

# Prognozowanie wartości mocy skrawania dla procesu przecinania impregnowanego drewna sosnowego na pilarcze taśmowej

Forecasting values of cutting power for the sawing process of impregnated pine wood on band sawing machine

DANIEL CHUCHAŁA  
KAZIMIERZ A. ORŁOWSKI\*

DOI: <https://doi.org/10.17814/mechanik.2018.8-9.128>

W artykule przedstawiono prognozowane wartości mocy skrawania dla pilarki taśmowej (ST100R firmy STENNER), które są stosowane w polskich tartakach. Wartości mocy skrawania oszacowano dla drewna sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.), które zostało poddane impregnacji. Dla porównania wyznaczono również wartości mocy skrawania dla drewna niezaimpregnowanego. Wartości te określono za pomocą innowacyjnej metody prognozowania sił skrawania, która uwzględnia elementy mechaniki pęknięcia. Uzyskane w ten sposób prognozy porównywano z wartościami mocy skrawania otrzymanymi metodą klasyczną, opartą na właściwym oporze skrawania. **SŁOWA KLUCZOWE:** moc skrawania, drewno sosnowe, drewno impregnowane, pilarka taśmowa

*In this paper the predicted values of cutting power for band sawing machine (ST100R), which is used in the Polish sawmills, were presented. The values of cutting power were determined for wood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.), which was impregnated and not impregnated. These values were estimated using an innovative method of forecasting cutting forces, which takes into account the elements of fracture mechanics. The forecasts obtained in this way are compared with the values of cutting power estimated with the use of the classical method, which is based on the specific cutting resistance.*

**KEYWORDS:** cutting power, Scots pine wood, impregnated wood, band sawing machine

Dzięki wyznaczeniu efektów energetycznych procesu przecinania materiałów można optymalnie zaprojektować obrabiarki, a także procesy obróbki przeprowadzane na tych maszynach. Między innymi dlatego określanie sił skrawania – teoretyczne i doświadczalne – jest zaliczane do podstawowych i zarazem najbardziej zaawansowanych obszarów mechaniki procesu skrawania [6].

Najbardziej rozpowszechnionym podejściem do określenia sił skrawania w procesie przecinania drewna jest model oparty na właściwym oporze skrawania  $k_c$  [8–10]. Model ten jest uważany za klasyczny [10] i dla najbardziej popularnych metod przecinania drewna (za pomocą pilarek ramowych, taśmowych i tarczowych) ma według lite-

ratury przypisane inne wartości właściwego oporu skrawania. Wartości te wyznaczono doświadczalnie [8, 10], jednak nie wiadomo, w jakich warunkach (w literaturze nie sprecyzowano tego), co ogranicza ich wiarygodność. Dodatkowo dla pił o małym rozwarciu całkowitym zaobserwowano znaczne rozbieżności w wartościach właściwego oporu skrawania [12].

W swojej książce Atkins [3] pokazuje, że przy wyznaczaniu sił i mocy skrawania odporność na kruche pęknięcie materiału obrabianego jest równie istotna co wytrzymałość czy tarcie. Na bazie teorii Atkinsa [2, 3], która z powodzeniem była stosowana do opisywania zjawiska w strefie separacji materiału podczas skrawania metali, drewna i materiałów kompozytowych [3], Orłowski wraz z Atkinsem [11] zaproponowali model mocy skrawania. Model ten pozwala na znacznie dokładniejsze prognozowanie mocy przecinania [13], z uwzględnieniem geometrii narzędzia obróbkowego (kąta natarcia  $\gamma_f$ ), warunków tworzenia się wiórów (kąta ścinania  $\Phi_c$ ) i właściwości przecinanego materiału, takich jak: wiązkość  $R_{\perp}$  (praca właściwa potrzebna do rozdzielenia materiału) i naprężenia tnące (styczne) w strefie ścinania  $\tau_{y\perp}$ .

