

**dr inż. Konrad Kowalik**  
**dr inż. Barbara Sykut**  
**dr inż. Halina Marczak**  
**prof. dr hab. inż. Marek Opielak**

Politechnika Lubelska; Wydział Mechaniczny; Instytut Transportu, Silników Spalinowych i Ekologii; Zakład Inżynierii Procesowej, Bezpieczeństwa i Ekologii;  
ul. Nadbystrzycka 36, 20-618 Lublin;  
e-mail: k.kowalik@pollub.pl; b.sykut@pollub.pl; h.marczak@pollub.pl; m.opielak@pollub.pl;

## **Metoda badania energochłonności procesu cięcia na przykładzie sera żółtego**

**Słowa kluczowe:** *cięcie, energochłonność, kąt ostrza, prędkość, powłoka*

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono metodę badania energochłonności procesu cięcia opracowaną w Zakładzie Inżynierii Procesowej, Bezpieczeństwa i Ekologii. Zaprezentowano skonstruowane stanowisko badawcze oraz przykładowe wyniki badań wykonane z wykorzystaniem tego stanowiska. Proces cięcia prowadzono nożami ze stali narzędziowej oraz pokrytymi powłokami charakteryzującymi się małym współczynnikiem tarcia, przyjmując w planie badań dla każdego noża zmienne wejściowe: kąt ostrza oraz prędkość cięcia. Aby porównać opory cięcia wynikające z tarcia materiału o powierzchnię noża przeprowadzono także cięcie materiału drutem.

### **1. Wprowadzenie**

Jedną z głównych grup procesów stosowanych w większości technologii przemysłowych są procesy rozdrabniania. Charakteryzują się one dużą energochłonnością. Spośród procesów rozdrabniania bardzo często stosowaną operacją jest cięcie mające na celu uzyskanie produktów o określonym wymiarze i kształcie. Wymagania te podyktowane są względami technologicznymi, użytkowymi a w przemyśle spożywczym również organoleptycznymi.

Czynnikami, które mają znaczący wpływ na przebieg i energochłonność procesu cięcia materiału są przede wszystkim jego właściwości wytrzymałościowe ściśle związane z jego budową, strukturą wewnętrzną a w przetwórstwie rolno-spożywczym również indywidualnymi cechami odmiany, miejscem pobierania próbek, miejscem i warunkami uprawy [6, 7, 8, 9]. Duże znaczenie w przypadku surowców do przetwórstwa spożywczego mają także warunki i rodzaj obróbki termicznej (gotowanie, blanszowanie, suszenie, obróbka mikrofalowa) [13, 14].

Drugą grupą czynników wpływających na przebieg i energochłonność procesu cięcia są parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne urządzeń, w tym zespołu tnącego, ukształtowanie ostrza noża oraz parametry kinematyczno-dynamiczne. Realizowane dotychczas przez wielu autorów badania procesu cięcia były prowadzone pod kątem doskonalenia konstrukcji zespołów tnących, analizy parametrów ostrza noża oraz ich roli w tym procesie [2, 3, 5, 12].

Energochłonność procesu cięcia w dużym stopniu związana jest z tarcie występującym pomiędzy narzędziem a obrabianym materiałem. Tarcie powierzchniowe występujące przy cięciu czy krajaniu materiałów zależy od ich fizycznych właściwości jak również od rodzaju materiału, z którego wykonano narzędzie tnące oraz charakterystyki powierzchni narzędzia mającej kontakt z obrabianym materiałem [1].

Niektóre produkty spożywcze (np. sery) charakteryzują się dużym współczynnikiem tarcia. Zmniejszanie niekorzystnego działania tarcia podczas cięcia realizowane jest np. poprzez doprowadzenie ciepła do narzędzia tnącego lub zmniejszenie jego powierzchni styku z obrabianym materiałem (np. cięcie drutem) [4, 10, 11].

