

*Analytical and experimental studies on vibratory cutting of book blocks***Badania analityczne i eksperymentalne wibracyjnego krojenia bloków książkowych**

DOI: 10.15199/62.2024.11.22

A new method of vibratory cutting of book blocks using a circular knife set with a small eccentricity were presented. The processing process can take place in two modes: continuous cutting and intermittent (impulsive) cutting. A math. model was developed and computer calculations of the vibratory cutting force were performed. Anal. studies were compared with the results of exptl. studies conducted at a laboratory stand equipped with a special carriage-dynamometer, which, using a computer measuring system, enabled the recording of the cutting force components. The greatest impact on the components of the book block cutting force was exerted by the block feed speed, the knife rotational speed and the eccentricity value.

Keywords: vibratory cutting, book block, circular knife, cutting force, eccentricity of knife

Przedstawiono wyniki badań nowego sposobu wibracyjnego krojenia bloków książkowych nożem krążkowym ustawionym z niewielkim mimośrodem. Na podstawie analizy kinematyki wibracyjnego krojenia wykazano, że proces obróbki może odbywać się w dwóch trybach: krojenie nieprzerwane oraz krojenie przerywane (impulsowe). Opracowano model matematyczny i przeprowadzono komputerowe obliczenia siły wibracyjnego krojenia. Badania analityczne porównano z wynikami badań eksperymentalnych. Na podstawie badań ustalono, że największy wpływ na składowe siły krojenia bloków książkowych wywierają prędkość posuwu bloków, prędkość obrotowa noża i wielkość mimośrodu.

Słowa kluczowe: cięcie wibracyjne, blok książkowy, nóż krążkowy, siła krojenia, mimośród noża

Stosowany do cięcia książek tradycyjny, gilotynowy sposób krojenia płaskim nożem powoduje, że współczesne krajarki charakteryzują się znacznymi obciążeniami dynamicznymi oraz koniecznością unieruchomienia książek podczas ich obróbki, co zmniejsza wydajność procesu produkcyjnego. Stan ten powoduje konieczność poszukiwań nowych sposobów krojenia książek. W ostatnich latach odnotowuje się intensywne badania i próby praktycznego wykorzystania wibracji narzędzi tnących przy obróbce krojeniem różnych materiałów, w tym materiałów papierniczych¹⁻⁴). Znacznego zmniejszenia siły krojenia oraz polepszenia jakości obróbki bloków książkowych można oczekiwać, stosując wibracyjne cięcie boków książek podczas ich posuwu obracającym się nożem krążkowym ustawionym z niewielkim mimośrodem.

Celem pracy była analiza badań analitycznych oraz eksperymentalnych zaproponowanego nowego wibracyjnego sposobu potokowego krojenia książek.

Część doświadczalna**Przedmiot badań**

W celu zmniejszenia siły krojenia podczas obróbki bloków książkowych zastosowano do ścinania krawędzi boków książek obrotowe noże krążkowe ustawione z niewielkim mimośrodem. Na rys. 1a przedstawiono zasadę krojenia nożem krążkowym 1 boku bloku książki 3, która jest zaciśnięta w transporterze 2 linii automatycznej i jest podawana na wibrujący nóż 1⁵). Dzięki ustawieniu noża krążkowego 1 z mimośrodem *e* uzyskuje się wibracyjny charakter obróbki, co zmniejsza siłę krojenia i umożliwia potokową (bezzprzestojową) obróbkę książek. Jednym z najważniejszych parametrów procesu krojenia, wpływającym na wielkość siły krojenia, jest kąt naostrzenia ostrza noża. W procesie krojenia następuje transformacja, czyli zmniejszenie tzw. statycznego kąta naostrzenia narzędzia tnącego, co przejawia się w kinematycznym zaostreniu ostrza (rys. 1b). W zależności od wybranych parametrów obróbki, rzeczywisty kąt krojenia staje się o wiele mniejszy od kąta naostrzenia noża, co powoduje znaczne zmniejszenie siły krojenia.

Badania analityczne

Analizę transformacji kąta zaostrenia noża krążkowego przeprowadzono dla dwóch kierunków obrotów: współbież-



Dr hab. inż. Georgij PETRIASZWILI, prof. PW (ORCID: 0000-0003-0696-5463), w roku 1978 ukończył studia w Ukraińskiej Akademii Druku we Lwowie. W 1990 r. uzyskał stopień doktora na tej samej uczelni, a w 2010 r. stopień doktora habilitowanego na Wydziale Informatyki Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie. Obecnie pełni funkcję profesora uczelni w Politechnice Warszawskiej na Wydziale Mechanicznym Technologicznym. Jest ekspertem i rzeczoznawcą Polskiej Izby Druku. Specjalność – poligrafia.

