

Andrzej BOCHAT, Kamil KORPAL

e-mail: bochat@utp.edu.pl

Wydział Inżynierii Mechanicznej, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy, Bydgoszcz

## Problematyka badawcza cięcia warstwy materiału anizotropowego

### Wprowadzenie

Jedną z bardzo ważnych dróg do obniżenia kosztów produkcji żywności jest między innymi zdecydowane zmniejszenie nakładów potrzebnych na przygotowanie pasz. Można to osiągnąć projektując maszyny, które będą charakteryzowały się małą energochłonnością procesu cięcia. Do grupy maszyn, których zadaniem jest pocięcie materiału roślinnego (np. kukurydzy, lucerny, słomy żytniej) na sieczkę należą sieczkarnie bębnowe samobieżne, przyczepiane czy też stacjonarne [Bochat, 2010]. Szczególnie rozwój konstrukcji samobieżnych sieczkarni zbierających zaowocował zwiększeniem ich wydajności oraz niezawodności funkcjonowania. Konstruktorom tego typu maszyn największą trudność sprawia konieczność wyposażania ich w silniki z zapłonem samoczynnym ZS o dużych mocach. Wynika to nie tylko z potrzeby uzyskiwania dużych wydajności, ale także ze stosunkowo dużej energochłonności procesu cięcia materiału roślinnego, który charakteryzuje się dużą anizotropowością [Bochat, 2010].

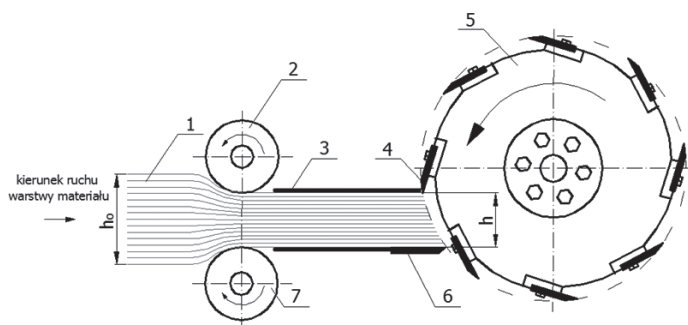
Cięcie materiału roślinnego na sieczkę należy do podstawowych procesów, jakie realizuje sieczkarnia. Z bilansu mocy (Sankey'a) zużywaną przez sieczkarnię z bębnowym zespołem tnącym wynika, że moc pobierana przez zespół tnący wyraźnie dominuje nad mocami zużywanymi przez pozostałe zespoły robocze i wynosi 75÷85% [Kanafojski, 1980]. Górny i dolny walec wciągająco-zgniatający pobierają natomiast 15÷18% mocy [Kanafojski, 1980].

Celem pracy jest analiza oraz podsumowanie dotychczasowych badań doświadczalnych procesu cięcia na sieczkę warstwy anizotropowego materiału roślinnego w bębnowych zespołach tnących. Analiza powinna umożliwić wykazanie braków istniejącej teorii cięcia oraz wskazać kierunki dalszych badań.

### Ruch bębnowego zespołu tnącego

Ruch obrotowy bębna tnącego powoduje przemieszczanie się wraz z nim noży tnących. Poruszające się względem nieruchomej stalnicy noże, powodują w pierwszym etapie zgniot – sprasowanie warstwy materiału roślinnego, a w drugim etapie – jej przecięcie.

Dostarczanie materiału między ostrze noża i przeciwostrze (stalnicę) odbywa się dzięki ruchowi obrotowemu walców wciągająco-zgniatających, które dokonują wstępnego uformowania i zagęszczenia materiału.



Rys. 1. System dostarczania materiału roślinnego do bębna tnącego: 1 – warstwa materiału, 2 – górny walec wciągająco-zgniatający, 3 – płyta dociskowa, 4 – nóż tnący, 5 – bęben tnący, 6 – stalnica, 7 – dolny walec wciągająco-zgniatający,  $h_0$  – wysokość warstwy materiału przed zagęszczeniem

Istotę procesu dostarczania materiału roślinnego do bębna tnącego, przedstawiono na rys. 1.

W bębnowych zespołach tnących cięcie odbywa się najczęściej z poślizgiem ostrza noża, względem ciętej warstwy materiału roślinnego, przy czym kąt cięcia ślizgowego  $\tau$  przyjmuje stałą wartość w czasie przemieszczania się ostrza noża względem tej warstwy.