Przegląd literatury naukowej z zakresu energochłonności procesu cięcia wykazał, że większość prac badawczych prowadzona była z wykorzystaniem maszyn wytrzymałościowych i utrzymywaniem prędkości w zakresie warunków quasi-statycznych. Układy pomiarowe przy stanowiskach badawczych opisywanych w publikacjach naukowych zazwyczaj dają możliwość pomiaru sił tylko w jednym kierunku, równoległym do kierunku ruchu głównego co w pewnych warunkach prowadzenia procesu nie pozwala na dokonanie pełnej analizy rozkładu występujących sił [3, 4, 5, 10, 11, 13, 14]. Ograniczenia te stały się pretekstem do opracowania własnej metody i stanowiska do badania energochłonności procesu cięcia. Wykorzystując opracowaną metodę i stanowisko badawcze, przeprowadzono badania, których celem była ocena wpływu zastosowania różnych narzędzi tnących na energochłonność procesu cięcia.

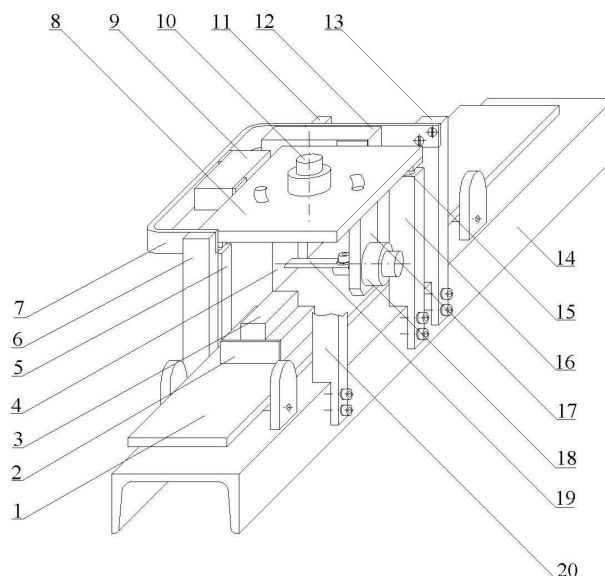
## 2. Cel pracy

Celem przeprowadzonych badań była ocena wpływu zastosowanych narzędzi tnących na energochłonność procesu cięcia sera z wykorzystaniem nowej metody badań.

## 3. Metodyka badań

### 3.1. Stanowisko badawcze

„Stanowisko do badania oporów cięcia” opracowano w Zakładzie Inżynierii Procesowej, Bezpieczeństwa i Ekologii, Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej. Zostało ono zgłoszone do Urzędu Patentowego RP i obecnie chronione jest Prawem Ochronnym na Wzór Użytkowy. Jedną z ważniejszych cech odróżniających je od innych jest możliwość rejestracji sił jednocześnie w dwóch prostopadłych kierunkach: równoległym i prostopadłym do kierunku ruchu głównego. Schemat układu roboczego stanowiska przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat układu roboczego stanowiska: 1 – belka stalowa, 2 - uchwyt, 3 – cięta próbka, 4, 5, 6 - słupy, 7 - opaska, 8 - płyta pomiarowa, 9 - czujnik indukcyjny, 10 – regulacja położenia noża, 11 - słup, 12 - czujnik indukcyjny, 13 - słup, 14 - łożo, 15 - kulka, 16 - słup, 17 - wieszak, 18 – regulacja położenia noża, 19 - nóż, 20 - słup

Układ roboczy stanowiska przedstawiony na rysunku 1 składa się z poziomego łoża 14, po którym przesuwa się wzdłużnie belka stalowa 1 napędzana siłownikiem hydraulicznym z zamocowanym uchwytem próbki 2. Do płyty 8 w kształcie prostokąta, za pomocą wieszaka 17, mocowany jest nóż 19 z obrotową regulacją 18. Płyta 8 z obrotową regulacją 10 porusza się na kulkach 15, które znajdują się na górnych końcach pionowych słupów 4, 5, 16, 20. Do słupów 6, 11, 13 zamocowana jest opaska 7, do której przymocowane są czujniki indukcyjne 9, 12 mierzące siły w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach. Informacja z czujników poprzez elektroniczne mierniki i kartę pomiarową przekazywana jest do komputera z zainstalowanym programem „Pomiar”. Program ten został napisany do obsługi zainstalowanej karty pomiarowej i umożliwia odbieranie sygnałów, przetwarzanie ich, wizualizację i archiwizowanie danych.