***Adres do korespondencji:**

Instytut Mechaniki i Poligrafii, Politechnika Warszawska, ul. Narbutta 85, 02-524 Warszawa, tel.: (22) 234-84-65, e-mail: georgij.petriaszwili@pw.edu.pl

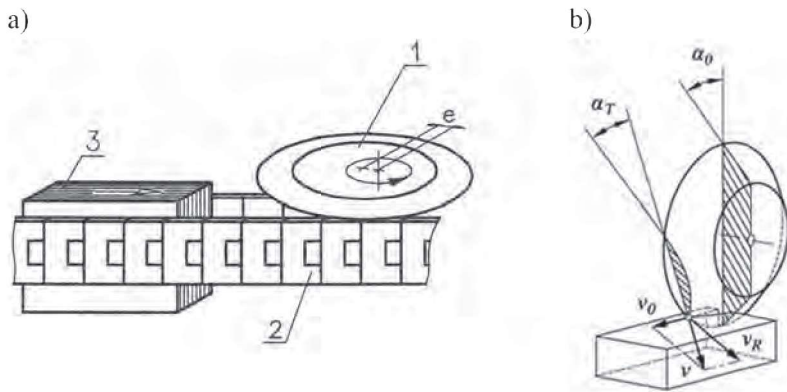


Fig. 1. Principle of vibratory cutting of the sides of book blocks (a)⁵⁾ and transformation of the cutting angle (α_T) for cutting with a circular knife (b)⁶⁾; 1 – circular knife, 2 – transporter, 3 – book block, e – eccentricity of the setting of the circular knife, α_0 – “static” angle of sharpening the knife, α_T – actual angle of cutting, v_0 – feed speed of the processed material, v_R – linear speed of the blade of the rotating knife

Rys. 1. Zasada wibracyjnego krojenia boków bloków książkowych (a)⁵⁾ oraz transformacja kąta krojenia (α_T) przy krojeniu nożem krążkowym (b)⁶⁾; 1 – nóż krążkowy, 2 – transporter, 3 – blok książkowy, e – mimośród ustawienia noża krążkowego, α_0 – „statyczny” kąt naostrzenia noża, α_T – rzeczywisty kąt krojenia, v_0 – prędkość posuwu obrabianego materiału, v_R – liniowa prędkość ostrza obracającego się noża

nego, gdy kierunek obrotów jest współbieżny z kierunkiem posuwu bloku książkowego, oraz przeciwbieżnego, kiedy kierunek obrotów noża jest przeciwny do kierunku posuwu bloku książkowego (rys. 2)⁷⁾.

Mimośrodkowe ustawienie noża krążkowego przyczynia się do zmiany kinematyki procesu obróbki w czasie jednego cyklu obrotu noża, okresowej zmiany wielkości i kierunku wektora prędkości krojenia, gdzie prędkość liniowa (styczna) ostrza v_R zmienia się w zakresie od $v_R = \omega(R - e)$ do $v_R = \omega(R + e)$, co doprowadza do cyklicznych wahań wielkości kinematycznych kątów zaostrenia ostrza noża podczas obróbki⁸⁾.

Rzeczywisty kąt krojenia α_T noża krążkowego przy krojeniu współbieżnym i przeciwbieżnym można określić z ogólnego wzoru (1)^{6, 9)}:

$$\alpha_T = \arctan\left(\frac{\tan(\alpha_0) \cdot v_N}{v}\right) \quad (1)$$

w którym α_0 oznacza „statyczny” kąt naostrzenia noża, v rzeczywistą prędkość krojenia, a v_N normalną składową prędkości v .

W zależności od wielkości mimośrodu e prędkości kątowej ω prędkości posuwu bloku książkowego v_0 oraz wartości prędkości normalnej v_N (prędkości zmiany wartości promienia rzeczywistego ρ) proces krojenia może odbywać się w dwóch różnych trybach: przerywane (impulsowe) krojenie, kiedy ostrze noża w pewnej fazie obrotu noża wychodzi z kontaktu z blokiem książkowym, i ciągłe (stałe) krojenie, kiedy ostrze noża znajduje się podczas krojenia w stałym kontakcie z blokiem książkowym.