### Analiza cięcia warstwy materiału roślinnego

Prace doświadczalne z zakresu anizotropowego cięcia warstwy materiału roślinnego (o istotnym znaczeniu naukowym – zdaniem autorów) prowadzili: W.J. Bremer, W.J. Chancellor, O. Eggert, W.E. Fischer-Schlemm, A. Haffert, H. Harms, G. Liljedahl, N.E. Reznik, W.A. Sablikow, M. Blaszczyk, A. Bochat.

Ich badania oporów cięcia wskazują na następujące zależności między parametrami, cechami konstrukcyjnymi bębna tnącego a właściwościami fizykomechanicznymi materiału roślinnego:

- Jednostkowy opór cięcia w znacznym stopniu zależy od wilgotności materiału przecinanego; ze zwiększeniem wilgotności jednostkowy opór początkowo wzrasta, osiągając maksimum, a następnie maleje. Wg Liljedahla i Chancellor [Kanafojski, 1980] największy opór cięcia odpowiada wilgotności materiału w zakresie 25÷40%; badania prowadzono dla słomy żytniej i lucerny.
- Jednostkowy opór cięcia zależy od grubości przecinanej warstwy. Ze wzrostem grubości opór wzrasta. Wg Liljedahla [Dmitrewski, 1978] wzrost grubości warstwy przecinanej z 9,5 do 19 mm powoduje wzrost oporów przecinania o około 25%; badania prowadzono dla lucerny oraz tymotki.
- Jednostkowy opór cięcia zależy od kąta cięcia ślizgowego. Wg Sablikowa [Dmitrewski, 1978] zwiększenie kąta cięcia ślizgowego  $\tau$  do  $50^\circ$  powoduje początkowy spadek oporów cięcia a następnie po przekroczeniu określonej wartości kąta  $\tau = 50^\circ$ , opór cięcia szybko wzrasta; badania prowadzono dla słomy żytniej i kukurydzy.
- Stopień stępienia noża wpływa na zwiększenie jednostkowego oporu cięcia, zwłaszcza przy zwiększonej szczelinie między ostrzem a przeciwostrzem. Wg Chancellor [1988] oraz O'Dogherty'ego i Gale'a [1986] przy cięciu lucerny i tymotki optymalna grubość ostrza noży sieczkarni wynosi  $\rho = 20\div 40 \mu\text{m}$ .
- Kąt przyłożenia noża  $\beta$  powoduje wzrost zgniotu materiału ciętego, a co się z tym wiąże wzrost oporów przy przecinaniu. Wg Chancellor [1988] najbardziej wskazane jest stosowanie kąta  $\beta = 4\div 16^\circ$ ; badania prowadzono dla lucerny i tymotki.
- Chancellor [1988] w swoich badaniach dotyczących kąta zaostrenia noża  $\gamma$  stwierdził znaczne zwiększenie zużycia energii i oporu cięcia po przekroczeniu wartości  $\gamma = 30^\circ$ . Fischer-Schlemm i Eggert [1975] na podstawie własnych badań stwierdzili, iż minimalna wartość tego kąta nie powinna być mniejsza od  $\gamma = 24^\circ$ , gdyż dla mniejszych wartości kąta  $\gamma$  występuje szybsze tępienie się noży.
- Wzrost prędkości cięcia powoduje zmniejszenie oporów cięcia warstwy materiału roślinnego. Wg Hafferta i Harmsa [2002] oraz Reznika [1967] wzrost prędkości cięcia warstwy łądy kukurydzy z 10 do 20 m/s powoduje znaczący spadek oporów cięcia i jednostkowej pracy cięcia.
- Wg Bochata [2010] i Blaszczyka zastosowanie konstrukcji bębnowego zespołu tnącego, który realizuje cięcie ukośnie-nachylone w stosunku do zespołu realizującego cięcie poprzeczne (klasyczne) w spo-

sób znaczący zmniejszy energochłonność procesu cięcia materiału roślinnego na sieczkę. Dla cięcia słomy żytniej uzyskano zmniejszenie w zakresie 15÷20%.

Badania analityczne związane z cięciem warstwy anizotropowego materiału roślinnego prowadzili przede wszystkim: *Dmitrewski*, [1978] *Goriaczkin* [Kanafojski, 1980], *Heinrich*, [2000], *Reznik*, [1967], *Vrany* [1967] oraz *Bochat* [2010] z *Błaszczakiem*.

*Goriaczkin* [Kanafojski, 1980], *Reznik* [1967], a później *Bochat* [2010] wspólnie z *Błaszczakiem* próbowali wyjaśnić istotę procesu cięcia warstwy materiału roślinnego za pomocą pojedynczego noża. Natomiast *Dmitrewski* [1978], *Vrany* [1991] oraz *Heinrich* [2000] oraz prowadzili rozważania teoretyczne mające na celu opracowanie zależności umożliwiającej obliczenie pracy i mocy cięcia.