Stanowisko umożliwia wymianę narzędzia tnącego co pozwala ocenić np. wpływ geometrii narzędzia (kąta ostrza, grubość, itp.). Możliwa jest również zmiana położenia noża tj. kąta przyłożenia i kąta pochylenia krawędzi tnącej.

Uchwyt próbki jest elementem wymiennym, co umożliwia zastąpienie go innym, odpowiednim dla badanego materiału (jego kształtu, wielkości lub sposobu cięcia).

Inną ważną cechą stanowiska jest możliwość realizowania procesu z prędkościami większymi niż quasi-statyczne uzyskiwanymi przy pomocy maszyny wytrzymałościowej Intron, najczęściej wykorzystywanej przez badaczy zajmujących się tą tematyką. Obecnie zakres uzyskiwanych prędkości to 50-450 mm·s<sup>-1</sup>. Stanowisko wyposażone jest w układ fotooptyczny, który pozwala na kontrolę założonej prędkości podczas każdego przecinania próbki.

Na podstawie danych uzyskanych z układu pomiarowego a dokładnie zarejestrowanego przebiegu siły cięcia można wyznaczyć wartość pracy cięcia z zależności:

$$L = \int_S F \cdot ds = \sum_i F_i \cdot \Delta s, \quad (J) \quad (1)$$

gdzie:

$\sum_i F_i$  - suma zarejestrowanych sił podczas przecinania próbki (N),

$\Delta s$  - droga jaką pokonuje próbka pomiędzy kolejnymi zarejestrowanymi wartościami siły w przebiegu czasowym (m).

Energochłonność jednostkową procesu cięcia definiowaną jako pracę potrzebną do przecięcia jednostki pola powierzchni materiału oblicza się z zależności:

$$e_j = \frac{L}{A}, \quad (J \cdot m^{-2}) \quad (2)$$

gdzie:

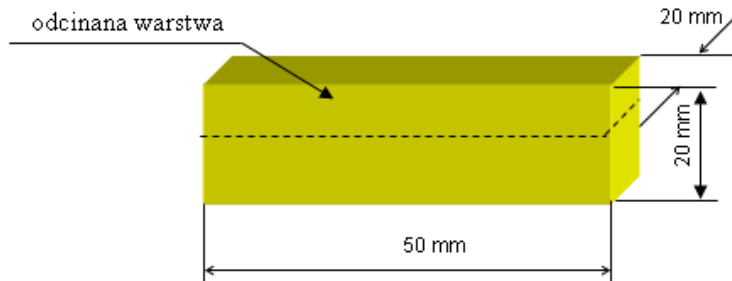
$L$  – praca cięcia (J),

$A$  – pole powierzchni przeciętej próbki (m<sup>2</sup>).

### 3.2. Materiał i narzędzia

Materiałem poddawanym badaniom energochłonności procesu cięcia był ser żółty Podlaski pochodzący z OSM Włoszczowa. Materiał ten charakteryzował się jednolitą strukturą. Zawartość tłuszczu w suchej masie wynosiła 45%. Z sera do badań wycinano próbki prostopadłościenne z których odcinano górną warstwę o grubości 10 mm (rys. 2).

Cięcia dokonywano nożami płaskimi o grubości 1,5 mm, długości 27 mm i szerokości 70 mm. Opracowany przy pomocy pakietu Statistica plan badań wymagał wykonania kompletów noży o kątach ostrza od 5° do 45°. Realizowane cięcie było cięciem normalnym. Kąt pomiędzy krawędzią tnącą a kierunkiem cięcia był równy 90°. Kąt przyłożenia podczas badań nie zmieniał się a jego wartość wynosiła 0°.