Badania drewna poddanego impregnacji [1, 7, 14] wykazały, że wraz z nabyciem właściwości ochronnych przed grzybami i wpływem warunków atmosferycznych materiał ten zmienia swoje właściwości fizyczne. Dlatego się przypuszcza, że impregnowanie drewna może mieć również wpływ na siły skrawania.

W dalszej części artykułu przedstawiono wyniki prognozowania mocy skrawania przy przecinaniu polskiego impregnowanego drewna sosnowego na pilarcze taśmowej. Wartości mocy skrawania zostały wyznaczone z zastosowaniem modelu wywodzącego się ze współczesnej mechaniki pęknięcia i jednocześnie bazującego na idei Atkinsa [2, 3].

## Badany materiał i analizowana maszyna

Materiałem, który poddano analizie, było drewno sosnowe (*Pinus sylvestris* L.) impregnowane (rys. 1) oraz nieimpregnowane, pochodzące z tej samej partii materiału z tartaku firmy Sylva Sp. z o.o. w Wielu. Do impregnacji użyto preparatu Korasit KS2 firmy Kurt Obermeier GmbH & Co. KG.

\* Dr inż. Daniel Chuchała (danchuch@pg.edu.pl), prof. dr hab. inż. Kazimierz A. Orłowski (korlowski@pg.edu.pl) – Katedra Technologii Maszyn i Automatykacji Produkcji, Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej



Rys. 1. Próbkę impregnowanego drewna sosnowego (nr próbki SOIM-11). Na górze pokazano powierzchnię zewnętrzną, a niżej – powierzchnię wewnętrzną po przecięciu

Właściwości materiałowe dla prostopadłego kierunku prędkości skrawania względem włókien drewna, wiążkość  $R_{\perp}$  (energii właściwą niezbędną do wytworzenia pęknięcia o powierzchni jednostkowej w trakcie skrawania – ang. *fracture toughness*) oraz naprężenia tnące w strefie ścinania  $\tau_{Y\perp}$ , które wykorzystano do prognozowania wartości mocy skrawania (tabl. I), określono według metodologii opracowanej przez Orłowskiego i opisanej w pracach [11, 13] z wykorzystaniem testów skrawalnościowych na pilarsce ramowej PRW15M z eliptyczną trajektorią ostrzy oraz hybrydowym, dynamicznie wyrównoważonym układem napędowym [15].

TABLICA I. Wartości wiążkości i naprężeń tnących w strefie ścinania

Oznaczenie	Opis materiału	$R_{\perp}$ , J·m <sup>-2</sup>	$\tau_{Y\perp}$ , MPa
SOIM	Drewno sosnowe impregnowane	1351,2 ± 714,3	26,26 ± 0,488
SONP	Drewno sosnowe nieimpregnowane	1047,5 ± 1047,5	17,24 ± 0,92
Istotność różnic według testu t-Studenta		nie	tak

Maszyna technologiczna, dla której przeprowadzono prognozowanie mocy skrawania, to pilarka taśmowa typu ST100R firmy STENNER – bardzo popularna w polskim przemyśle tartacznym. Podstawowe parametry pilarki [16] i narzędzi poddanych analizie prognozowania mocy skrawania przedstawiono w tabl. II.

TABLICA II. Podstawowe parametry maszyny i narzędzi

$H_p$ , mm	100	$v_f$ , m·min <sup>-1</sup> (m·s <sup>-1</sup> )	5+60 (0,083+1)
$n_{sb}$ , mm	1	$f_z$ , mm	0,095+1,14
$S_t$ , mm	2,2	$h$ , mm	0,095+1,14
$P$ , mm	32	$P_{EM}$ , kW	15
$\gamma_f$ , °	20	$P_i$ , kW	2,5
$z$	173	$P_{cA}$ , kW	10
$v_c$ , m·s <sup>-1</sup>	29		

