

Analiza rozwoju konstrukcji wrzecion pilarek formatowych

Analysis of the design development of the sliding table saw spindles

KAZIMIERZ A. ORŁOWSKI
PRZEMYSŁAW DUDEK*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2017.10.125>
English version available on: www.mechanik.media.pl

Producenci pilarek formatowych do drewna dążą do zwiększenia dokładności przecinania. Jedną z metod jest poprawa zachowania się wrzeciona, gdyż od niego w dużej mierze zależą efekty przecinania. Przedstawiono rozwój konstrukcji wrzecion pilarek w okresie ostatniego ćwierćwiecza. Opisano układ zmodernizowanego wrzeciona pilarki formatowej Fx550. **SŁOWA KLUCZOWE:** pilarka formatowa, konstrukcja wrzeciona, prędkość krytyczna, sztywność statyczna

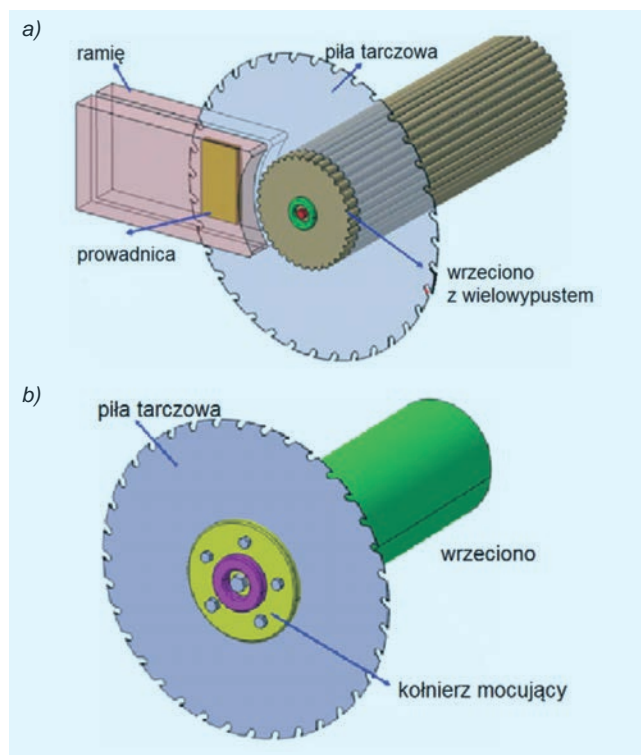
Producers of sliding table saws constantly strive for improvement in sawing accuracy. One of the methods is an upswing in a spindle behavior, since, it affects to a large degree sawing effects. The design development of sliding table saw spindles during the last quarter-century is presented. The spindle system of the modernized spindle of the sawing machine Fx550 is described.

KEYWORDS: sliding table saw, spindle design, critical rotational speed, static stiffness

Przecinanie drewna piłami tarczowymi jest popularną operacją obróbkową w branży drzewnej i meblarskiej. Jej powszechność wynika głównie z tego, że w tym sposobie przecinania wykorzystuje się stosunkowo proste a zarazem tanie narzędzia – piły tarczowe oraz przecinarki tarczowe o niewielkich gabarytach. Oprócz tego na pilarkach tarczowych używanych w branży tartacznej można osiągnąć wysokie prędkości posuwu v_f , nawet do $200 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$.

Są dwa sposoby mocowania pił we wrzecionach pilarek tarczowych. Powszechny w pilarkach tarczowych do pierwotnego przerobu drewna, zwłaszcza w krajach Ameryki Północnej, jest układ z piłami mającymi wielowypust w otworze wewnętrznym współpracujący z wrzecionem pilarki mającym wielowypust zewnętrzny. Poprzeczne położenie piły jest determinowane przez specjalne prowadnice (rys. 1a) [2, 10]. Mogą to być również prowadnice hydrostatyczne, w których do komór hydrostatycznych doprowadzana jest woda [2]. Tego typu rozwiązanie pozwala na pracę z prędkościami obrotowymi większymi od prędkości krytycznych piły [3, 4] i z tego powodu jest uznawane za lepsze [10].

