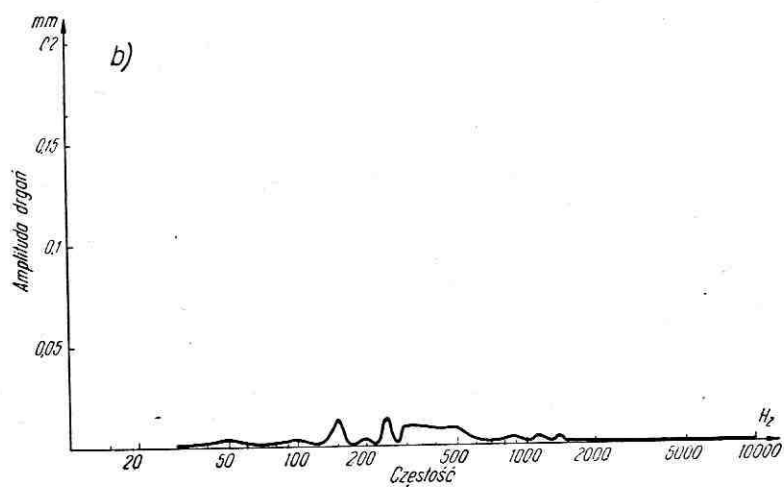
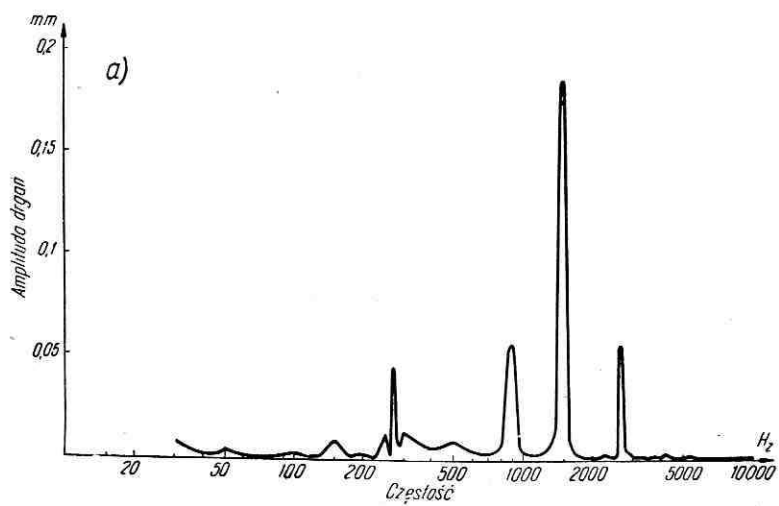
Porównując rys. 20—22 widać, że ze wzrostem liczby obrotów maksimum amplitudy drgań przesuwa się w stronę wyższych częstotliwości (piła wydaje coraz to wyższe tony). Ta ogólna prawidłowość wynika z tego, że częstotliwości o maksymalnej amplitudzie są częstotliwościami drgań własnych badanej piły, a częstotliwość drgań własnych wirującej piły wzrasta wraz ze wzrostem liczby obrotów.

Na rys. 23 przedstawiona została zależność amplitudy drgań od wielkości indukcji magnetycznej przy różnych średnicach kołnierzy zaciskowych.

Jak widać z wykresów, im większe są kołnierze zaciskowe, tym mniejsza jest amplituda drgań nietłumionych wirującej piły tarczowej. Różnica amplitudy drgań przy zastosowaniu kołnierzy zaciskowych średnicy 80

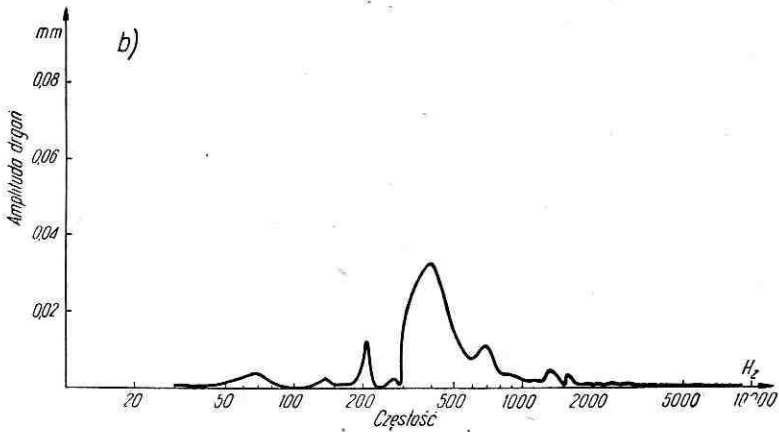
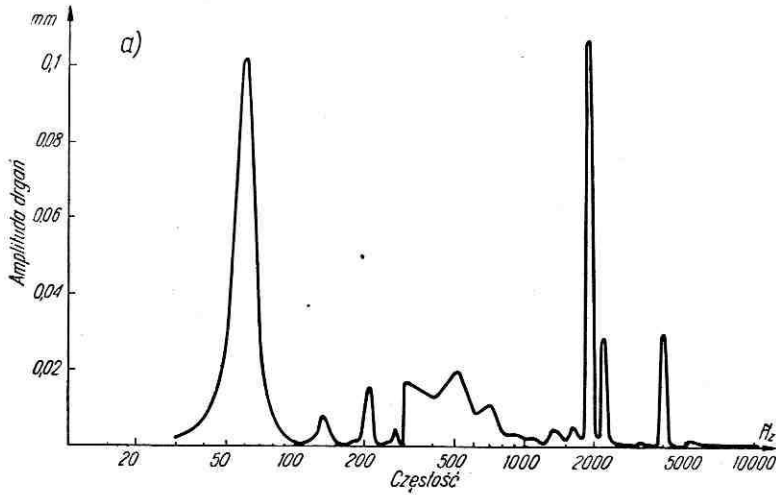


