

Warszawa, 14.05.2015 r.

Prof. dr hab. Bogusław Bajkowski
zam. 01-922 Warszawa
ul. Conrada 12 m. 18

**Ocena rozprawy doktorskiej mgr inż. Mariusza Dąbrowskiego
pt. "Analiza wpływu warunków skrawania na zagrożenia wypadkowe związane
ze zjawiskiem odrzutu podczas frezowania materiałów drzewnych"**

Przedstawiona do oceny rozprawa obejmuje 169 stron maszynopisu, w tym 92 rysunki i 32 tabele. Wykaz literatury liczy 91 pozycji w języku polskim, angielskim, niemieckim i francuskim.

Celem pracy było określenie wpływu wybranych warunków skrawania na zagrożenia związane ze zjawiskiem odrzutu podczas frezowania materiałów drzewnych na frezarce dolnowrzecionowej z posuwem ręcznym. Jako ilościową miarę tych zagrożeń przyjęto prędkość odrzutu. Założono, że poziom zagrożenia wypadkowego związanego z odrzutem w znacznym stopniu zależy od przebiegu procesu wgłębiania się ostrzy tnących we frezowany materiał. Przebieg ten jest uwarunkowany takimi czynnikami jak: budowa zastosowanego narzędzia tnącego, stan zużycia jego ostrzy, rodzaj obrabianego materiału i parametry skrawania. Odrzut materiału obrabianego stanowi jedną z głównych przyczyn wypadków podczas mechanicznej obróbki drewna. Niewiele jest prac naukowych na temat zjawiska odrzutu oraz wpływu warunków skrawania na spowodowanie zagrożenia wypadkowego. Z powyższych względów wybór tematu rozprawy doktorskiej był bardzo trafny.

Do badań potrzebnych do wykonania pracy zbudowano oryginalne stanowisko laboratoryjne. Badania doświadczalne prowadzono tylko podczas frezowania zamkniętego, po przeanalizowaniu dwóch rodzajów frezowania – otwartego i zamkniętego.

W punkcie 3 "Cel i zakres pracy" podpunkty 3.2 i 3.3 powinny być umieszczone w punkcie 2 "Stan wiedzy", oprócz dwóch początkowych zdań podpunktu 3.2. Są to wiadomości wynikające z obecnego stanu wiedzy.

W przeglądzie literatury przedstawiono stan wiedzy na temat frezowania materiałów drzewnych. Scharakteryzowano rodzaje frezowania i frezarki do drewna. Stwierdzono, że frezarki dolnowrzecionowe są szczególnie niebezpieczne w użytkowaniu. Należą one do obrabiarek, przy których obsłudze istnieje zagrożenie wystąpienia odrzutu obrabianego materiału. Scharakteryzowano odrzut i przyczyny odrzutu w różnych obrabiarkach z posuwem ręcznym. Obszernie zdefiniowano pojęcie "zagrożenie" i opisano zagrożenie odrzutem występujące w różnych maszynach. Następnie przeanalizowano przebieg wypadków i urazów następujących przy maszynowej obróbce drewna. Są to cenne informacje, ale bezpośrednio nie są związane z obróbką drewna na frezarkach dolnowrzecionowych. Z kolei przedstawiono istniejący stan ochrony przed odrzutem i zalecenia bezpieczeństwa ze względu na odrzut.

W punkcie pracy dotyczącym warunków skrawania podczas frezowania materiałów drzewnych scharakteryzowano istniejące wiadomości na temat narzędzi tnących, parametrów obróbki i obrabianego materiału.

Stanowisko do badań odrzutu jest konstrukcją opracowaną samodzielnie przez Autora rozprawy. Powstało ono na drodze szeregu zmian wynikających z problemów zaobserwowanych podczas prowadzenia prób odrzutu. Stanowisko składa się z frezarki dolnowrzecionowej z silnikiem o mocy 5,5 KW i z płynną regulacją prędkości obrotowej wrzeciona od 2600 do 12000 obr/min. Na stole obrabiarki przymocowany został specjalny zespół pneumatyczno-mechaniczny, którego zadaniem było dociskanie używanych w testach próbek do prowadnic i stołu frezarki oraz inicjowanie ruchu posuwowego.