Drugim sposobem osadzania pił na wrzecionach pilarek, powszechnym w Europie, jest ich mocowanie za pomocą kołnierzy mocujących (rys. 1b) [5–7]. W tym przypadku eksploatacja pił musi się odbywać z prędkością obrotową niższą od ich prędkości krytycznych, gwarantującą stabilną pracę narzędzia [7]. Jednakże mocowanie piły za pomocą kołnierzy pozwala w przypadku pilarek wielopiłowych na umieszczanie pił na wrzecionach z za-



Rys. 1. Odmiany konstrukcyjne wrzecion pilarek tarczowych: a) piła swobodna na wrzecionie uchwycona w prowadnicy, b) piła tarczowa mocowana kołnierzowo

chowaniem niewielkich odległości pomiędzy nimi. Na rys. 1b pokazano typ wrzecion stosowany w pilarkach formatowych, w których moment skrawania jest przenoszony najczęściej za pomocą tarcia występującego pomiędzy kołnierzami mocującymi a brzeszczotem piły tarczowej (rys. 3, 4).

Celem niniejszego opracowania jest przeanalizowanie rozwoju konstrukcji wrzecion głównych pilarek formatowych na przestrzeni ostatniego ćwierćwiecza.

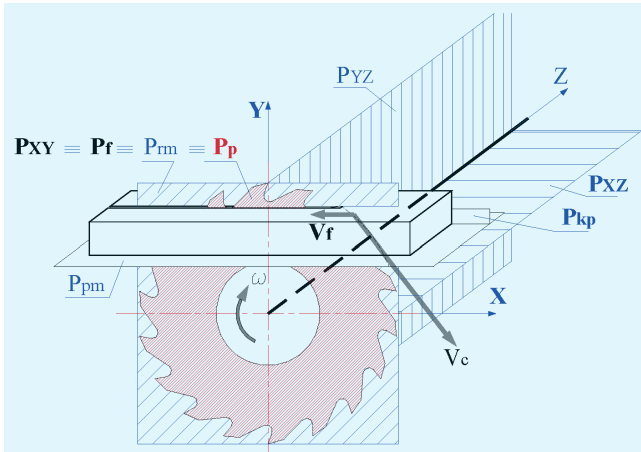
Podstawy teoretyczne

Teoretyczny model przecinania na pilarkie tarczowej formatowej przedstawiono na rys. 2. Jest on zorientowany w prostokątnym układzie współrzędnych X, Y, Z , gdzie oś Z pokrywa się z osią obrotu wrzeciona, a oś X jest równoległa do założonego kierunku ruchu posuwowego ($X \parallel v_f$). Osie układu XYZ wraz z płaszczyznami P_{XY} , P_{XZ} i P_{YZ} wyznaczonymi przez te osie stanowią układ odniesienia do określenia struktury geometryczno-ruchowej pilarki tarczowej formatowej. W modelu układu przecinania pilarki tarczowej przyjmuje się, że płaszczyzna piły P_p wiruje w płaszczyźnie prostopadłej do osi wrzeciona Z , a środek

* Prof. dr hab. inż. Kazimierz A. Orłowski (korlowski@pg.gda.pl) – Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej; inż. Przemysław Dudek (przemyslaw.dudek@rema-sa.pl) – REMA S.A., Reszel

geometryczny i środek ciężkości piły leżą na osi geometrycznej wrzeciona. Dodatkowo materiał przecinany przemieszcza się w płaszczyźnie prowadzenia materiału P_{pm} równoległej do płaszczyzny P_{XZ} ($P_{pm} \parallel P_{XZ}$) i jest prowadzony na kierunku P_{kp} , prostopadłym do płaszczyzny P_{YZ} .

