

## **ANALIZA PROCESU CIĘCIA STATYCZNEGO ŁODYG WIERZBY *SALIX VIMINALIS* L.**

Jarosław Frączek, Krzysztof Mudryk

*Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie*

**Streszczenie.** W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki analizy procesu cięcia statycznego łodyg wierzby. Przeprowadzone badania wykazały, iż można wyróżnić dwa charakterystyczne przebiegi sił cięcia. Pierwszy, w którym zmiany siły cięcia cechują się dużą równomiernością oraz drugi, w którym występuje charakterystyczne spadki siły w środkowym obszarze. Wykazano, że o spadkach sił decyduje powstawanie pęknięć wzdłużnych uzyskiwanych zrębków. Stwierdzono, że występowanie pęknięć zrębków uzależnione jest od właściwości mechanicznych łodyg oraz jego wymiarów. Praca cięcia dla zrębków z pęknięciami zmienia się w niewielkim przedziale natomiast jej znaczący wzrost zaobserwowano po przekroczeniu długości cięcia, przy której uzyskiwane zrębki nie posiadały pęknięć.

**Słowa kluczowe:** wierzba, opory cięcia, praca cięcia

### **Wstęp**

Ze względów ekonomicznych, jakościowych oraz technologicznych konieczne staje się stosowanie systemowego podejścia do procesu produkcji biopaliw stałych. Proces ten jest bardzo złożony i obejmuje ciąg wielu operacji takich jak: zbiór surowca oraz jego sezonowanie (czasami w trudnych warunkach polowych), transport i przeładunek, rozdrabnianie, niekiedy podsuszanie oraz oczyszczanie z zanieczyszczeń mineralnych, a następnie zagęszczanie (brykietowanie, peletowanie) oraz chłodzenie.

Rozdrabnianie materiału jest jednym z najważniejszych etapów technologii przetwarzania biomasy decydującym o energochłonności produkcji biopaliw stałych. Wymagania jakościowe stawiane zrębkom opałowym są różne i zależne od ich dalszego przeznaczenia (bezpośrednie spalanie, przetwarzanie w paliwa kompaktowane). W celu poprawy konkurencyjności biopaliw stałych w stosunku do konwencjonalnych, niezbędne jest przeprowadzenie optymalizacji przebiegu kolejnych etapów produkcji (dotyczy to również procesu rozdrabniania) z uwzględnieniem dwóch kryteriów:

- minimalizacji nakładów energetycznych,
- maksymalizacji jakości otrzymywanych zrębków.

Badania dotyczące procesów cięcia i rozdrabniania materiałów roślinnych w większości przypadków obejmowały określenie relacji pomiędzy stopniem rozdrobnienia materiału, parametrami roboczymi i nakładami energii [Molendowski 2005, Kowalski 1993]. Nakłady jednostkowe energii wyrażone w ilości pracy odniesionej do jednostki masy stały się jednym z podstawowych kryteriów oceny maszyn do rozdrabniania materiałów roślinnych [Rudko, Stasiak 2004].

Badania wstępne procesu rozdrabniania pędów wierzby wykazały, że masa zrębków jest silnie zróżnicowana geometrycznie [Frączek, Mudryk 2009]. Zauważono, że zrębki uzyskiwane z materiału o podobnych właściwościach oraz przy tych samych parametrach roboczych urządzeń, charakteryzują się różnym kształtem. Ciekawym zjawiskiem jest występowanie pęknięć wzdłużnych, które powstają przy zrębkowaniu pędów o takiej samej średnicy i wilgotności (rys. 1).



Źródło: autorzy

Rys. 1. Przykładowe zrębki wierzby o różnym kształcie  
Fig. 1. Examples of various shape willow chips [source: authors]

Możliwość uzyskiwania zrębków o podobnych granulacji jest istotna w procesach technologicznych produkcji biopaliw. W przypadku przeznaczenia zrębków do dalszego przetwarzania (między innymi dosuszanie oraz mielenie), wskazane jest uzyskiwanie zrębków o niewielkich wymiarach. Mniejszy wymiar cząstki pozwala na szybsze dosuszanie oraz zmniejszenie nakładów energetycznych podczas mielenia.