Rys. 20. Analiza widmowa drgań piły tarczowej (nr 3,  $n = 1700$  1/min.): *a* — nie tłumionej, *b* — tłumionej polem magnetycznym ( $B = 1000$  Gs)  
 Krzywa ciągła na rys. 20 b jest powtórzeniem w innej skali wykresu z rysunku 20 a

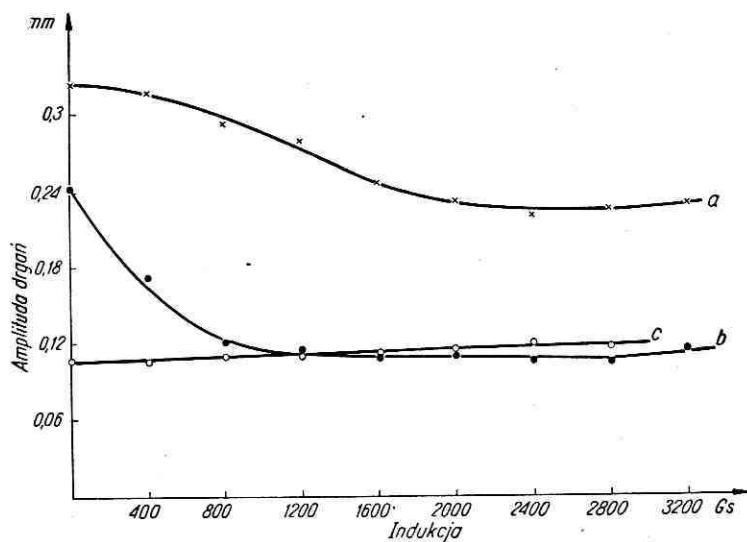


Rys. 21. Analiza widmowa drgań płyty tarczowej (nr 3,  $n = 2500$  1/min.): a — nie tłumionej, b — tłumionej magnetycznie ( $B = 2000$  Gs)





Rys. 22. Analiza widmowa drgań piły tarczowej (nr 3,  $n = 3500$  1/min.): a — nie tłumionej, b — tłumionej magnetycznie ( $B = 1600$  Gs)



Rys. 23. Tłumienie amplitudy drgań wirującej piły tarczowej nr 5 przy  $n = 2150$  1/min. w polu magnetycznym w zależności od wielkości indukcji: *a* — przy kołnierzach zaciskowych o średnicy 80 mm, *b* — przy kołnierzach zaciskowych o średnicy 160 mm, *c* — przy kołnierzach zaciskowych o średnicy 240 mm

i 240 mm wynosi 0,22 mm, co stanowi ok. 205% amplitudy drgań nie-tłumionych piły o kołnierzach zaciskowych 240 mm.