W związku z tym, że w większości rozwiązań pilarek płaszczyzna prowadzenia materiału jest na sztywno związana z płaszczyzną kierunku prowadzenia, to obie te płaszczyzny wyznaczają płaszczyznę ruchu materiału P_{rm} . Z przyjętych uproszczeń wynika, że płaszczyzna ruchu materiału P_{rm} pokrywa się z płaszczyzną piły P_p , tworząc wspólnie założoną płaszczyznę ruchu P_f , czyli płaszczyznę, w której leży zarówno wektor prędkości skrawania v_c , jak i wektor prędkości posuwu v_f [14, 15].



Rys. 2. Teoretyczny model przecinania na pilarence tarczowej formatowej [14]

W warunkach obróbki zawsze dochodzi do przemieszczenia i odkształcenia układu przecinania. Dlatego płaszczyzna piły nie pokrywa się z płaszczyzną ruchu materiału przecinanego ($P_p \neq P_{rm}$), a w efekcie tego rzeczywista płaszczyzna ruchu P_{fe} , w której leżą wektory prędkości skrawania v_c oraz prędkości posuwu v_f , nie pokrywa się praktycznie nigdy z założoną płaszczyzną ruchu ($P_{fe} \neq P_f$). Zjawisko to jest m.in. skutkiem:

- niskiej sztywności statycznej własnej wrzeciona oraz ich podpór, co powoduje, że bicie poprzeczne całkowite piły o średnicy $\varnothing 400$ mm określane poniżej rowków wiórowych, z uwzględnieniem błędów wykonania korpusu piły i dokładności geometrycznej kołnierzy, może dochodzić nawet do 0,42 mm [5, 6, 14, 15].
- sposobu napędu głównego wrzeciona – przykładowo: dla wrzeciona nieodciążonego z kołem pasowym umieszczonym na tylnej końcówce wrzeciona bicie osiowe całkowite piły o średnicy $\varnothing 400$ mm może dochodzić nawet do 0,42 mm [14]; jednakże zastosowanie rozwiązania konstrukcyjnego z wrzecionem odciążonym od sił od napędu daje bardzo pozytywne efekty w postaci minimalizacji odkształceń wrzeciona, a bicie ulega znaczącej redukcji i może osiągać wartości od 0,14 mm [16, 17],
- niskiej sztywności statycznej piły tarczowej [15],
- niskich wartości prędkości krytycznych pił tarczowych [4, 7],
- pracy piły tarczowej w warunkach występowania podczas przecinania zjawiska washboardingu [12, 13]

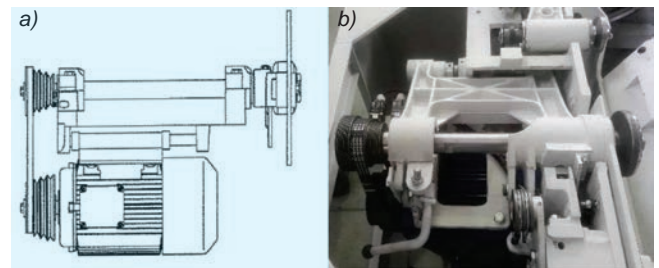
Odmiany konstrukcyjne wrzecion głównych

W ostatniej dekadzie XX w. w pilarkach formatowych montowano wrzeciona długie o stosunku rozstawu podpór L do średnicy wewnętrznej przedniego łożyska d

wynoszącym ok. 12,7 [5, 17, 20, 21] (rys. 3a, b). Tego typu rozwiązanie jest jeszcze spotykane np. w pilarence DMMS-40 Classic (REMA S.A., rys. 3b), w której tradycyjny pasek klinowy w napędzie został wyparty przez pas wielorokowy typu PK. W 2006 r. firma Altendorf pokazała na targach Drema w Poznaniu pilarkę F45 Elmo nowej generacji, z wrzecionem głównym krótkim o rozstawie L/d równym ok. 3 [9]. Od tego czasu na rynku oferowane są głównie pilarki z krótkimi wrzecionami głównymi napędzanymi za pomocą przekładni pasowej z kołem na tylnej końcówce, np. UNICA 400 (Griggio) [22], K 700S (Felder) [23] oraz PF 400S (Rojek) [24].