Proces krojenia zostanie przerwany w momencie, gdy prędkość punktu kontaktu ostrza noża z blokiem książki będzie miała kierunek przeciwny do kierunku prędkości posuwu i ich wartości bezwzględne będą ze sobą równe. Na rys. 3a i 3b przedstawiono wykresy zmian rzeczywistego kąta krojenia α_T w czasie jednego obrotu noża krążkowego, sporządzone na podstawie komputerowych obliczeń kinematyki wibracyjnego krojenia przy różnych parametrach procesu¹⁰⁾. Pionowe przerywane linie na obu wykresach oznaczają położenie noża, kiedy proces ciecicia jest wznawiany po przerwie.

Analizując otrzymane w wyniku obliczeń wykresy, można stwierdzić, że przy przeciwbieżnym krojeniu rzeczywisty kąt krojenia jest mniejszy niż w przypadku krojenia współbieżnego. Oznacza to, że przy krojeniu przeciwbieżnym można oczekiwać mniejszej siły krojenia bloków książkowych.

Badania eksperymentalne

Celem badań eksperymentalnych było porównanie założeń analitycznych z wynikami badań doświadczalnych wykonanych na specjalnym stanowisku laboratoryjnym. Stanowisko laboratoryjne wyposażono w specjalną karetkę

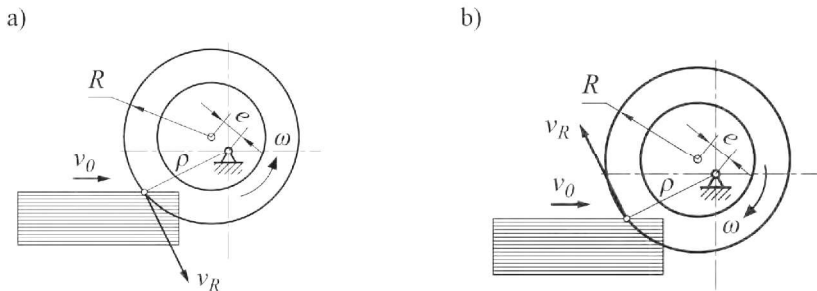


Fig. 2. Diagram of co-rotating (a) and counter-rotating (b) cutting of a book block with an eccentrically positioned knife; R – knife radius, v_0 – feed rate of the book block, ω – angular rotational speed of the knife; $v_R = \omega \cdot \rho$ – linear speed of a point on the knife blade, ρ – actual radius of rotation

Rys. 2. Schemat współbieżnego (a) i przeciwbieżnego (b) krojenia bloku książkowego nożem ustawionym mimośrodkowo⁸⁾; R – promień noża, v_0 – prędkość posuwu obrabianego materiału, $v_R = \omega \cdot \rho$ – prędkość liniowa punktu na ostrzu noża, ω – kątowa prędkość obrotowa noża, ρ – rzeczywisty promień obrotu

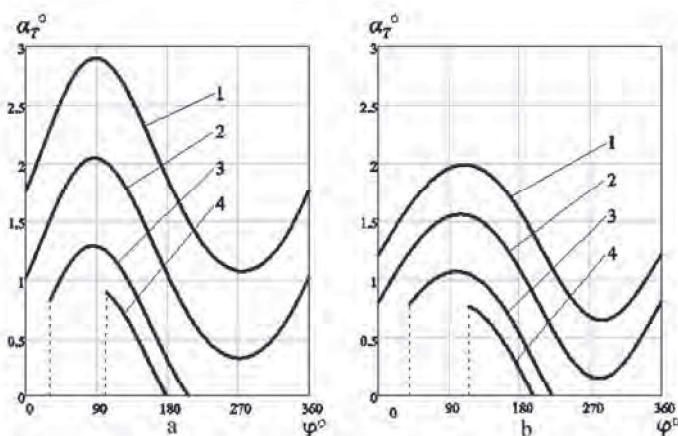


Fig. 3. Graphs of the change in the real cutting angle in the rotation cycle of the circular knife set with eccentricity e for co-rotating (a) and counter-rotating (b) cutting and various ratios v_R/v_0 ^{10, 13)}; 1 – $v_R/v_0 = 5$; 2 – $v_R/v_0 = 8$; 3 – $v_R/v_0 = 20$; 4 – $v_R/v_0 = 80$ (calculated at $R = 100$ mm, $e = 5$ mm, $\alpha_0 = 20^\circ$, knife rotational speed $n = 2000$ rpm)