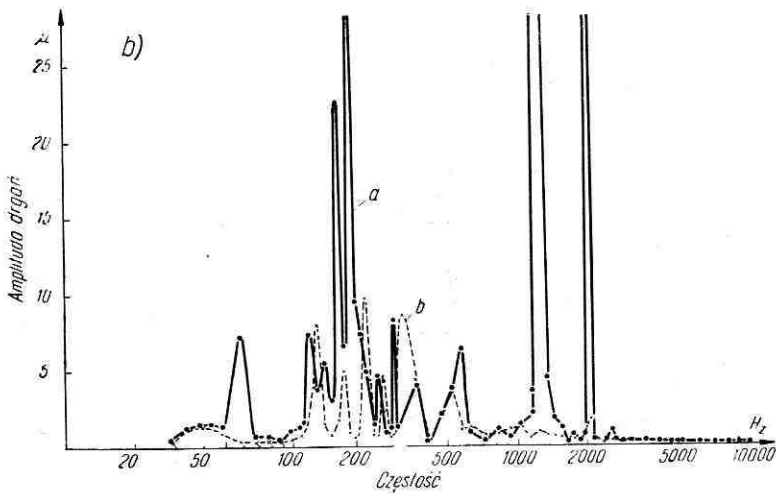
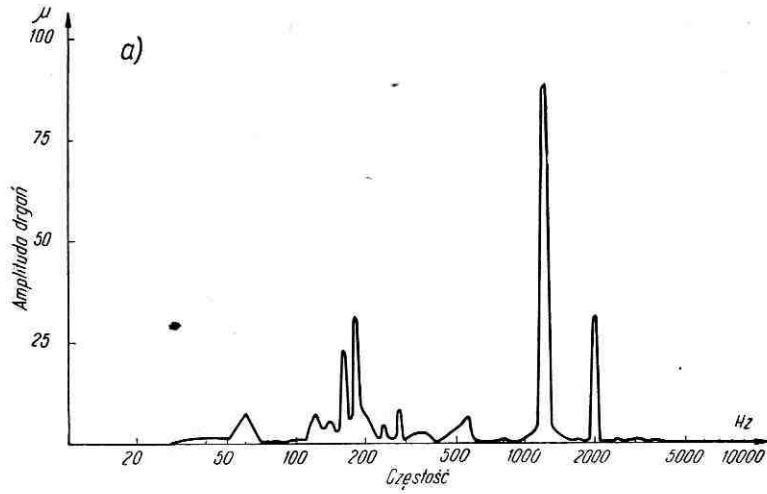
Stosowanie pola magnetycznego do tłumienia drgań piły ściśniętej kołnierzami średnicy 240 mm nie daje żadnych efektów pozytywnych, ponieważ w tym wypadku drgania zostały już wytłumione na drodze mechanicznej.

Dla kołnierzy zaciskowych 80 i 160 mm maksimum tłumienia amplitudy drgań wypadkowych występuje w zakresie indukcji 2000—2800 Gs i wynosi odpowiednio 34,6 i 55,8%.

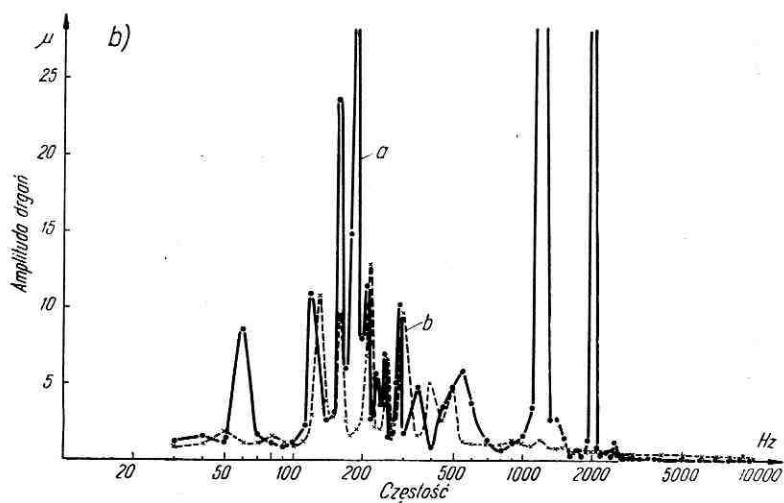
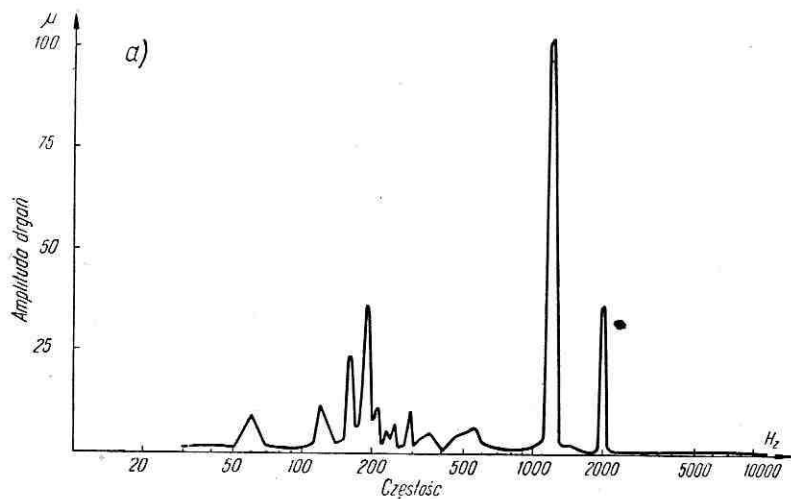
c. Wpływ wielkości rozwarcia zębów piły na kształtowanie się jej drgań. Rys. 24—26 przedstawiają analizę widmową drgań tej samej piły przy różnych rozwarciach zębów. Widmo drgań dla różnych wielkości rozwarcia jest nieomal identyczne. We wszystkich przypadkach występują silne maksima amplitudy drgań składowych przy częstościach 190, 1200 i 2000 Hz, które w polu magnetycznym zostały całkowicie wytłumione.

Z rys. 24—26 widać, że również widmo drgań wytłumionych dla wszystkich wielkości rozwarcia jest prawie takie samo. Wielkość rozwarcia zębów piły nie ma wpływu na rozkład jej drgań.