W większości przypadków wrzeciona pilarek formatowych mogą podczas pracy rozwijać jedną z trzech prędkości obrotowych (roboczych) n_{rob} wynoszących 3500, 4500 lub 6000 min^{-1} [6, 20]. Firma Altendorf w jednej z wersji pilarki F45 proponuje napęd, w którym można bezstopniowo zmieniać prędkości obrotowe wrzeciona w przedziale 2000÷6000 min^{-1} . Z kolei w pilarence UNICA 500 użytkownik ma do dyspozycji 4-stopniową przekładnię pasową z kołem pasowym umieszczonym pomiędzy podporami [22]. W pilarence hybrydowej CONCEPT 350 [25], w której wrzeciono główne pełni również funkcję wrzeciona podcinającego, pojedyncze koło pasowe jest umieszczone między przednią podporą a kołnierzem mocującym piłę. Wrzeciono ma jedną prędkość obrotową – 4000 min^{-1} . Podobne rozwiązanie można spotkać w agregacie pilarki K 700S (Felder) [23].

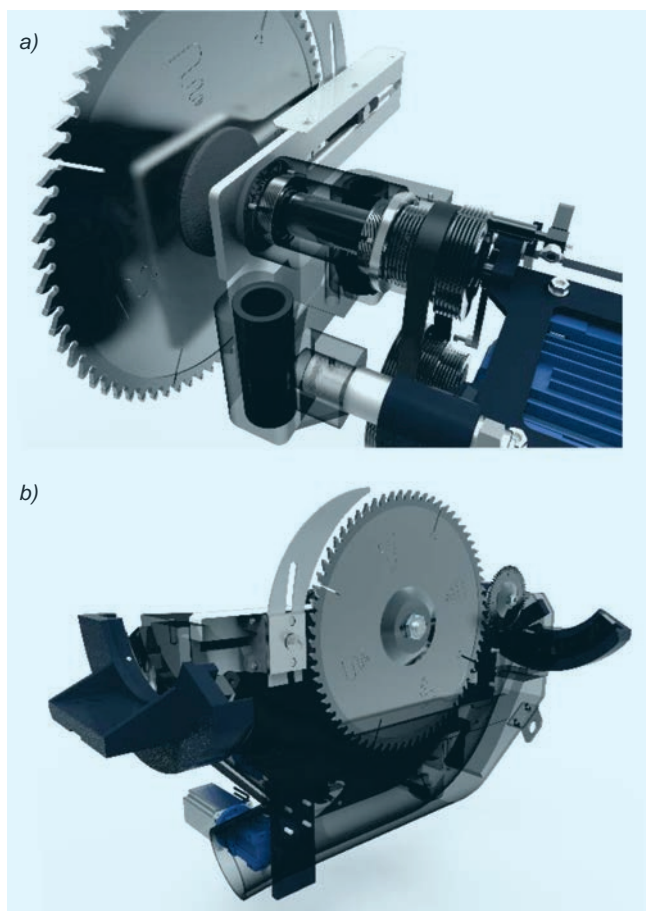
Na podstawie poczynionych obserwacji można założyć, że większość producentów w procesie projektowania stosuje metody statystyczno-porównawcze [18], które polegają na racjonalnym naśladownictwie sprawdzonych praktycznie napędów pilarek o podobnym przeznaczeniu, podobnej wielkości i podobnym układzie kinematycznym, z uwzględnieniem trendów rozwojowych w danej grupie obrabiarek.



Rys. 3. Wrzeciono główne długie pilarki formatowej w: a) pilarence F45 (Altendorf) [21], b) pilarence DMMS-40 Classic (REMA S.A.)