Rys. 3. Wykresy zmiany rzeczywistego kąta krojenia w cyklu obrotu noża krążkowego ustawionego z mimośrodem e dla współbieżnego (a) oraz przeciwbieżnego (b) krojenia i różnych parametrów v_R/v_0 ^{10, 13)}; 1 – $v_R/v_0 = 5$; 2 – $v_R/v_0 = 8$; 3 – $v_R/v_0 = 20$; 4 – $v_R/v_0 = 80$ (obliczono dla $R = 100$ mm, $e = 5$ mm, $\alpha_0 = 20^\circ$, prędkość obrotowa noża $n = 2000$ rpm)

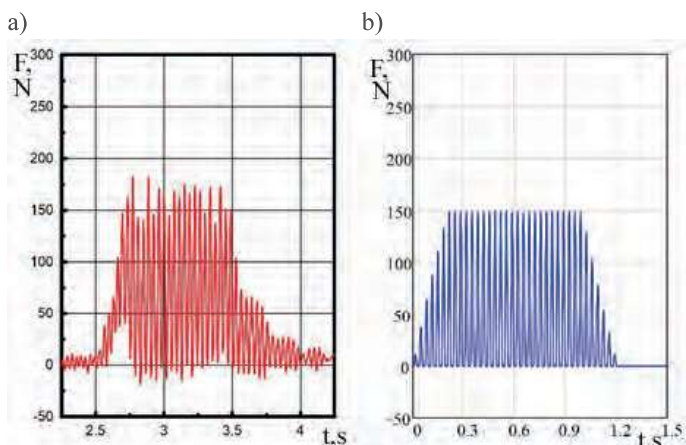


Fig. 4. Graphs of the change in the cutting force F acting on the transport carriage during cutting of a 10 mm thick book block; a) experimentally recorded cutting force oscillogram; b) computational graph of the change in the cutting force

Rys. 4. Wykresy zmiany składowej siły krojenia F działającej na karetkę transportową podczas cięcia bloku książkowego o grubości 10 mm; a) zarejestrowany eksperymentalnie oscylogram siły krojenia; b) obliczeniowy wykres zmiany siły krojenia

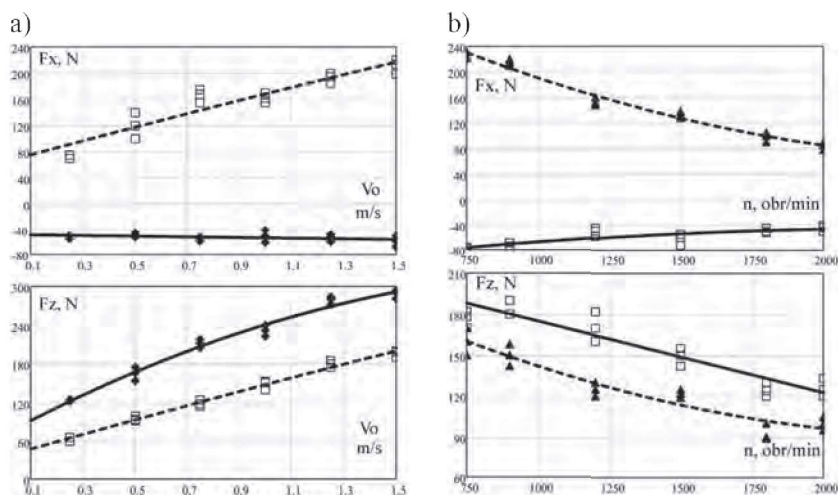


Fig. 5. Effect of the book block cutting parameters with an eccentric circular knife on the force components F_x and F_z ; a) impact of the block feed speed (m/s); b) impact of the rotational speed of the circular knife n (rpm); continuous line of the graphs – co-rotating cutting; dashed line – counter-rotating cutting

Rys. 5. Wpływ parametrów cięcia bloków książkowych na składowe siły F_x i F_z ; a) wpływ prędkości posuwu bloku (m/s); b) wpływ prędkości obrotowej noża krążkowego n (rpm); linia ciągła wykresów – współbieżne krojenie; linia przerywana – przeciwbieżne krojenie

(dynamometr), która za pomocą komputerowego układu pomiarowego firmy National Instruments (USA) umożliwia rejestrację składowych siły krojenia, poziomą składową F_x (wzdłuż kierunku posuwu bloku) oraz składową F_z (prostopadłą do linii posuwu bloku, w płaszczyźnie krojenia).