## Cel badań

Celem podjętych badań było przeprowadzenie analizy procesu cięcia statycznego łodyg wierzby *Salix viminalis* L. Analiza ta umożliwiła wskazanie przyczyn występowania różnic w kształcie uzyskiwanych zrębków.

## Materiał i metodyka badań

Materiał w badaniach stanowiły trzyletnie pędy wierzby *Salix viminalis* L. klonu 1052 zebrane jesienią 2008 r. z wydziałowej Kolekcji Roślin Energetycznych.

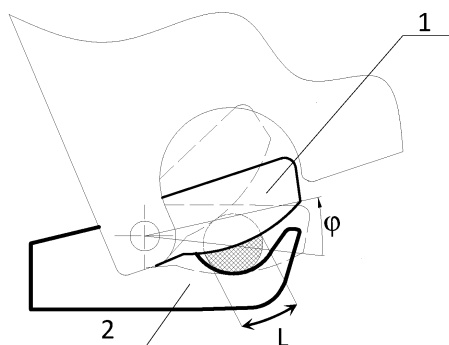
Badania przeprowadzono przy wykorzystaniu maszyny wytrzymałościowej Insight 2 firmy MTS (rys. 2). Metoda pomiaru została zaczerpnięta z pracy Frączka i Mudryka [2006].



Rys. 2. Maszyna wytrzymałościowa Insight 2 firmy MTS wyposażona w przystawkę tnącą materiałów biologicznych

Fig. 2. The Insight 2 testing machine manufactured by MTS, equipped with cutting attachment for biological materials

Maszyna wytrzymałościowa wyposażona była w specjalnie zaprojektowaną przystawkę do cięcia materiałów biologicznych. Składa się ona z dwóch elementów roboczych (rys. 3): noża tnącego 1 oraz krawędzi przeciwnącej 2. Nóż w części głównej posiada krawędź tnącą o kącie ostrza  $15^\circ$ , natomiast kąt przyłożenia do krawędzi przeciwnącej wynosił  $0^\circ$ . Wymuszenie ruchu noża realizowane jest poprzez cięgno, zamocowane z jednej strony do ramienia noża, z drugiej natomiast do głowicy tensometrycznej. Działanie przystawki tnącej oparte jest na zasadzie dźwigni, dzięki czemu możliwe jest zwiększenie zakresu siły tnącej.



Rys. 3. Schemat przystawki tnącej; 1 – nóż tnący, 2 – krawędź przeciwnąca

Fig. 3. Cutting attachment diagram: 1 – cutting knife, 2 – counter-cutting edge, [source: authors]

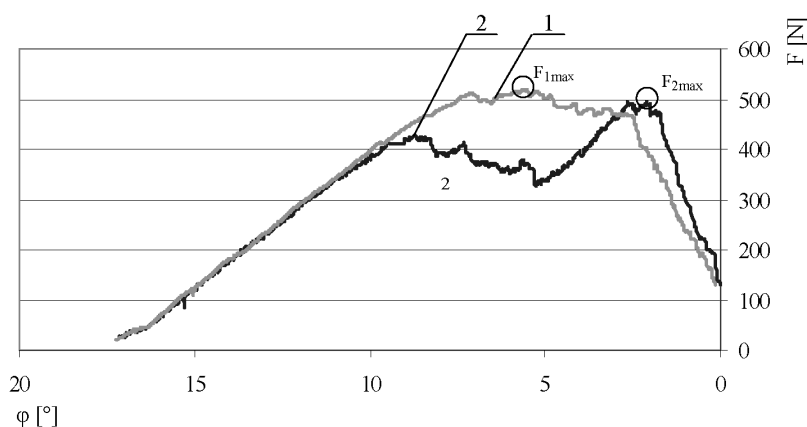
Źródło: autorzy

Maszyna wytrzymałościowa umożliwia równoczesne rejestrowanie siły oraz przemieszczenia. Opracowane autorskie procedury (zapisane w programie TestWorks4 jako makra), umożliwiły określenie jednostkowych oporów cięcia, siły maksymalnej oraz pracy wykonanej podczas przecinania łądgi.