Przedstawione w pracy [6] krótkie wrzeciono pilarki formatowej Fx3 (przed modernizacją) podczas pracy może rozwijać prędkości obrotowe (robocze) n_{rob} wynoszące 3500, 4500 i 6000 min^{-1} [20], zależnie od położenia pasa wielorokowego typu PK na kole pasowym. Tego typu rozwiązanie pojawiło się w tej pilarence w 2011 r. [9]. Na wrzecionie, w kołnierzach o średnicy $\varnothing 125$ mm mogą być mocowane piły tarczowe $\varnothing 450$, $\varnothing 350$ lub $\varnothing 300$ mm, które determinują wybór prędkości obrotowej. Z obu stron wrzeciono jest podparte na łożyskach 6206 2RS1 Explorer (SKF), a $L/d = 2,6$.

Przeprowadzono obliczenia dla modelu wrzeciona, w którym zwiększono średnice podpór do $\varnothing 35$ mm (pod łożysko 6207 2RS1 Explorer), zwiększając jednocześnie stosunek L/d do 3,0 – zgodnie z zaleceniami firmy SKF dla optymalnego rozstawu podpór wrzecion [19]. Z uwagi na dominujący wpływ sił od napędu zmieniono również



Rys. 4. Agregat tnący pilarki formatowej Fx550 (REMA S.A.) z wrzecionem głównym o zmodernizowanej konstrukcji: a) wrzeciono główne od strony silnika, b) widok od strony pił tarczowych (główniej i mniejszej podcinającej)

wymiar średnicy tylnej końcówki. Otrzymane wartości odkształceń dla zmienionego wrzeciona okazały się mniejsze [6], co zaowocowało tym, że dla każdego przypadku prędkości obrotowej roboczej stosunki n_{kryt}/n_{rob} spełniały wymagania określone dla tego typu wrzecion [1, 11]. Ulepszone wrzeciono nowego typu (rys. 4) zostało wdrożone w pilarcie formatowej Fx550 [20].

Należy nadmienić, że w pilarcie Fx550 z nowym agregatem piłowym zdecydowanie obniżył się poziom drgań i hałasu generowanego przez maszynę (średnio o 5 dB).

Dodatkowo przeprowadzono obliczenia numeryczne w celu wykazania wpływu położenia koła pasowego na wrzecionie o zwiększonej sztywności [8] na jego prędkości krytyczne. Wyniki obliczeń wykazały, że dla tego typu sztywnego wrzeciona w każdym z analizowanych przypadków położenia koła n_{kryt} były ok. 14400 min^{-1} , a stosunek $n_{kryt}/n_{rob} \approx 2,4$.

Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, że większość producentów w procesie projektowania układów wrzecionowych stosuje metody statystyczno-porównawcze, które polegają na racjonalnym naśladownictwie sprawdzonych praktycznie napędów pilarek. W przypadku wdrożonego krótkiego wrzeciona głównego w pilarcie Fx550 uzyskano stosunki n_{kryt}/n_{rob} spełniające wymagania określone dla tego typu wrzecion. Zaowocowało to obniżeniem poziomu drgań i hałasu generowanego przez pilarkę.

Przedstawione badania powstały w ramach projektu POIR.01.01.01-00-0588/15 wspartego finansowo przez Europejski Fundusz Rozwoju Regionalnego, którego beneficjentem jest REMA S.A. w Reszlu.