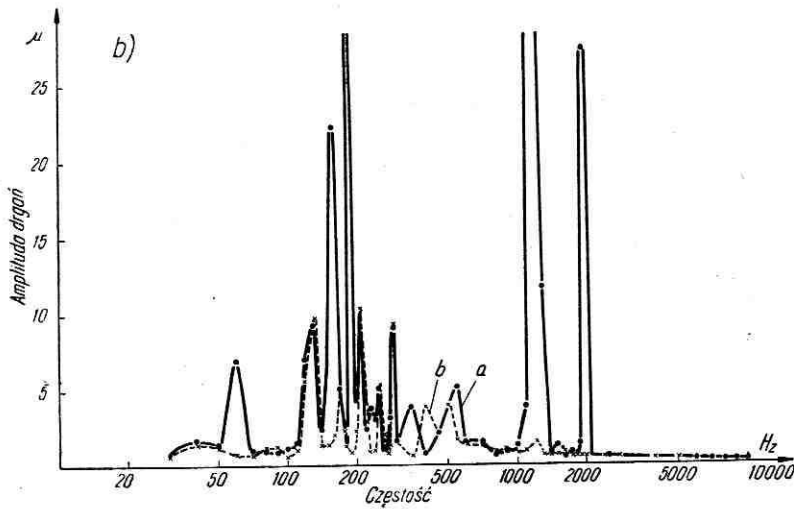
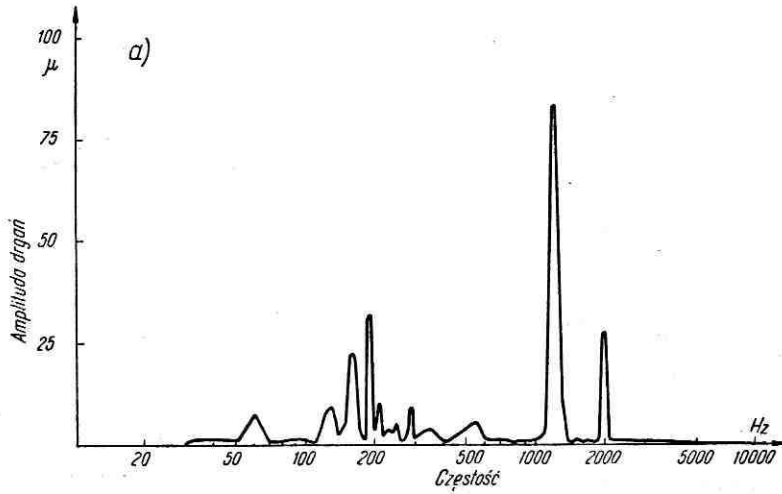
d. Wpływ liczby obrotów na amplitudę drgań piły tarczowej. Zależność amplitudy drgań od liczby obrotów została przedstawiona na rys. 27. Występujące na wykresie maksimum



Rys. 24. Analiza widmowa drgań piły tarczowej (piła nr 4,  $\Delta z = 0,2$  mm,  $n = 2000$  1/min.): a — nie tłumionej, b — tłumionej magnetycznie ( $B = 2000$  Gs).  
 Krzywa ciągła na rys. 24 b jest powtórzeniem w innej skali krzywej z rys. 24 a

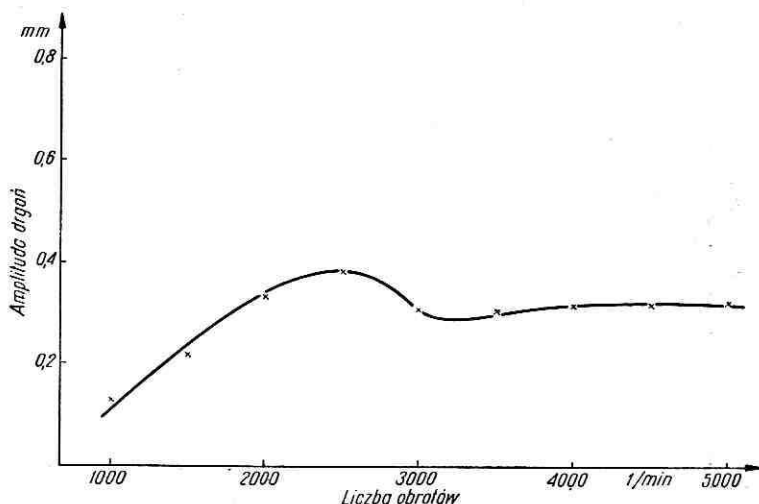


Rys. 25. Analiza widmowa drgań piły tarczowej (piła nr 4,  $\Delta z = 0,4$  mm,  $n = 2000$  1/min.): *a* — nie tłumionej, *b* — tłumionej magnetycznie ( $B = 2000$  Gs)  
 Krzywa ciągła na rys. 25 b jest powtórzeniem w innej skali krzywej przedstawionej na rys. 25 a