Opracowanie koncepcji pomiaru prędkości odrzutu i dobranie odpowiednich elementów było jednym z najtrudniejszych problemów w budowie stanowiska badawczego. W tym celu rozpatrywano zastosowanie czujników optoelektronicznych odbiciowych oraz działających w układzie nadajnik – odbiornik, a także użycie cyfrowego oscyloskopu dwukanałowego. Jednak otrzymane rezultaty nie były zadowalające. Ostatecznie do pomiaru prędkości zastosowano szybką kamerę, filmującą przebieg próby odrzutu oraz odpowiednie oświetlenie stanowiska.

W celu uniknięcia niewygodnego i czasochłonnego ustawiania noży w głowicy frezowej opracowano i zbudowano specjalny do tego celu przyrząd, umożliwiający jednoczesną regulację i pomiar wysunięcia ostrza tnącego noża z korpusu głowicy.

Opracowanie i budowa stanowiska badawczego jest niewątpliwie bardzo dużym osiągnięciem Autora. Przeprowadził On wiele prób udoskonalających pracę urządzenia. Poświęcił dużo czasu i wysiłku naukowo-technicznego. Tego typu działanie zasługuje na szczególne wyróżnienie.

Próby odrzutu wykonano na stanowisku badawczym z użyciem próbek z materiałów drewnnych o wymiarach 18x40x500 mm. Przedział prędkości skrawania dla podstawowych narzędzi tnących o średnicy skrawania 125 mm wynosił od 17 do 59 m/s. Przyjęta we wszystkich badaniach stała głębokość skrawania wynosiła 10 mm. W badaniach stosowano trzy typy narzędzi tnących: frez ścinowy i dwa rodzaje głowic frezowych. Przy wyborze narzędzi brano szczególnie pod uwagę powszechność ich stosowania w kraju. Oprócz tego starano się dobrać takie cechy typowych narzędzi, aby wyniki eksperymentalne mogły służyć ich porównaniu. Było to działanie ze wszech miar bardzo słuszne. Do badań wpływu stopienia krawędzi tnących przygotowano komplety noży o różnym stopniu zużycia. Do wykonania kompletów noży lekko stępionych i tępych użyto noży ze stali szybko tnącej, natomiast komplet noży ostrych był z nakładkami z węgliku spiekanego. Miały one takie same parametry geometryczne.

Próbki do badań z trzech różnych materiałów drewnnych. Zostały one wykonane z drewna sosnowego, z płyty wiórowej oraz płyty MDF. Wilgotność próbek wynosiła poniżej 12%.

Niepewność pomiaru prędkości odrzutu została wyznaczona z wzięciem pod uwagę zaleceń odpowiednich norm i zastosowania programu komputerowego do wyznaczania niepewności pomiarów. Uwzględniono także źródła niepewności związane z wyposażeniem pomiarowym oraz ze zjawiskami przypadkowymi zachodzącymi w czasie odrzutu.

Eksperymenty ustalono biorąc pod uwagę dwie podstawowe zasady. Pierwsza z nich polegała na badaniu głównie tych warunków skrawania, na które mamy wpływ i które można szybko zmieniać, takich jak: prędkość frezowania, rodzaj albo typ narzędzia skrawającego i w niektórych przypadkach pewne regulowane parametry geometryczne narzędzi jak np. stopień zużycia narzędzia. Druga zasada ustalania eksperymentów dotyczyła przede wszystkim zbadania i określenia tych warunków skrawania, które w sposób najbardziej istotny mogą się przyczynić do zmniejszenia zagrożenia odrzutem. Po wstępnej analizie kolejnych wyników uzyskiwanych w przeprowadzonych eksperymentach przebieg badań był wielokrotnie modyfikowany.

Podczas badań określono wystawanie krawędzi tnącej narzędzia jako normalne, małe i duże, inne dla głowicy frezowej (1100) i inne dla freza (3110). W badaniach z inną głowicą frezową (3300) ze zeszlifowanymi nożami wystawanie krawędzi tnącej oznaczono jako normalne. W zależności od stopnia stępienia krawędzi tnących noże zostały określone jako ostre ($VB_{max} < 0,02$ mm), lekko stępione, przy maksymalnym ubytku krawędzi tnącej wynoszącej od 0,2 do 0,4 mm oraz tępe, gdy maksymalny ubytek krawędzi tnącej wynosił ok. 0,5 mm. W procesie skrawania, z użyciem 4-nożowej głowicy (1100), brało udział 2 lub 4 noży.