LITERATURA

1. Černoch S. „Strojné technická příručka”. Vol. 1. Praha: SNTL, 1968.
2. Danielson J.D., Schajer G.S. “Saw blade heating and vibration behavior in a circular gang edger”. *Proc. of Saw Tech '93. 3rd. International conference on sawing technology* (ed. Szymani R.). San Francisco, CA., Berkeley, CA.: Wood Machining Institute (14 października 1993): s. 117–136; <https://www.fpl.fs.fed.us/documnts/pdf1993/danie93a.pdf> (dostęp: 25.06.2017).
3. Mohammadpanah A., Hutton S.G. “Maximum operation speed of splined saws”. *Wood Material Science & Engineering*. 11, 3 (2016): s. 142–146.
4. Mohammadpanah A., Hutton S.G. “Flutter instability speeds of guided splined disks: an experimental and analytical investigation”. *Shock and Vibration*. (2015), Art. ID 942141, s. 8.
5. Orłowski K.A. “Analyses of static displacements of a spindle applied in typical circular sawing machines”. *Ann Warsaw Agricult. Univ.-SGGW, For and Wood Technol.* 57 (2005): s. 101–105.
6. Orłowski K.A., Duchnicz K., Dudek P. „Analiza wpływu cech konstrukcyjnych wrzeciona pilarki formatowej na jego obroty krytyczne”. *Mechanik*. 8–9 (2016): s. 1112–1113.
7. Orłowski K., Sandak J., Tanaka C. “The critical rotational speed of circular saw: simple measurement method and its practical implementations”. *Journal of Wood Science*. 53, 5 (2007): s. 388–393.
8. Orłowski K.A., Duchnicz K. “The effect of a belt position in the spindle driving system on critical rotational speeds”. *Ann Warsaw Agricult. Univ.-SGGW, For and Wood Technol.* 95 (2016): s. 303–307.
9. Pikała T., kontakt osobisty, Rema S.A. (2017).
10. Schajer G.S. “Why are guided circular saws more stable than unguided saws?”. *Holz als Roh-und Werkstoff*. 44 (1986): s. 465–469.
11. Svoreň J., Hrkčková M. “Woodworking machines”. Part I. Zvolen: Technical University in Zvolen, 2015.
12. Tian J., Hutton S.G. “Washboarding mechanisms in circular saws”. *Proc. of the 14th Inter. Wood Mach. Seminar*, 1. Paris, Epinal, Cluny (France), (1999): s. 153–162.
13. Tian J., Hutton S.G. “Cutting-induced vibration in circular saws”. *Journal of Sound and Vibration*. 242, 5 (2001): s. 907–922.
14. Wasielewski R., Orłowski K.A. „Wybrane przyczyny niedokładności przecinania drewna piłami”. *Vplyv techniky na kvalitu deleného a obrábaného dreva*. Zvolen: Technická univerzita vo Zvolene, 2008: s. 27–54.
15. Wasielewski R. „Dokładne i oszczędne przecinanie drewna piłami tarczowymi”. Gdańsk: Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2011.
16. Wasielewski R., Orłowski K. „Układ konstrukcyjny wrzeciona precyzarki tarczowej”. Patent PL 209801 (2011).
17. Wasielewski R., Orłowski K.A. “The effect of the power transmission method of the spindle on the position of the circular saw teeth”. *Proc. of the 18th Inter. Wood Mach. Seminar*. Vancouver, Canada, IWMS18, Forintek (7–9 maja 2007): s. 97–103.
18. Wrotny L.T. „Projektowanie obrabiarek. Zagadnienia ogólne i przykłady obliczeń”. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1986.
19. http://www.skf.com/my/products/bearings-units-housings/super-precision-bearings/principles/design-considerations/system-rigidity/index.html?WT.oss=spindle%20rigidity&WT.z_oss_boost=0&tabname=All&WT.z_oss_rank=3 (dostęp: 24.06.2017).
20. <http://rema-sa.pl/lista-produktow#pilarki-formatowe> (dostęp: 26.06.2017).
21. Altendorf F45. pdf <https://docs.google.com/viewer?a=v&pid=sites-&srcid=ZGVmYXVsdGRvbWFpbXmdXJuaXR1cmVtYWNwaW5lc3xneDpmNzQ3MWMwQxMDk1OTM4NTA>.
22. UNICA 400 i UNICA 500 <http://www.griggio.com/en/wp-content/uploads/2014/10/Depliant-UNICA-400-500-in-te-rulow.pdf> (dostęp: 3.07.2017).
23. K 700 S <http://www.felder.pl/pl-pl/produkty/pilarek-formatowych/pilarka-formatowa-new-k-700-s.html> (dostęp: 3.07.2017).
24. PF 400S http://rojek.cz/pdf/PF300L_350_400S_New.pdf (dostęp: 3.07.2017).
25. CONCEPT 350 <http://www.paolonimacchine.it/de/concept350.html> (dostęp: 3.07.2017).