*Goriaczkin* [Kanafojski, 1980] na podstawie prowadzonych rozważań teoretycznych, opracował zależność na obliczanie jednostkowego oporu cięcia warstwy materiału roślinnego  $p_c$  [N/m]:

$$p_c = C \frac{1}{\operatorname{tg} \tau} \quad (1)$$

gdzie

$C$  – współczynnik uwzględniający właściwości wytrzymałościowe materiału, wysokość warstwy przecinanego materiału oraz ostrość krawędzi tnącej noża bębna,

$\tau$  – kąt cięcia ślizgowego.

Zależność (1) jest bardzo często cytowana. Jej wykorzystanie na etapie obliczeń  $p_c$  jest możliwe w ograniczonym zakresie badanych kątów cięcia ślizgowego  $\tau$ . Analizując zależność (1) łatwo zauważyć, że jeżeli  $\tau \rightarrow 90^\circ$  to  $p_c \rightarrow 0$  dla  $C = \text{const}$ . Natomiast, jeżeli  $\tau \rightarrow 0^\circ$  to  $p_c \rightarrow \infty$ .

W warunkach rzeczywistych przebieg zależności jednostkowego oporu cięcia  $p_c$  od kąta cięcia ślizgowego  $\tau$  kształtuje się inaczej [Dmitrewski, 1978]. Współczynnik  $C$  przyjmowany w zależności (1) jako stały, ulega zmianie podczas ciecienia według badań wielu autorów.

Analiza teoretyczna procesu cięcia za pomocą bębnowego zespołu tnącego [Reznik, 1967] umożliwiła opracowanie zależności, według której przecinanie warstwy materiału roślinnego odbywa się w dwu fazach. W pierwszej dochodzi do wstępnego zagęszczania (zgniotu) materiału, po czym w drugiej fazie następuje jego przecinanie.

### Siła, praca i moc cięcia

Sumaryczną siłę nacisku  $P$ , kN/m przypadającą na jednostkę długości ostrza noża, potrzebną do wywołania zagęszczenia i cięcia materiału opisuje wzór [Kanafojski, 1980]:

$$P = \delta \sigma_c + \frac{E h_{zg}^2}{2h} [\operatorname{tg} \beta + \mu \sin^2 \beta + \mu' (\mu + \cos^2 \beta)] \quad (2)$$

gdzie

$\delta$  – grubość ostrza noża, [m]

$\sigma_c$  – naprężenia w materiale powstające podczas cięcia, [kPa]

$E$  – moduł sprężystości przecinanego materiału, [kPa]

$h_{zg}$  – grubość zgniatanej nożem warstwy, [m]

$h$  – wysokość warstwy materiału przed rozpoczęciem procesu cięcia, [m]

$\beta$  – kąt przyłożenia ostrza noża, [stopnie]

$\mu'$  – współczynnik tarcia między ostrzem noża a materiałem przecinanym, [-]

$\mu$  – współczynnik tarcia wewnętrznego materiału, [-].

Pierwszy składnik wzoru (2) przedstawia siłę potrzebną do przecinania materiału przez ostrze bębna, drugi zaś określa opory jałowe ruchu noża – nie związane bezpośrednio z samym cięciem.

Na podstawie analiz teoretycznych *Reznik* [1967] stwierdził, że głębokość, na jaką nóż wchodzi w warstwę materiału w fazie zagęszczania jest proporcjonalna do całkowitej wysokości warstwy. Zatem siła potrzebna do jej przecięcia zwiększa się wraz z wysokością warstwy, co zostało również potwierdzone badaniami doświadczalnymi.

*Bochat* [2010] wraz z *Błaszczakiem* podjęli próbę odzwierciedlenia odkształceń sprężystych źdźbeł występujących podczas oddziaływania noża. Zaproponowany przez nich sposób obliczania tych odkształceń umożliwił przeprowadzenie symulacji procesu odkształceń. W przyjętym rozwiązaniu źdźbło potraktowano jako pierścień, którego ugięcie obliczano za pomocą metod energetycznych. Wykazano, że w przyjętym modelu matematycznym wzajemne oddziaływanie źdźbeł wpływa zasadniczo na wartość odkształceń sprężystych, spowodowanych siłą oddziaływania noża na źdźbła. Ugięcie sprężyste pojedynczego źdźbła  $f_z$  pod wpływem działania pionowej siły  $P_p$  opisano zależnością:

$$f_z = \frac{P_p r_z^3}{EJ} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right) \quad (3)$$

gdzie

$P_p$  – pionowa siła oddziaływania noża na źdźbło,

$r_z$  – promień zewnętrzny źdźbła,

$E$  – moduł sprężystości źdźbła,

$J$  – moduł bezwładności przekroju źdźbła.