Następnie badano prędkość odrzutu w zależności od typu narzędzia tnącego, prędkości frezowania i rodzaju materiału. Na początku frezowano próbki z płyty MDF, ze względu na ich jednorodność i izotropowość w porównaniu do pozostałych materiałów badawczych tj. drewna sosnowego i płyty wiórowej. Celem badania było określenie wpływu rodzaju narzędzia i prędkości frezowania na prędkość odrzutu. Jest to bardzo świadoma decyzja Autora, umożliwiającą zminimalizowanie wpływu zmiennych właściwości mechanicznych materiału na wyniki badań. Badania przeprowadzono z użyciem trzech różnych narzędzi frezujących: freza ścinowego (3110) oraz dwóch głowic frezowych (1100, 3300). W wyniku tych badań stwierdzono, że wpływ prędkości frezowania jest wyraźny zwłaszcza w przypadku stosowania freza ścinowego. Natomiast prędkość odrzutu rośnie ze wzrostem prędkości frezowania.

Kolejnym etapem badań było określenie wpływu rodzaju materiału obrabianego na prędkość odrzutu. Do tych badań wykorzystano próbki z drewna sosnowego i płyty wiórowej. Do dalszych badań wykorzystano głowicę frezową (1100) o takiej samej liczbie ostrzy tnących oraz średnicy skrawania jak frez ścinowy (3110). Rezultaty badań frezowania sosny są bardzo zbliżone do uzyskanych poprzednio czyli podczas frezowania próbek z płyty MDF. Także wyniki badań uzyskane podczas frezowania próbek z płyty wiórowej są również zbliżone do wyników uzyskanych podczas frezowania próbek z płyty MDF i drewna sosnowego.

W celu sprawdzenia czy liczba noży tnących (2 lub 4) wpływa na prędkość odrzutu przeprowadzono badania dla dwóch rodzajów materiałów. Okazało się, że przy zastosowaniu głowicy frezowej 2-nożowej zarejestrowane prędkości odrzutu próbek sosnowych były zdecydowanie mniejsze dla założonych prędkości frezowania. Natomiast w przypadku frezowania próbek z płyty MDF mniejszą prędkość odrzutu obserwowano tylko dla większej prędkości frezowania. W przypadku obróbki próbek sosnowych dla obu głowic frezowych (2-nożowej i 4-nożowej) zaobserwowano spadkową tendencję zmian prędkości odrzutu ze wzrostem prędkości frezowania.

W celu ustalenia wpływu prędkości frezowania na zagrożenie odrzutem uwzględniono również wysunięcie noży poza korpus głowicy frezowej. W badaniach stosowano głowicę frezową (1100) o trzech wysunięciach noży względem korpusu: małe, normalne i duże oraz frezowano próbki sosny z czterema prędkościami frezowania. Niezależnie od ustawienia noży nie można zauważyć wyraźnej zależności prędkości odrzutu od prędkości frezowania. Podobna sytuacja wystąpiła podczas frezowania próbek z płyt MDF. Natomiast podczas badania prędkości odrzutu dla 2-nożowej głowicy frezowej (3300), dla każdej prędkości frezowania, mniejsze prędkości odrzutu uzyskano głowicą z normalnym wysunięciem krawędzi tnących.

Wartości prędkości odrzutu uzyskane podczas frezowania frezem ścinowym były znacznie większe od uzyskanych podczas frezowania głowicami frezowymi. W związku z tym zbadano prędkości odrzutu w zależności od wystawiania zębów poza korpus freza. Na podstawie otrzymanych wyników nie stwierdzono zauważalnego wpływu wystawiania krawędzi tnącej freza poza jego korpus na prędkość odrzutu.

Następnie badano prędkości odrzutu podczas frezowania głowicami o różnych kątach przyłożenia ostrzy narzędzi. Stwierdzono, że z dużymi prędkościami frezowania prędkości odrzutu dla różnych kątów przyłożenia noży tnących głowicy frezowej nie wykazują istotnych różnic, natomiast w przypadku najmniejszej prędkości frezowania prędkość odrzutu wzrasta ze wzrostem kąta przełożenia.