Rys. 26. Analiza widmowa drgań piły tarczowej (piła nr 4, rozwarście zębów  $\Delta z = 0,6$  mm,  $n = 2000$  1/min.): a — nie tłumionej, b — tłumionej magnetycznie ( $B = 2000$  Gs)

Krzywa ciągła na rys. 26 b jest powtórzeniem w innej skali krzywej przedstawionej na rys. 26 a



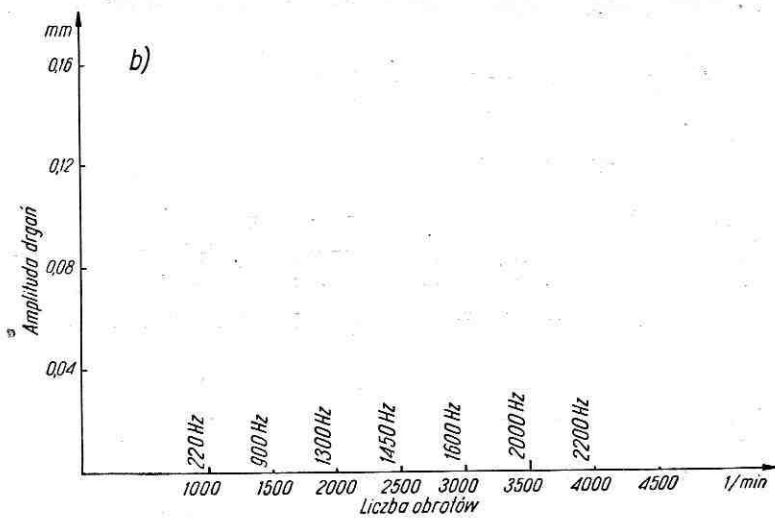
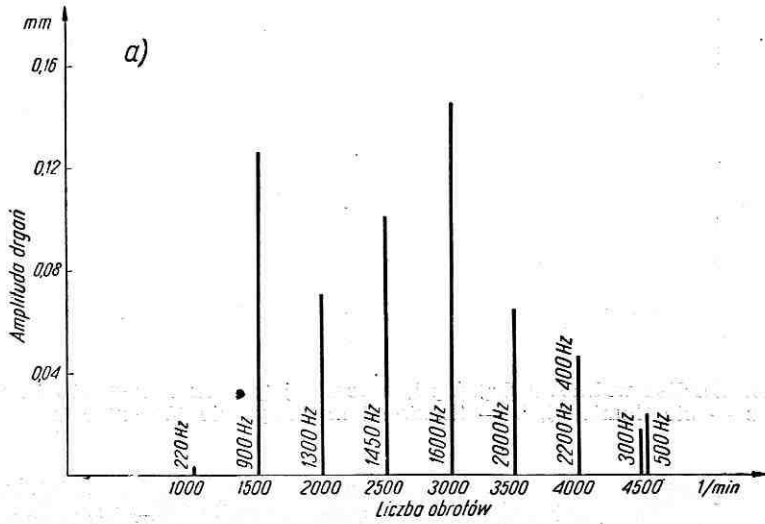
Rys. 27. Zależność amplitudy drgań (piła nr 3) od liczby obrotów

jest uwarunkowane silnymi drganiami o wysokiej częstotliwości, jakie wzbudzają się przy tych obrotach (rys. 20 i 21). Największe tłumienie amplitudy drgań za pomocą pola magnetycznego uzyskuje się w tym zakresie obrotów, w którym przy ruchu wirowym piły wzbudzają się silne drgania o wysokiej częstotliwości (rys. 28, 29, 30). Z rys. 28 widać, że zakres ten zawiera się od 1500 do 4000 1/min. Z omawianego wykresu widać również, że ze wzrostem liczby obrotów maksimum amplitudy drgań przesunęło się w kierunku wyższych częstotliwości.

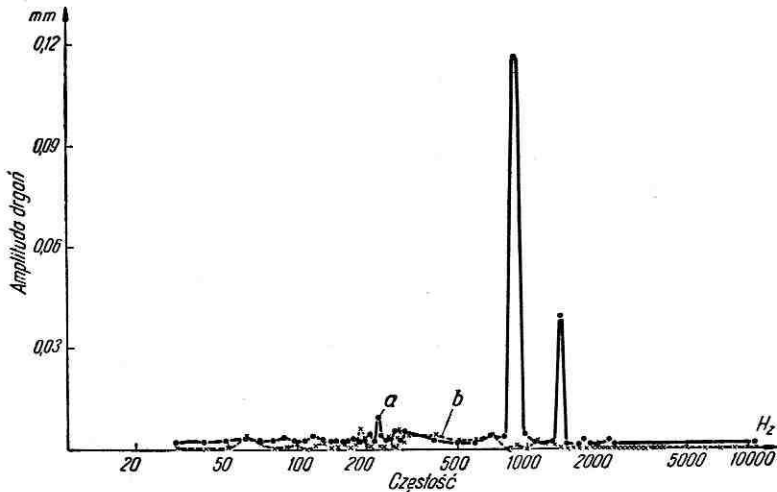
## 2. TŁUMIENIE DRGAŃ PRZY CIĘCIU

Celem tych badań było sprawdzenie, w jakim stopniu wyniki uzyskane przy biegu luzem są słuszne również przy cięciu.