## Wyniki badań

Przeprowadzone testy cięcia wykazały, iż nawet w przypadku tej samej wilgotności oraz średnicy łądgy powstają dwa charakterystyczne przebiegi zależności siły cięcia od położenia ostrza noża:

- pierwszy - bez gwałtownych zmian siły cięcia (krzywa 1 rys. 4),
- drugi - z widocznymi spadkami siły w obszarze środkowym łądgy (krzywa 2, rys. 4).



Rys. 4. Przykładowy przebieg zmian siły cięcia łądgy wierzby (wilgotność materiału - 35%, średnica - 13,4 mm): 1 - długość zrębka 2 cm, 2 - długość zrębka 0,5 cm

Fig. 4. Model trajectory of changes in willow stem cutting force (material humidity - 35%, diameter - 13.4 mm): 1 - chip length 2 cm, 2 - chip length 0.5 cm

W celu identyfikacji powodów powstawania spadku siły cięcia powiązano jej wartość z obrazem przecinanego materiału w różnych położeniach noża. Stwierdzono, iż zaobserwowane różnice znajdują swoje odzwierciedlenie w kształcie powstającego zrębka. Dla przebiegu krzywa - 1 (rys. 4) uzyskiwane zrębki mają kształt walca, natomiast dla przebiegu 2 (rys. 4) charakterystyczne są pęknięcia wzdłużne zrębków.

W przypadku, gdy uzyskiwane zrębki nie posiadały pęknięć wzdłużnych, siła cięcia była większa ( $F_{1max}$  na rys. 4), a jej wyraźny spadek występował dopiero po przecięciu około 60% średnicy łądgy. Natomiast w przypadku występowania pęknięć zrębków, maksymalna siła była mniejsza ( $F_{2max}$  na rys. 4) i wcześniej następował jej istotny spadek (nawet o 40%). Wartość siły tnącej w końcowym etapie cięcia w obu przypadkach była podobna.

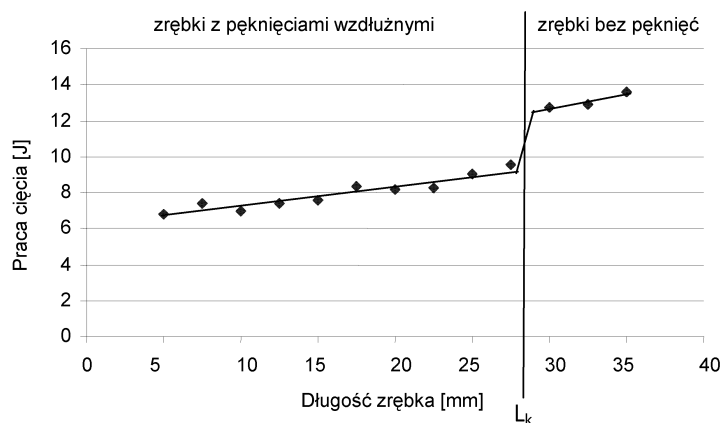
## Analiza procesu cięcia...

Głębsza analiza pozwoliła stwierdzić, iż fakt pęknięcia zrębków uzależniony jest od ich długości oraz wilgotności. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe zrębki uzyskane z pędu o średnicy 17,4 mm (+/-0,5mm) oraz wilgotności 44%. Stwierdzono, iż brak pęknięć materiału wystąpił w tym przypadku dopiero przy długości zrębka powyżej 30 mm.