Kolejne badania miały na celu określenie wpływu zużycia krawędzi tnących narzędzia na prędkość odrzutu. W głowicy frezowej (1100) zastosowano trzy komplety noży o trzech stopniach zużycia (ostre, lekko stępione, tępe). Frezowano z czterema prędkościami skrawania. W przypadku frezowania sosny stwierdzono wyraźny spadek prędkości odrzutu ze wzrostem zużycia narzędzia tnącego. W przypadku frezowania próbek z płyt MDF także stwierdzono podobną, ale mniej wyraźną tendencję do zmniejszania się prędkości odrzutu ze wzrostem zużycia narzędzia tnącego.

W celu analizy wyników badań dokonano weryfikacji statystycznej istotności wpływu poszczególnych czynników na prędkość odrzutu. Zastosowano analizę wariancji (ANOVA) przy poziomie istotności równym 0,05. W przypadku stwierdzenia statystycznej istotności wpływu określonego czynnika obliczono również siłę jego wpływu na prędkość odrzutu. Za miarę wielkości siły wpływu przyjęto wskaźnik, który jest ilorazem sumy kwadratów odchyłeń związanych z danym czynnikiem i całkowitej sumy kwadratów odchyłeń. Dodatkowo stosowano odpowiednią procedurę (test Tukeya) do badania różnic pomiędzy poziomami czynnika. Test ten umożliwia określenie porównań parami w obrębie średnich dla różnych poziomów każdego czynnika. Oprócz analizy statystycznej przeanalizowano wyniki oględzin śladów ostrzy narzędzia tnącego pozostawionych na materiale. Ten sposób analizy wyników badań jest właściwy, ale powyższe wiadomości powinny być umieszczone w pkt. 4 pracy "Metodyka badań".

Pierwszą analizą było określenie wpływu typu narzędzia frezarskiego i prędkości skrawania na prędkość odrzutu. Frezowano próbki z płyty MDF trzema narzędziami z trzema różnymi prędkościami skrawania. Stwierdzono, że typ narzędzia miał największy wpływ na prędkość odrzutu. Szczegółowe porównania istotnych różnic międzygrupowych, wykonane w stosunku do typu narzędzia informują, że w przypadku obu głowic frezowych różnice wyników badań nie są statystycznie istotne. Silny wpływ doboru narzędzia na prędkość odrzutu wynika więc z różnicy otrzymanych wyników w przypadku użycia freza i każdej z głowic frezowych. W celu dokładniejszego określenia wpływu prędkości skrawania na prędkość odrzutu przeanalizowano dane dotyczące różnego i typu narzędzi. Dokonano analizy związku trzech różnych prędkości skrawania a prędkością odrzutu podczas obróbki próbek z płyty MDF frezem ścinowym (3110), a także głowicą frezową (3300) oraz głowicą frezową (1100). Stwierdzono, po analizie wariancji statystyczną istotność tego związku dla wszystkich narzędzi. Największy wpływ zaobserwowano w przypadku freza ścinowego.

Autor, analizując ślady pozostawione na powierzchni próbek przez noże narzędzi odniósł się do tematyki tej pracy, czyli badania przebiegu zdarzeń po wymuszeniu zjawiska odrzutu materiału. Badania dotyczyły wyłącznie skali zagrożeń, wyrażonych prędkością odrzutu materiału. W praktyce, oprócz skali zagrożeń należy jednak uwzględnić prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia niebezpiecznego.

Kolejna analiza dotyczyła wpływu typu narzędzia, prędkości skrawania i materiału obrabianego na prędkość odrzutu (narzędzia – głowica 1100, frez ścinowy 3110, trzy prędkości skrawania, trzy materiały). Stwierdzono, że nie ma wyraźnych różnic między uzyskanymi wynikami średniej prędkości odrzutu podczas frezowania różnych materiałów. Pozostałe średnie prędkości odrzutu, w zależności od typu narzędzia i prędkości skrawania są podobne do uzyskanych we wcześniejszej analizie. Podobnie jak w poprzednim podrozdziale

najsilniejszy wpływ na prędkość odrzutu wywarł typ narzędzia, natomiast wpływ prędkości skrawania oraz jej interakcji z narzędziem podobnie jak wcześniej ustalono. To było oczywiste i nie należało tego powtarzać. W przypadku freza ścinowego wyniki analizy nie potwierdzają istotnego statystycznie wpływu materiału, natomiast dla głowicy frezowej wpływ materiału nie jest znaczny.

Następnie analizowano wpływ liczby noży tnących, prędkości skrawania i materiału obrabianego na prędkość odrzutu próbek (dwa lub cztery noże, dwie prędkości skrawania, dwa materiały – MDF, drewno sosnowe). Wpływ materiału jest bardzo wyraźnie widoczny. W przypadku frezowania sosny wpływ liczby noży tnących głowicy jest bardzo silny.