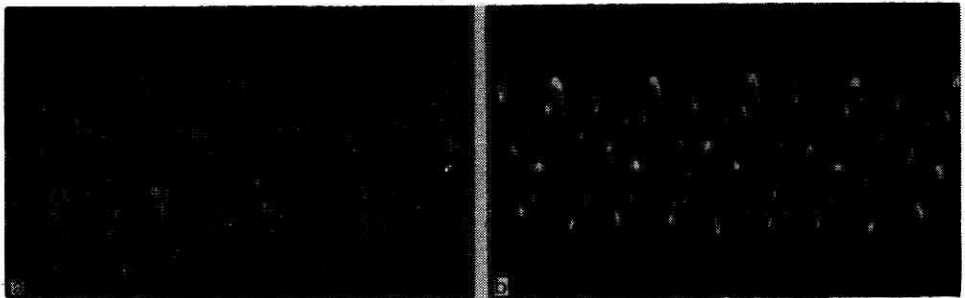
Do skrawania wybrano płytę wiórową o grubości 20 mm. Wyniki badań w tym zakresie zostały przedstawione na rys. 31. Krzywa *a* na tym rysunku obrazuje zależność amplitudy drgań wypadkowych przy cięciu od wielkości indukcji magnetycznej. Krzywa *b* określa tę samą zależność przy biegu luzem. Jak widać z tych zależności, amplituda drgań przy cięciu jest większa niż przy biegu luzem. Zakres indukcji skutecznych dla badanej piły przy cięciu wynosi 800—1600 Gs, przy biegu luzem 1600—2400 Gs. Maksymalne zmniejszenie amplitudy drgań przy cięciu wynosi 12,5%, przy biegu luzem 20,5%. Efekty tłumienia przy cięciu są mniejsze niż przy biegu luzem, ponieważ przy cięciu drgania o wysokiej częstotliwości, które są przede wszystkim tłumione przez pole magnetyczne, występują w mniejszym stopniu (są tłumione przez cięty materiał) niż przy biegu luzem, a rola pola magnetycznego w tym wypadku polega na tłumieniu drgań wzbudzanych przez cięty materiał.



Rys. 28. Wzbudzenie się drgań własnych w piłę (nr 4) przy różnych obrotach:  
 a — bez tłumienia, b — tłumienie polem magnetycznym ( $B = 2400$  Gs)



Rys. 29. Analiza widmowa drgań piły tarczowej (piła nr 4,  $n = 1500$  1/min.):  
*a* — nie tłumionej, *b* — tłumionej magnetycznie ( $B = 2400$  Gs)



Rys. 30. Oscylogramy drgań piły (piła nr 4,  $n = 1500$  1/min.):  
*a* — nie tłumionej, *b* — tłumionej magnetycznie ( $B = 2400$  Gs)  
 Prędkość przesuwu taśmy filmowej  $v = 200$  mm/s

### III. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

W wirujących krążkach, jakimi są piły tarczowe rozchodzą się fale zwane falami zginającymi (2), w dwóch przeciwnych kierunkach — zgodnym z kierunkiem wirowania krążka i przeciwnym do kierunku wirowania. Prędkość kątowna  $\Theta$  rozchodzenia się tych fal wg Timoszenki (5) wyraża się wzorem

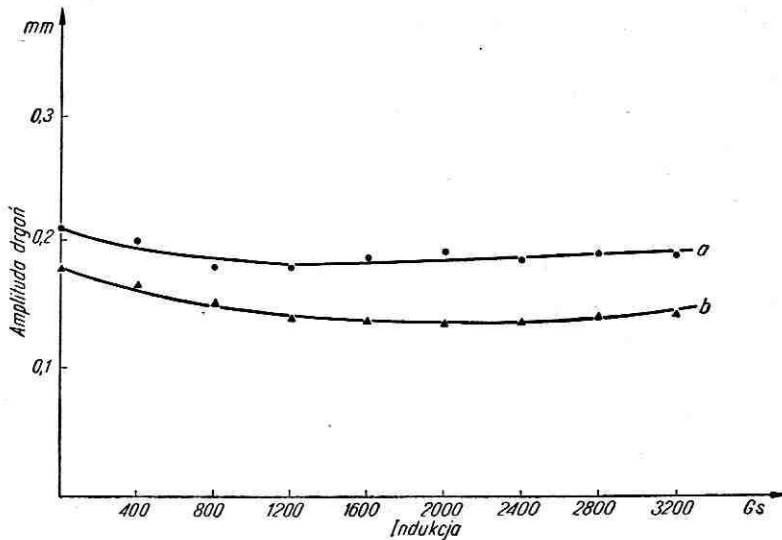
$$\Theta = f / N$$

gdzie  $f$  — częstość drgań fali,

$N$  — liczba węzłów radialnych fali.