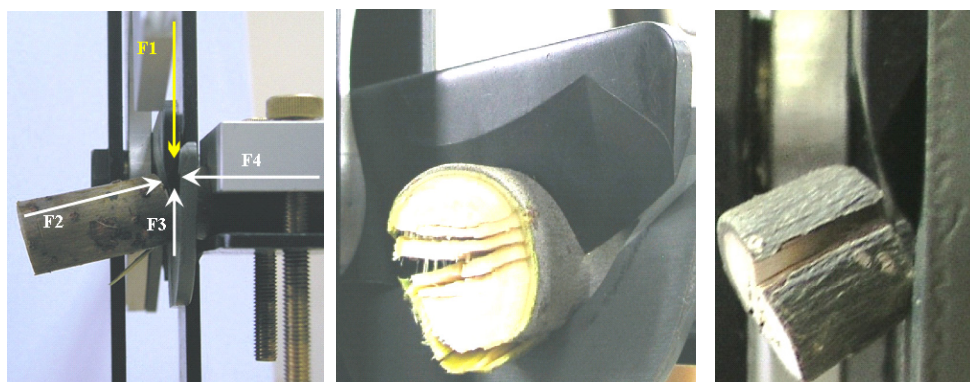
Rys. 5. Pęknięcia zrębków w zależności od ich długości cięcia (w = 44%)  
 Fig. 5. Chip cracks depending on their cutting length (w = 44%)

Należy podkreślić, że różny kształt krzywych na rys. 4 skutkuje tym, iż nakłady energetyczne (praca cięcia) ponoszone na przecięcie łodygi z efektem pęknięcia są znacznie niższe. Zobrazowano to przykładowo na rysunku 6. Wykazano również, iż wraz ze wzrostem długości zrębków z pęknięciami praca cięcia nieznacznie wzrasta od 6,8 J do 9,7 J, natomiast po przekroczeniu długości zrębka, przy której brak jest widocznych pęknięć, praca cięcia wzrasta istotnie (do 13,8 J) (rys. 6).



Rys. 6. Praca cięcia łodyg wierzby o średnicy 17,4 mm i wilgotności 44%  
 Fig. 6. Cutting work for willow stems with diameter 17.4 mm and humidity 44%

Analizując proces cięcia z uwzględnieniem występujących sił (ostrze noża - materiał) można stwierdzić, że w wyniku oddziaływania siły czynnej  $F_1$  powstają reakcje  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_4$ . Wartość  $F_2$  decyduje o naprężeniach występujących w powstających zrębkach. W wyniku jej działania powstają naprężenie styczne  $\delta$ , które po przekroczeniu naprężeń dopuszczalnych materiału  $k_t$ , powodują pojawienie się płaszczyzny poślizgu (ścianania) oraz przemieszczenie materiału. Opisaną sytuację ilustruje rysunek 7.



Rys. 7. Proces cięcia pędu wierzby z widocznymi pęknięciami wzdłużnymi zrębka  
Fig. 7. Cutting process for willow sprout with visible longitudinal cracks in chips

Przeprowadzone badania wskazują, że powstające pęknięcia (spadek siły) zlokalizowane są w środkowej części zrębka (połowa średnicy). Tak więc wielkość powierzchni poślizgu można w przybliżeniu określić jako iloczyn długości zrębka oraz jego średnicy. Będzie ona decydowała o wielkości naprężeń  $\delta$ .

Drugim z czynników decydujących o momencie powstawania pęknięć jest wilgotność materiału. Decyduje ona bowiem o wartości naprężeń dopuszczalnych  $k_t$  przecinanego materiału. W przypadku wierzby zakres wilgotności jest dość duży i zawiera się w przedziale od 15 do 50%. Spadek wilgotności powoduje wzrost wytrzymałości materiału na ścinanie. Jest to zjawisko klasyczne dla materiałów roślinnych i znajduje odzwierciedlenie w literaturze [Frączek 1996, Ślipek i in. 1999].