Zgodnie z przeprowadzonymi badaniami^[11, 12] obliczeniową siłę krojenia bloku książkowego F_n w kierunku posuwu bloku można określić, korzystając z empirycznej zależności (2):

$$F_n = K_0 \cdot \alpha_T^\gamma \cdot L \quad (2)$$

w której K_0 oznacza uogólniony współczynnik uwzględniający gramaturę papieru, jego wilgotność i stopień zużycia ostrza noża, γ współczynnik uwzględniający stopień wpływu kąta naostrzenia noża na siłę krojenia, a L długość linii krojenia.

Na rys. 4a przedstawiono zarejestrowany eksperymentalnie oscylogram zmian poziomej składowej F_x przy cięciu bloku książkowego o grubości 10 mm, a na rys. 4b wykres siły F_n , który został obliczony na podstawie komputerowych symulacji procesu krojenia bloku książkowego o grubości 10 mm.

W trybie krojenia przerywanego (rys. 4) siła na nożu w momencie oderwania ostrza od papieru spadała praktycznie do zera i ponownie rosła od momentu ponownego wejścia krawędzi tnącej w kontakt z blokiem. Dynamiczny charakter oddziaływania ostrza noża na papier zwiększał efektywność procesu obróbki poprzez możliwe zmniejszenie temperatury w strefie cięcia, wskutek okresowego braku kontaktu ostrza noża krążkowego z warstwami papieru.

Na rys. 5 przedstawiono otrzymane w wyniku eksperymentów typowe wykresy wpływu prędkości posuwu karetki transportowej (rys. 5a) oraz prędkości obrotowej noża krążkowego na składowe siły F_x i F_z przy cięciu współbieżnym i przeciwbieżnym.

W wyniku badań doświadczalnych ustalono, że największy wpływ na siłę krojenia miały prędkość posuwu bloku książkowego, prędkość obrotowa noża krążkowego i wielkość mimośrod. Przy przeciwbieżnym krojeniu oraz ustawieniu wielkości mimośrodu w zakresie $e = 0,5-1$ mm można osiągnąć zmniejszenie siły krojenia bloków książkowych o 1,3–1,9 razy w porównaniu z krojeniem nożem krążkowym, bez ustawienia mimośrodu.

Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały praktyczną możliwość zastosowania technologii krojenia broszur i bloków książkowych nożem krążkowym ustawionym mimośrodowo, co stwarza możliwość opracowania nowych linii potokowych do wysokowydajnego krojenia bloków książkowych.

Otrzymano: 30-09-2024

Zrecenzowano: 21-10-2024

Zaakceptowano: 25-10-2024

Opublikowano: 20-11-2024

LITERATURA

- [1] D.E. Brehl, T.A. Dow, *Precis. Eng.* 2008, **32**, 153.
- [2] W. Cao, J. Zha, Y. Chen, *Appl. Sci.* 2020, **10**, nr 13, 4676.
- [3] K.-R. Deibel, J. Boos, K. Wegener, *IEEE International Ultrasonics Symposium*, Dresden 2012, 2663, doi: 10.1109/ULTSYM.2012.0667.
- [4] K.-R. Deibel, S. Luammlein, K. Wegener, *J. Mater. Proces. Technol.* 2013, **214**, nr 3, 667.
- [5] G. Petriaszwili, *Opakowanie* 2014, nr 12, 55.
- [6] P. Janicki, G. Petriaszwili, *Opakowanie* 2015, nr 9, 79.
- [7] G. Petriaszwili, P. Janicki, S. Komarov, *Przegl. Papierniczy* 2019, **75**, nr 4, 253.
- [8] P. Janicki, G. Petriaszwili, S. Komarov, *Opakowanie* 2016, nr 10, 57.
- [9] B.M. Mordovin, *Buchbinderemaschinen*, VEB Verlag Technik, Berlin 1962.
- [10] G. Petriaszwili, P. Janicki, S. Komarov, *Proc. 10th International Symposium on Graphic Engineering and Design*, University of Novi Sad, Novi Sad 2020.
- [11] S. Komarov, G. Petriaszwili, *Maschinenbautechnik* 1989, **38**, nr 11, 503.
- [12] G. Petriaszwili, S. Komarov, P. Janicki, J. Bulas, *GRID Simposium 2022*, <https://doi.org/10.24867/GRID-2022-p70>.