Jeżeli prędkość kątowna  $\Theta$  przemieszczania się fal w kierunku przeciwnym do kierunku wirowania krążka jest równa jego prędkości kątowej  $\omega$ , to fale te stają się falami stojącymi.





Rys. 31. Tłumienie amplitudy drgań wirującej piły tarczowej (piła nr 5,  $n = 3600$  1/min.) w polu magnetycznym w zależności od wielkości indukcji: *a* — przy cięciu (posuw 26 m/min.), *b* — przy biegu luzem

Występowanie fal stojących jest szkodliwe nie tylko dlatego, że fale te są źródłem wysokiego poziomu hałasu (silny gwizd), ale również dlatego, że ten typ drgań może niejednokrotnie spowodować uszkodzenie samego wirującego narzędzia.

Analizując wykresy przedstawione na rysunkach: 16 *a*, 20 *a*, 21 *a*, 22 *a*, 24, 25, 26 i 29 widzimy, że występujące tam częstotliwości o maksymalnej amplitudzie (częstotliwości drgań własnych) są szóstymi lub piątymi harmonicznymi częstotliwości kołowej.

$$\omega = 2\pi f_p = 2\pi n/60$$

Dla porównania przytoczono poniżej (tab. 2) zestawienie częstotliwości kołowej  $\omega$  i jej piątej  $f_5$  i szóstej  $f_6$  harmonicznej dla wszystkich obrotów, przy których przeprowadzono analizę widmową drgań.

Tabela 2

Wartości prędkości kątowej piły  $\omega$ , jej piątej  $f_5$  i szóstej  $f_6$  harmonicznej dla różnych obrotów

$n = 1/\text{min}$	$\omega = 2\pi n$ (Hz)	$f_5 = 5\omega$ (Hz)	$f_6 = 6\omega$ (Hz)
1500	157	785	942
1700	178	890	1068
2000	209	1045	1254
2500	269	1345	1572
3000	314	1570	1884
3500	366	1830	2196

W tabeli 2 podkreślono te części, które występują w widmach drgań badanych pił tarczowych z maksymalnymi amplitudami.

Przeprowadzona analiza uzyskanych wyników doświadczalnych dotyczących drgań pił tarczowych potwierdza przytoczone powyżej rozważania teoretyczne na temat wirujących krążków (pił tarczowych).

#### WYNIKI I WNIOSKI

1. Optymalne warunki tłumienia uzyskuje się wtedy, gdy dwa identyczne elektromagnesy zasilane prądem stałym (wyprostowanym i wygładzonym) rozmieszczone są symetrycznie względem płaszczyzny piły możliwie najbliżej jej obwodu, w pozycji wzdłuż cięciwy, biegunami jednoimiennymi naprzeciw siebie.

Najekonomiczniejsze i jednocześnie skuteczne, jeżeli chodzi o tłumienie drgań piły tarczowej, okazały się elektromagnesy o małej powierzchni bieguna (ok. 1 cm<sup>2</sup>), i o wydłużonym jego kształcie.

Wartości indukcji, przy których uzyskuje się maksimum tłumienia, należy dobierać doświadczalnie w zależności od rodzaju piły i liczby obrotów. Dla badanych pił wartości indukcji skutecznych zawierały się na ogół w granicach 2000—2400 Gs.

2. Amplituda drgań piły tarczowej przy cięciu jest większa niż przy biegu luzem.

3. Zmniejszenie wypadkowej amplitudy drgań wirującej piły tarczowej pod wpływem tłumienia polem magnetycznym przy biegu luzem dla różnych przypadków zawierało się w granicach od 0,0—55,8%, przy cięciu maksymalne zmniejszenie amplitudy drgań wynosiło 12,5%.

4. Nie stwierdzono przy biegu luzem wpływu wielkości rozwarcia zębów piły na rozkład jej drgań.

5. Przeprowadzona analiza widmowa drgań przy biegu luzem wykazała, że maksimum amplitudy drgań wirującej piły tarczowej przypada zwykle na częstotliwości będące harmonicznymi (zwykle szóstą albo piątą) częstotliwości kołowej  $\omega = 2 \pi n/60$  (Hz).

#### LITERATURA

1. Ablańowicz-Ledwoń J.: Z badań nad tłumieniem drgań akustycznych pił tarczowych polem magnetycznym. „Przemysł Drzewny” 1965; nr 4.
2. Campbell W., Schenectady N. Y.: The protection of steamturbine disk wheels from axial vibration. „The American Society of Mechanical Engineers Transactions” 1924; tom 46.
3. Pahlitzsch G., Meins W.: Geräuschuntersuchungen an einer Kreissägemaschine. „Arbeitsschutz” 1960; nr 1.
4. Pahlitzsch G., Meins W.: Lärmbekämpfung an Kreissägemaschinen für die Holzbearbeitung. „Kampf dem Lärm” 1962; nr 5.