Planowane są dalsze badania, w celu określenia krytycznej długości zrębka  $L_k$ , przy której nie dochodzi do pęknięć wzdłuż włókien. Długość ta zostanie określona dla różnych wilgotności i średnic pędów  $L_k=f(w, d)$ .

## Wnioski

1. Przeprowadzone badania wykazały, że w procesie cięcia łodyg wierzby można wyróżnić dwa charakterystyczne przebiegi sił cięcia w zależności od przemieszczenia ostrza noża. Pierwszy charakteryzujący się łagodnym przebiegiem oraz drugi z widocznymi spadkami siły (sięgającymi nawet 40% wartości). Stwierdzono, że o spadkach sił cięcia decyduje powstawanie pęknięć wzdłużnych uzyskiwanych zrębków.

2. Analiza procesu cięcia wykazała, że występowanie pęknięć zrębków uzależnione jest od właściwości fizycznych pędu oraz jego wymiarów. Naprężenia dopuszczalne na ściananie  $k_t$  (zależne między innymi od wilgotności materiału) oraz wielkości płaszczyzny poślizgu (zależnej od długości zrębka oraz jego średnicy) są parametrami decydującymi o występowaniu pęknięć zrębków.
3. Wykazano, iż wartość pracy cięcia dla zrębków z pęknięciami zmieniała się w niewielkim przedziale. Znaczący wzrost pracy zaobserwowano po przekroczeniu długości cięcia  $L_k$  przy której uzyskiwane zrębki nie posiadały pęknięć.
4. Wskazane jest prowadzenie dalszych badań mających na celu wyznaczenia krytycznej długości zrębka  $L_k$  (czyli minimalnej długości przy, której nie dochodzi do jego pęknięć) dla łodyg o różnej wilgotności i średnicy.

## Bibliografia

- Frączek J.** 1996. Wytrzymałość ziarna zbóż obciążanego w masie. Zesz. Prob. Post. Nauk Roln. Nr 443. s. 375-384.
- Frączek J., Mudryk K.** 2006. Metoda określenia oporów cięcia pędów wierzby energetycznej. Inżynieria Rolnicza. Nr 13(88). s. 91-98.
- Molendowski F.** 2005. Energochłonność procesu rozdrabniania surowców roślinnych na przykładzie rdzeni kolb kukurydzy. Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu 512.
- Kowalski S.** 1993. Badania oporów cięcia wybranych roślin. Zeszyt. Prob. Post. Nauk Rol. Nr 408. s. 297-303.
- Rudko T., Stasiak M.** 2004. Właściwości mechaniczne pędów wierzby energetycznej. III Zjazd Naukowy. Referaty i doniesienia. Dąbrowica 27-29.09.2004.
- Ślipek Z., Kaczorowski J., Frączek J.** 1999. Analiza teoretyczno-doświadczalna tarcia materiałów roślinnych. PTIR, Kraków, ISBN 83-907553-9-4.

*Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2008-2010 jako projekt badawczy nr N N313153935*

## **THE ANALYSIS OF THE PROCESS INVOLVING STATIC CUTTING OF *SALIX VIMINALIS* L. WILLOW STEM**

**Abstract.** The presented paper demonstrates the analysis results for the process involving static cutting of willow stems. The completed studies have proved that two characteristic trajectories of cutting forces may be distinguished. The first one in which cutting force changes are characterised by the high uniformity, and the second one in which characteristic force drops occur in central area. It has been proved that formation of longitudinal cracks in received chips determines force drops. It has been observed that the occurrence of chip cracks depends on the mechanical properties of stems and their dimensions. The cutting work for chips with cracks changes within small range, whereas its considerable increase has been observed after the exceeding length, at which chips being produced had no cracks.

**Key words:** willow, cutting resistance, cutting work

**Adres do korespondencji:**

Jarosław Frączek, e-mail: Jaroslaw.Fraczek@ur.krakow.pl  
Katedra Inżynierii Mechanicznej i Agrofizyki  
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie  
ul. Balicka 120  
30-149 Kraków