Rys. 2. Wymiary wycinanych próbek sera

W celu zmniejszenia oporów cięcia a w efekcie energochłonności procesu badania realizowano narzędziami pokrytymi powłokami: TiN (azotek tytanu) oraz AS48 (nazwa handlowa powłoki fluoropolimerowej wykonanej w firmie PFP Polska). Podstawowe badania realizowano nożami wykonanymi ze stali narzędziowej do pracy na zimno (NC6). Zdjęcia noży przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Noże wykorzystywane do badań: a) nóż ze stali NC6, b) nóż z powłoką TiN, c) nóż z powłoką AS48

Przeprowadzono ponadto cięcie drutem ze stali chromowo-molibdenowej o średnicy 0,3 mm, którą dobrano na podstawie analizy literatury oraz badań wstępnych autorów.

Cięcie wszystkimi nożami realizowano według takiego samego planu badań z wielkościami wejściowymi (zmiennymi niezależnymi):  $\beta$  - kąt ostrza noża,  $V$  - prędkość cięcia. Wielkości wyjściowe (zmiennie zależne) stanowiły: wyznaczana bezpośrednio:  $F$  - siła cięcia, wyznaczana pośrednio:  $e_j$  - energochłonność jednostkowa procesu cięcia. Wartość energochłonności cięcia, stanowiącą zmienną zależną modelu badań, odnoszono do jednostki pola powierzchni przeciętego materiału. Otrzymywano w ten sposób energochłonność jednostkową procesu.

Do pomiaru pola powierzchni przeciętych próbek wykorzystywano stanowisko do komputerowej analizy obrazu.

Wartości różnic pomiędzy energochłonnością procesu cięcia nożem ze stali NC6 a energochłonnością jednostkową procesu cięcia innymi narzędziami obliczano z zależności:

$$R_{(X)} = \frac{(e_{jB} - e_{j(X)})}{e_{jB}} \cdot 100, \quad (\%) \quad (3)$$

gdzie:

$e_{jB}$  – energochłonność jednostkowa procesu cięcia nożem ze stali NC6 ( $J \cdot m^{-2}$ ),

$e_{j(X)}$  – energochłonność jednostkowa procesu cięcia innym narzędziem ( $J \cdot m^{-2}$ ).

Istotność obliczonych różnic sprawdzano testem t-Studenta dla prób niezależnych.

#### 4. Wyniki badań i ich analiza

Opracowując plan badań doświadczalnych korzystano z modułu *Planowanie Doświadczeń* zawartego w pakiecie oprogramowania *Statistica 9.0 PL*. Do badań przyjęto plan centralny-kompozycyjny dla standardowego rotalno-uniformalnego planu z dwiema zmiennymi niezależnymi.

Ogólną postać macierzy eksperymentu przyjętą w realizowanym planie badań w postaci unormowanej (kodowanej) oraz fizycznej przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Ogólna postać macierzy eksperymentu

Lp.	Wielkości wejściowe $X_i$			
	macierzy kodowana		postać fizyczna	
	$X_1$	$X_2$	$\beta$ [°]	$V \times 10^{-3}$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]
1.	- $\alpha$	0	5,0	225,0
2.	1	1	39,1	348,7
3.	+ $\alpha$	0	45,0	225,0
4.	-1	1	10,9	348,7
5.	0	0	25,0	225,0
6.	-1	-1	10,9	101,3
7.	0	+ $\alpha$	25,0	400,0
8.	0	0	25,0	225,0
9.	1	-1	39,1	101,3
10.	0	- $\alpha$	25,0	50,0

Przedstawione w macierzy eksperymentu wartości prędkości cięcia  $V$  stanowiły równocześnie wartości zmiennej niezależnej dla jednoczynnikowej analizy regresji podczas cięcia drutem.

Matematyczny opis procesu cięcia (model matematyczny) ma postać ogólną opisaną równaniem (4):

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 \quad (4)$$

Wartości energochłonności jednostkowej procesu cięcia oraz różnic wynikających z zastosowania różnych narzędzi tnących przedstawiono w tabeli 2. Przypadki, dla których obliczone różnice są statystycznie istotne, przy założonym poziomie istotności  $\alpha=0,05$ , zaznaczono szarym tłem.