Oznaczenia:  $H_p$  – wysokość przecinanego materiału (głębokość przecinania,  $n_{sb}$  – liczba pił,  $S_t$  – rozwarcie całkowite (rzaz teoretyczny),  $P$  – podziałka zębów piły,  $\gamma_f$  – kąt natarcia,  $z$  – liczba zębów piły,  $v_c$  – prędkość skrawania,  $v_f$  – prędkość posuwu,  $f_z$  – posuw na ostrze,  $h$  – grubość warstwy skrawanej,  $P_{EM}$  – moc elektryczna silnika,  $P_i$  – moc jałowa,  $P_{cA}$  – dostępna moc skrawania w strefie skrawania

### Prognozowanie mocy skrawania

Zgodnie z metodą uwzględniającą elementy mechaniki pęknięcia [11] moc skrawania pilarki taśmowej jest wyrażona zależnością:

$$\bar{P}_{cw} = F_c v_c + P_{ac} = z_a \frac{\tau_{Y\perp} S_t \gamma}{Q_{shear}} v_c \bar{h} + z_a \frac{R_{\perp} S_t}{Q_{shear}} v_c \quad (1)$$

gdzie:  $F_c$  – siła skrawania,  $v_c$  – prędkość skrawania,  $P_{ac}$  – moc potrzebna do przyspieszenia wiórów (dla pilarki taśmowej ten człon można pominąć, gdyż przyjmuje małe wartości [12]),  $z_a$  – średnia liczba ostrzy skrawających będących w kontakcie z rzazem,  $S_t$  – rozwarcie całkowite ostrzy piły (rzaz teoretyczny),  $h$  – średnia grubość warstwy skrawanej (dla pilarki taśmowej to jednocześnie posuw na ostrze  $f_z$ ;  $h = f_z$ ),  $\gamma$  – odkształcenie postaciowe w płaszczyźnie ścinania,  $Q_{shear}$  – współczynnik korekcji tarcia.

Parametr  $z_a$  określa wzór:

$$z_a = \frac{H_p}{P} \quad (2)$$

gdzie:  $H_p$  – wysokość przecinanego materiału (głębokość przecinania),  $P$  – podziałka ostrzy piły.

Odkształcenie postaciowe w płaszczyźnie ścinania jest wyrażone równaniem:

$$\gamma = \frac{\cos \gamma_f}{\cos(\Phi_c - \gamma_f) \sin \Phi_c} \quad (3)$$

gdzie:  $\gamma_f$  – kąt natarcia,  $\Phi_c$  – kąt ścinania, który określa położenie płaszczyzny ścinania w odniesieniu do powierzchni skrawania.

Współczynnik korekcji tarcia jest równy:

$$Q_{shear} = \left[ 1 - \frac{\sin \beta_{\mu} \sin \Phi_c}{\cos(\beta_{\mu} - \gamma_f) \cos(\Phi_c - \gamma_f)} \right] \quad (4)$$

gdzie:  $\beta_{\mu}$  – kąt tarcia, określane jako  $\beta_{\mu} = \tan^{-1} \mu$ , przy czym  $\mu$  jest współczynnikiem tarcia pomiędzy powierzchnią natarcia ostrza oraz wiórem i wynosi  $\mu = 0,6$  [5].

Kąt ścinania  $\Phi_c$  jest zdefiniowany przez następujące równanie, które rozwiązuje się za pomocą metod numerycznych [3]:

$$\left[ 1 - \frac{\sin \beta_{\mu} \sin \Phi_c}{\cos(\beta_{\mu} - \gamma_f) \cos(\Phi_c - \gamma_f)} \right] \left[ \frac{1}{\cos^2(\Phi_c - \gamma_f)} - \frac{1}{\sin^2 \Phi_c} \right] = -[\cot \Phi_c + \tan(\Phi_c - \gamma_f) + Z] \left[ \frac{\sin \beta_{\mu}}{\cos(\beta_{\mu} - \gamma_f)} \left\{ \frac{\cos \Phi_c}{\cos(\Phi_c - \gamma_f)} + \frac{\sin \Phi_c \sin(\Phi_c - \gamma_f)}{\cos^2(\Phi_c - \gamma_f)} \right\} \right] \quad (5)$$

gdzie:  $Z$  – parametr, który uwzględnia wpływ rodzaju materiału na wartość kąta ścinania  $\Phi_c$  i wyraża się wzorem:

$$Z = \frac{R_{\perp}}{\tau_{Y\perp} f_z} \quad (6)$$

Do celów porównawczych wartości mocy skrawania określono również z zastosowaniem podejścia klasycznego [8], bazującego na właściwym oporze skrawania  $k_c$  ( $k_{c\_Man}$ ):

$$P_c = \frac{v_f S_t H_p}{60} k_c \quad (7)$$

Wartości właściwego oporu skrawania zostały obliczone z wykorzystaniem zależności zaproponowanej w pracy [8], odpowiedniej dla przypadku przecinania drewna sosnowego na pilarsce taśmowej:

$$k_c = 9,91(5,3 + 0,01H_p - 0,03v_f) \quad (8)$$

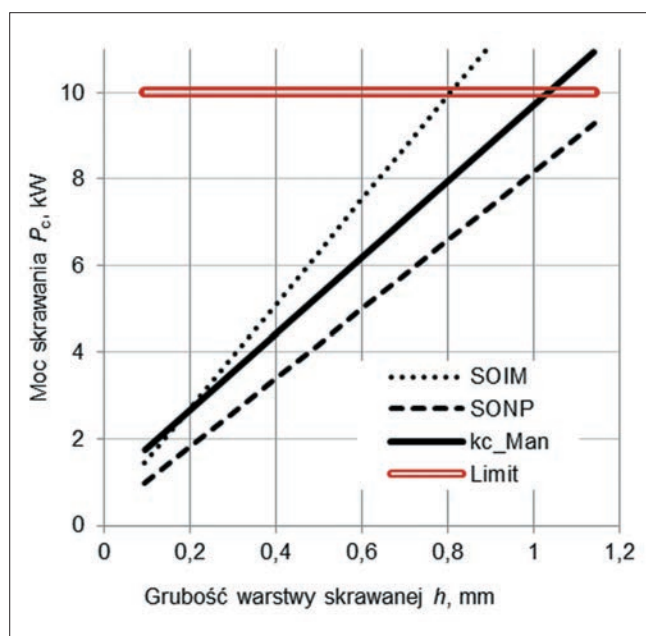
gdzie  $H_p$  jest wyrażone w mm, a  $v_f$  – w  $m \cdot min^{-1}$ .

Wartości uzyskane z równania (8) pomnożono przez współczynnik  $k_{vc} = 1,04$  [8, 10], który uwzględnia prędkość skrawania.

### Wyniki prognozowania mocy skrawania

Prognozowane wartości mocy skrawania dla procesu przecinania na pilarsce taśmowej drewna sosnowego impregnowanego oraz nieimpregnowanego przedstawiono na rys. 2. Uzyskano je z prognoz przeprowadzonych z zastosowaniem dwóch metod:

- metody klasycznej, opartej na właściwym oporze skrawania ( $k_{c\_Man}$ )
- metody uwzględniającej elementy mechaniki pęknięcia (ideę Atkinsa).



Rys. 2. Prognozowane wartości mocy skrawania dla procesu przecinania drewna sosnowego (SOIM – impregnowanego, SONP – nieimpregnowanego) na pilarsce taśmowej ST100R firmy STENNER

Zauważalne są różnice pomiędzy wartościami mocy skrawania dla drewna impregnowanego i nieimpregnowanego. Wartości mocy skrawania dla drewna impregnowanego już przy grubości warstwy skrawanej  $h = 0,8$  mm osiągają poziom limitu mocy silnika napędu głównego (Limit) i są większe o 50% od wartości mocy skrawania dla drewna nieimpregnowanego. W przypadku drewna nieimpregnowanego istnieje możliwość przecięcia materiału w pełnym dostępnym zakresie grubości warstwy skrawanej  $h$ . Moc prognozowana na bazie danych literaturowych ( $k_{c\_Man}$ ) odbiega od analizowanych przypadków, co może być spowodowane wpływem pochodzenia drewna na wartości mocy skrawania [4].