5. Pahlitzsch G., Meins W.: Lärmbekämpfung an Kreissägemaschinen für die Holzbearbeitung „Kampf dem Lärm“ 1963; nr 2.
6. Timoszenko S. P.: Kolebanija w inżyniernom diele. Moskwa 1959.

*Антони Стшелецки*

## УСПОКОЕНИЕ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ КОЛЕБАНИЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ДИСКОВОЙ ПИЛЫ

### Краткое содержание

Исследования были проведены с пилами с плоским диском диаметром 400—500 мм, толщиной 2,5—3,5 мм. Число зубьев у всех пил было одинаково и составляло 48. Все пилы были изготовлены из стали NCV1, обработанные термически до твердости содержащейся в пределах 44—48 HRC.

Исследования проводились применяя зажимные манжеты диаметром 160 мм. Для сравнения результатов применялись тоже зажимные манжеты диаметром 80 и 240 мм. Обороты изменялись плавно бесступенчатым образом в пределах 1000—6000 об./мин. Исследования проводились объемным методом. Точность измерений амплитуды колебаний составляла 5%.

Самые лучшие результаты были получены при применении двух идентичных электромагнитов (питающихся постоянным током — выпрямленным и сглаженным) в форме подковы (I) с поверхностями полюсов удлиненными в направлении середины пилы (размеры полюса 6×23 мм) размещенных симметрически по отношению к плоскости пилы, по возможности ближе ее окружности, одноименными полюсами против друг друга.

Величины индукции, при которых получается максимум успокоения, следует подбирать экспериментально в зависимости от рода пилы и числа оборотов.

Для исследованных пил, величины эффективных индукций заключались в общем в пределах 2000—2400 гс. Магнитная индукция измерялась в воздушном зазоре образованном поверхностью полюса и поверхностью пилы гауссомером фирмы Норма с точностью до 2%.

Добавочное потребление мощности (измеренное на шпинделе), связанное с вращением пилы в магнитном поле для индукции 2000—2400 гс составляло 0,24—0,38 квт.

Снижение равнодействующей амплитуды колебаний вращающейся дисковой пилы под влиянием успокоения путем магнитного поля при холостом ходе заключалось, для различных случаев, в пределах 0,0—55,8%, при резании максимальное снижение амплитуды колебаний составляло 12,5%.

*Antoni Strzelecki*

## DIE SCHWINGUNGSDÄMPFUNG ROTIERENDER KREISSÄGE IM MAGNETISCHEN FELD

### Zusammenfassung

Die Prüfungen wurden an flachen Kreissägen von Durchmesser 400—500 mm, Dicken 2,5—3,5 mm durchgeführt. Die Zahl der Zähne war bei allen Sägen dieselbe und betrug 48. Alle Sägen wurden aus NCV1-Stahl hergestellt und bis zur Härte 44—48 HRC warmbehandelt.

Bei den Prüfungen verwendete man Klemmflansche von 160 mm Durchmesser und zum Vergleich der Ergebnisse auch von 80 und 240 mm Durchmessern. Die Umdrehungen wurden kontinuierlicher Weise im Bereich 1000—6000 1/Min. verändert. Man wendete bei den Prüfungen die Kapazitätsmethode an. Die Genauigkeit der Messung der Schwingungsamplitude betrug 5%.

Die besten Ergebnisse erhielt man bei der Anwendung zwei identischer Elektromagneten (beschicht mit gleichgerichtetem und ausgeglichenem Gleichstrom) in Hufeisenform (I), mit nach der Sägemitte zu verlängerten Polflächen (die Polausmasse 6 mm × 23 mm), angebracht symmetrisch zu der Sägeblattfläche, möglichst nahe an ihrem Umfang, mit den gleichen Polen einander gegenüber gerichtet.

Die Induktionswerte, bei welchen man das Dämpfungsmaximum erreicht, muss man empirisch in Abhängigkeit von Art der Säge und Drehzahl anpassen.

Für die geprüften Sägen waren die wirksamen Induktionswerte im allgemeinen in Grenzen 2000—2400 Gs. enthalten. Die magnetische Induktion hat man in der durch die Polfläche und Sägefläche gebildete Luftfuge mit Gaussmesser der Firma Norma mit Genauigkeit von 2% gemessen.

Die zusätzliche Stromaufnahme (gemessen am Spindel), die mit Rotation der Säge im magnetischen Feld für die Induktion von 2000—2400 Gs. verbunden ist, betrug 0,24—0,38 kW.

Die Verminderung der Resultante der Schwingungsamplitude der rotierenden Kreissäge unter dem Einfluss der Dämpfung mit magnetischem Feld betrug bei Leergang für verschiedene Fälle 0,0—55,8%, bei Sägen betrug die maximale Reduktion der Schwingungsamplitude 12,5%.

Wpłynęło do Komitetu Redakcyjnego 10 IV 1969