Tabela 2. Wartości energochłonności jednostkowej procesu cięcia sera oraz różnic wynikających z zastosowania różnych narzędzi tnących

$\beta$ [°]	$V \times 10^{-3}$ [ $m \cdot s^{-1}$ ]	$e_{jB}$ [ $J \cdot m^{-2}$ ]	$e_{jTiN}$ [ $J \cdot m^{-2}$ ]	$R_{TiN}$ [%]	$e_{jAS48}$ [ $J \cdot m^{-2}$ ]	$R_{AS48}$ [%]	$e_{jDR}$ [ $J \cdot m^{-2}$ ]	$R_{DR}$ [%]
10,9	101,3	664,4	543,3	18,2	923,2	-38,9	183,5	72,4
25,0	50,0	485,3	390,5	19,5	684,5	-41,0	222,6	54,1
25,0	400,0	868,6	848,6	2,3	1164,1	-34,0	355,1	59,1
10,9	348,7	911,5	897,6	1,5	1156,6	-26,9	331,4	63,6

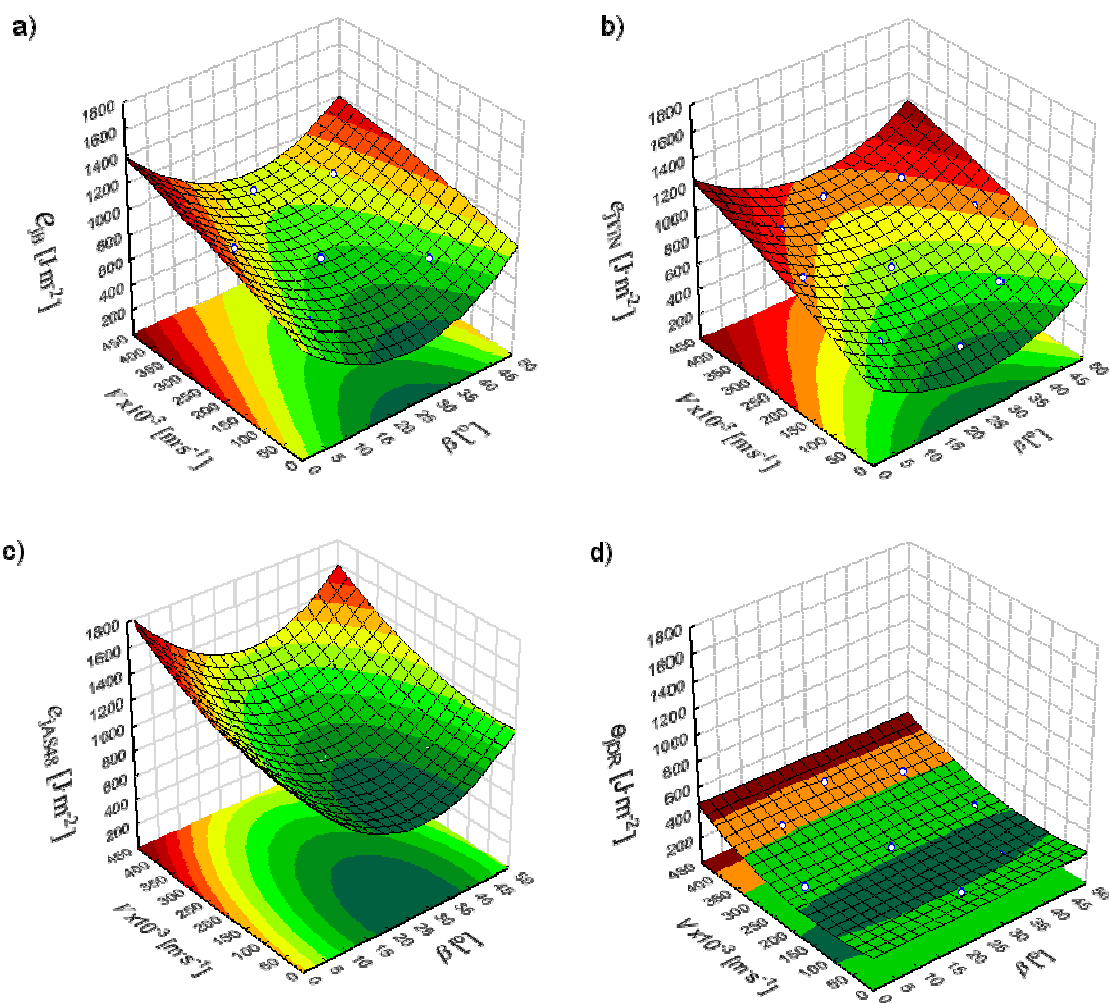
5,0	225,0	1064,1	878,2	17,5	1341,0	-26,0	209,3	80,3
39,1	348,7	904,9	894,8	1,1	1125,7	-24,4	331,4	63,4
45,0	225,0	867,4	838,4	3,3	987,5	-13,8	209,3	75,9
25,0	225,0	688,4	660,9	3,9	833,5	-21,1	209,3	69,6
39,1	101,3	724,6	571,8	21,1	908,0	-25,3	183,5	74,7
25,0	225,0	688,4	660,9	3,9	833,5	-21,1	209,3	69,6