Natomiast ugięcie sprężyste warstwy źdźbeł  $f_w$ , przy takiej samej wartości obciążenia  $P_p$  opisane jest zależnością:

$$f_w = \frac{P_p r_z^3}{EJ} \left( \frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} - \beta_w \right) \quad (4)$$

gdzie

$\beta_w$  – współczynnik wzajemnego oddziaływania źdźbeł w warstwie.

Wartość współczynnika  $\beta_w$ , należy obliczyć ze wzoru:

$$\beta_w = \frac{(\pi - 4)^2}{\pi(\pi^2 - 8)} \quad (5)$$

Wyniki badań symulacyjnych wg opisanego modelu tworzą elementy teorii niezbędnej do analizy zjawisk zachodzących podczas cięcia materiału roślinnego.

*Dmitrewski* [1978] podaje wzór, za pomocą którego można obliczyć pracę cięcia przy przecinaniu warstwy materiału roślinnego jednym nożem w oparciu o znane wielkości wybranych parametrów bębna tnącego. Jednostkowa praca cięcia  $L_j$  odniesiona do powierzchni przekroju poprzecznego ciętej warstwy może być obliczana z zależności:

$$L_j = p_c A = p_c (1 + \mu \operatorname{tg} \tau) \quad (6)$$

gdzie

$p_c$  – jednostkowy opór cięcia

$A = 1 + \mu \operatorname{tg} \tau$  – wielkość stała dla noża

$\mu$  – współczynnik tarcia materiału o krawędź tnącą

$\tau$  – kąt cięcia ślizgowego.

Według *Dmitrewskiego* [1978] efektywną moc na pokonanie oporów cięcia  $N_c$ , potwierdzoną badaniami doświadczalnymi, można opisać zależnością:

$$N_c = p_c \frac{dF}{dt} (1 + \mu \operatorname{tg} \tau) \quad (7)$$

gdzie

$\frac{dF}{dt}$  – powierzchnia cięcia w jednostce czasu.

Natomiast pracę, jaką wykonuje nóż sieczkarni podczas jednego przejścia przez przecinaną warstwę materiału można obliczyć z zależności:

$$L_n = \int_{t_p = \psi_p / \omega}^{t_k = \psi_k / \omega} M_c(\psi) \omega dt \quad (8)$$

gdzie

$M_c(\psi)$  – moment cięcia zależny od kąta obrotu noża,

$\psi_p$  – kąt rozpoczęcia cięcia,

$\psi_k$  – kąt zakończenia cięcia,

$\omega$  – prędkość kątowa bębna tnącego,

$t$  – czas.

Heinrich [2000] w swojej pracy, opisującej wpływ cech konstrukcyjnych bębnowego zespołu tnącego na energochłonność  $E_c$  procesu cięcia warstwy pszenicy, posługuje się wzorem o postaci:

$$E_c = \int_{t_0}^{t_k} U_b n_b P_c(t) dt \quad (9)$$

gdzie

- $U_b$  – obwód bębna tnącego,
- $n_b$  – prędkość obrotowa bębna,
- $P_c(t)$  – chwilowa siła cięcia,
- $t_0$  – czas rozpoczęcia cięcia,
- $t_k$  – czas zakończenia cięcia.

Całkując wyrażenie (9), otrzymuje się wartość energii przypadającej na przecięcie określonej ilości materiału w zadanym przedziale czasu.

Vrany [1991] zaproponował następujący wzór na obliczenie mocy  $N_c$ , zużywanej na cięcie przez bębnowy zespół tnący, z uwzględnieniem strumienia masy roślin (masy materiału roślinnego przecinanego w jednostce czasu) i teoretycznej długości cięcia:

$$N_c = \kappa \frac{q_m}{l_t} \quad (10)$$

gdzie

- $\kappa$  – współczynnik charakteryzujący materiał roślinny  $\kappa = \frac{p_c}{\rho_s}$ ,
- $p_c$  – jednostkowy opór cięcia,
- $\rho_s$  – gęstość roślin w przecinanej warstwie,
- $q_m$  – strumień masy,
- $l_t$  – teoretyczna długość cięcia.