### Wnioski

Metoda prognozowania efektów energetycznych procesu przecinania na pilarsce taśmowej, uwzględniająca elementy mechaniki pęknięcia, pozwala na dokładniejsze wyznaczenie wartości mocy skrawania i wzięcie pod uwagę, czy drewno zostało poddane impregnacji.

W przypadku drewna sosnowego (*Pinus sylvestris* L.) poddanego impregnacji istnieje większe zapotrzebowanie energetyczne procesu przecinania na pilarkach taśmowych.

### Podziękowania

Autorzy chcieliby podziękować panu Piotrowi Tube z firmy Sylva Sp. z o.o. w Wielu (Polska) za udostępnienie drewna sosnowego wykorzystanego w prezentowanych badaniach.

### LITERATURA

1. Adamur H., Fidan M.S., Yasar S.S. "The technological properties of oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) impregnated with boron compounds and natural materials". *BioResources*. 12, 1 (2017): s. 1647–1661.
2. Atkins A.G. "Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanations for some longstanding problems". *International Journal of Mechanical Sciences*. 45 (2003): s. 373–396.
3. Atkins A.G. "The science and engineering of cutting. The mechanics and process of separating, scratching and puncturing biomaterials, metals and non-metals". Oxford: Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, 2009.
4. Chuchala D., Orłowski K., Sandak A., Sandak J., Pauliny D., Baranski J. "The effect of wood provenance and density on cutting forces while sawing Scots pine (*Pinus sylvestris* L.)". *BioResources*. 9, 3 (2014): s. 5349–5361.
5. Glass S.V., Zelinka S.L. "Wood Handbook – Wood as an Engineering Material (Centennial Edition). (Chapter 4: Moisture Relations and Physical Properties of Wood)". Madison. General Technical Report FPL-GTR-190. WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2010, s. 508, [www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl\\_gtr190.pdf](http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf).
6. Grzesik W. „Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych”. WNT, 2010.
7. Konopka A., Baranski J., Orłowski K., Szymanowski K. "The effect of full-cell impregnation of pine wood (*Pinus sylvestris* L.) on changes in electrical resistance and the accuracy of moisture content measurement using resistance meters". *BioResources*. 13, 3 (2018): s. 1360–1371.
8. Manžos F.M. "Derevorezušie Stanki". Moskwa: Izdatel'stvo Lesnaia Promyšlennost', 1974.
9. Naylor A., Hackney P., Perera N., Clahr E. "A predictive model for the cutting force in woodmachining developed using mechanical properties". *BioResources*. 7, 3 (2012): s. 2883–2894.
10. Orlicz T. "Obróbka drewna narzędziami tnącymi". Warszawa: Wydawnictwo SGGW-AR, 1983.
11. Orłowski K.A., Atkins A. "Determination of the cutting power of the sawing process using both preliminary sawing data and modern fracture mechanics". In: Navi P., Guidoum A. (eds): *Proceedings of the third international symposium on wood machining. Fracture mechanics and micromechanics of wood and wood composites with regard to wood machining*. 21–23 May, Lausanne, Switzerland: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2007.
12. Orłowski K.A. "The fundamentals of narrow-kerf sawing: the mechanics and quality of cutting". Publishing House of the Technical University in Zvolen, Technical University in Zvolen, 2010.
13. Orłowski K.A., Ochrymiuk T., Atkins A., Chuchala D. "Application of fracture mechanics for energetic effects predictions while wood sawing". *Wood Science and Technology*. 47, 5 (2013): s. 949–963 (open access).
14. Percin O., Sofuoglu S.D., Uzun O. "Effect of boron impregnation and heat treatment on some mechanical properties of oak (*Quercus petraea* Liebl.) wood". *BioResources*. 10, 3 (2015): s. 3963–3978.
15. Wasielewski R., Orłowski K. "Hybrid dynamically balanced saw frame drive". *Holz Roh-Werkst*. 60 (2002): s. 202–206.
16. STENNER. ST100R Radial Arm Resaw, Stenner Ltd. (pdf, ulotka), 2011.