Analiza wpływu wysunięcia noży tnących głowicy i prędkości skrawania (próbki sosny frezowane za pomocą głowic 1100 w trzech wariantach ustawień – małe, normalne i duże, wysunięcie krawędzi tnących noży przy czterech prędkościach skrawania – 17, 31, 45, 59 m/s). Stwierdzono silny wpływ wysunięcia krawędzi tnących i niewielki wpływ prędkości skrawania.

Analiza wpływu budowy freza i prędkości skrawania. Znikoma siła wpływu tych modyfikacji.

Analiza wpływu kąta przyłożenia i prędkości skrawania. Kąt przyłożenia istotny ok. 18%, brak wpływu prędkości skrawania. Natomiast interakcja prędkości skrawania i kąta przyłożenia – 32%.

Analiza wpływu zużycia narzędzia tnącego, prędkości skrawania i materiału obrabianego (sosna i MDF, głowica frezowa 1100 o trzech stopniach zużycia noży tnących, cztery prędkości skrawania). Wszystkie czynniki oraz ich interakcja mają istotny statystycznie wpływ na wyniki doświadczenia. Przy bardzo stępionych narzędziach średnia prędkość odrzutu maleje.

W celu uniknięcia powtarzania dwukrotnie tych samych wiadomości, które są w znacznym stopniu zawarte w pkt. 5 pracy “Wyniki badań”, informacje dotyczące analizy badań należy umieścić jako podpunkty w odpowiednich rozdziałach punktu “Wyniki badań”. Wówczas nie będzie powtórzeń sposobu dokonywania badań a także zostanie zwiększona przejrzystość analizy wyników badań.

W pkt. 7 pracy “Podsumowanie i wnioski końcowe” powinno być podsumowanie wyników badań i określenie wniosków końcowych. Tak jednak częściowo nie jest. Oprócz potrzebnych danych Autor opisuje zagadnienia, które już sygnalizował w poprzednich rozdziałach rozprawy. Oprócz tego nie powinno być określeń tego typu jak “autor wykazał” czy “aktywność naukową autora”, trzeba użyć innego sformułowania. Wnioski uzyskane z przeprowadzonych badań znajdują się na stronie 146 pracy, natomiast wiadomości na stronach 144, 145 są powtórzeniem wcześniejszych ustaleń.

Przedstawiony układ treści w pracy nie umniejsza wagi zagadnień merytorycznych, ale wymagał od Autora dodatkowego czasu na jej wykonanie.

Przeprowadzony przez Autora przegląd piśmiennictwa wskazuje, że zapoznał się on dokładnie z literaturą zagadnienia. Praca została wykonana bardzo starannie. Opracowano i zrealizowano oryginalne stanowisko badawcze. Przeprowadzono szereg prób testujących i udoskonalających działanie urządzenia. Badania przeprowadzono i wyniki badań analizowano w logicznej kolejności. Wyniki badań przedstawiono w sposób wiarygodny. Świadczy to posiadaniu przez Autora ogólnej wiedzy teoretycznej i umiejętności samodzielnie wykonywania pracy naukowej.

Za oryginalne i indywidualne osiągnięcie Autora uważam kompleksowe przedstawienie zjawiska odrzutu podczas frezowania materiałów drzewnych. Sformułował On wnioski dotyczące poprawy bezpieczeństwa pracy podczas frezowania materiałów drzewnych. Ma to istotne znaczenie dla nauk zajmujących się poprawą bezpieczeństwa pracy. Praca wnosi nowe wartości i stanowi znaczny wkład w zakresie obróbki drewna. Wyrażam pogląd, że posiada ona duże znaczenie naukowe i praktyczne oraz stanowi wydzielone oryginalne rozwiązanie problemu.

Reasumując, Autor w sposób właściwy rozwiązał postawiony przed nim problem naukowy. Zorganizował i przeprowadził udane doświadczenia naukowe oraz dokonał właściwej analizy ich wyników. Przeprowadzone badania mają znaczenie zarówno teoretyczne jak i praktyczne. Oceniana praca spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązującą w tym zakresie ustawę (Dz.U. z 2014 r., poz. 1383 oraz Dz.U. Nr 65 poz. 595, z późn. zm.). Stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