Strumień masy  $q_m$  powiązany z parametrami i cechami konstrukcyjnymi bębnowego zespołu tnącego oraz właściwościami materiału ciętego zależnością:

$$q_m = \rho_s b h l z \frac{n}{60} \quad (11)$$

gdzie

- $b$  – szerokość gardzieli,
- $h$  – wysokość gardzieli,
- $z$  – liczba noży na bębnie tnącym,
- $n$  – prędkość obrotowa bębna.

Opisane próby modelowania procesu cięcia warstwy materiału roślinnego dotyczyły cięcia statycznego bądź *quasi*-statycznego i w przypadku cięcia bębnowym tnącym mają ograniczone zastosowanie ze względu na jego dynamiczny charakter.

Ponadto przytoczone przykłady rozważań analitycznych, świadczą o tym, że prace nad modelowaniem cięcia warstwy materiału roślinnego prowadzone były w ograniczonym zakresie i polegały głównie na wy-

znaczeniu oporu cięcia bądź pracy cięcia bez szczegółowej analizy zjawisk zachodzących podczas przecinania warstwy materiału roślinnego.

## Podsumowanie i wnioski

Wyniki badań doświadczalnych wg oceny autorów pracy są często nieporównywalne z powodu różnic w programach i metodyce badań. Bardzo często nie podaje się szczegółowych danych materiału roślinnego, na którym prowadzono eksperymenty. Wyniki mają też zróżnicowaną wartość poznawczą i nie tworzą zwartego systemu informacyjnego dla potrzeb projektowania i eksploatacji bębnowych zespołów tnących siewczarni.

Przytoczone przykłady prac analitycznych świadczą o tym, że prace nad modelowaniem cięcia warstwy materiału roślinnego – anizotropowego prowadzone były w ograniczonym zakresie i wymagają kontynuacji. W związku z powyższym wskazane są dalsze badania energochłonności cięcia oraz prace nad nowymi konstrukcjami bębnowych zespołów tnących, które przyczynią się do obniżenia ich energochłonności.

Autorzy pracują obecnie nad modelem matematycznym dynamicznego procesu cięcia warstwy anizotropowego materiału roślinnego. Weryfikacja doświadczalna modelu nastąpi podczas badań prototypowej konstrukcji bębnowego zespołu tnącego (wg patentu *Bochata*).

## LITERATURA

- Bochat A., 2010. *Teoria i konstrukcja zespołów tnących maszyn rolniczych*. Wyd. UTP Bydgoszcz
- Chancellor W.J., 1988. Energy requirements for cutting forage. *Agricultural Engineering*, 8, 633-636.
- Dmitrewski J., 1978. *Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych*. PWRiL, Warszawa.
- Fischer-Schlem W.E., Eggert O., 1975. Der Einfluss der Häckselmesser Watenwinkels auf Schnitthaltigkeit und Kraftbedarf. *Landtechnik Forschung*, 5, 4, 109-111
- Haffert A., Harms H.H., 2002. Schnittvorgang im Felddhäckselern. *Landtechnik*, 2, 106-107
- Heinrich A., 2000. Häckselmesser und Gegenschneide eines Felddhäckselern. *Landtechnik*, 55, nr 8, 440-441
- Kanafojski Cz., 1980. *Teoria i konstrukcja maszyn rolniczych*. PWRiL, Warszawa
- O'Dogherty M.J., Gale G., 1986. Laboratory studies of the cutting of grass stems. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 35, nr 2, 115-129. DOI: 10.1016/0021-8634(86)90033-8
- Reznik N.E., 1967. K teorii barabannogo izmielčajuščego-švyrtajuščego apparata silocouboročnogo kombajna. *Trak. Selchozmaš.* 34, nr 9, 19-23
- Vrany Z., 1991. Experimentalni vyzkum silovych a enegeticich pomeru na nozovemu buhnu rezacek. *Zeměd. Tech.* 17, nr 10, 629-648

### Czasopismo Naukowo-Techniczne

## INŻYNIERIA I APARATURA CHEMICZNA

### Chemical Engineering and Equipment

ukazuje się od 1961

Czasopismo jest regularnie abstraktowane w CAS (Chemical Abstracts Service – a division of the American Chemical Society, Columbus, Ohio, USA) i jest indeksowane na platformie SciFinder®:

<http://www.cas.org/products/scifindr/index.html>

w Bazie Polskich Czasopism Technicznych – BazTech:

<http://baztech.icm.edu.pl/wysz.html>

a także w bazie tekstów naukowych elektronicznych i drukowanych:

<http://scholar.google.com>