Największe korzyści w postaci zmniejszenia energochłonności procesu, uzyskano podczas cięcia drutem. Wartość różnicy energochłonności zmienia się od 54,1% do 80,3%. Największe korzyści uzyskano podczas cięcia z prędkością  $0,225 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ , najniższe zaś dla prędkości  $0,050 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Cięcie sera nożem z powłoką TiN spowodowało zmniejszenie energochłonności jednostkowej procesu we wszystkich punktach planu badań do wartości sięgającej 21,1%. Różnice zbliżone do tej wartości osiągnięto dla czterech punktów planu badań. Największe wartości różnic uzyskano dla najmniejszych wartości prędkości cięcia.

Cięcie sera nożem z powłoką AS48 spowodowało we wszystkich punktach planu badań podwyższenie jednostkowej energochłonności procesu w porównaniu do wartości tego parametru dla cięcia nożem ze stali NC6. Najmniejszą zmianą wartości energochłonności jednostkowej procesu charakteryzowało się cięcie z prędkością wynoszącą  $0,225 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Na rysunku 4 przedstawiono uzyskane powierzchnie odpowiedzi dla wszystkich stosowanych narzędzi.



Rys. 4. Wykresy przedstawiające powierzchnie odpowiedzi dla cięcia a) nożami ze stali NC6, b) nożami z powłoką TiN, c) nożami z powłoką AS48, d) drutem

Wszystkie powierzchnie odpowiedzi, poza cięciem drutem realizowanym tylko dla jednej zmiennej  $V$ , miały zbliżony charakter. Równanie regresji opisujące proces cięcia sera drutem przedstawia wielomian stopnia drugiego (8). Dla badanych wartości zmiennej niezależnej  $V$  najniższą wartością energochłonności procesu charakteryzowało się cięcie z prędkością  $0,1013 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Wyznaczone równania regresji opisujące zależności pomiędzy zmiennymi mają postać:

- dla procesu realizowanego nożami ze stali NC6:

$$e_{JB} = 846,35769 - 33,26005 \cdot \beta + 0,66846 \cdot \beta^2 + 1,53258 \cdot V - 0,000699 \cdot V^2 - 0,00955 \cdot \beta V; R^2 = 0,93485 \quad (5)$$

- dla procesu realizowanego nożami z powłoką TiN:

$$e_{TiN} = 583,33605 - 23,87759 \cdot \beta + 0,49226 \cdot \beta^2 + 1918,20684 \cdot V - 1039,86427 \cdot V^2 - 4,46894 \cdot \beta V; R^2 = 0,99632 \quad (6)$$

- dla procesu realizowanego nożami z powłoką AS48:

$$e_{jAS48} = 1326,18205 - 44,67264 \cdot \beta + 0,80701 \cdot \beta^2 - 20,323399 \cdot V + 2705,00281 \cdot V^2 - 2,24283 \cdot \beta V; \quad R^2=0,9073 \quad (7)$$

-dla procesu realizowanego drutem:

$$e_{jDR} = 237,2352 - 715,031 \cdot V + 2673,851 \cdot V^2; \quad R^2 = 0,9594 \quad (8)$$

## 5. Wnioski

Analiza wyników badań pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

1. Przeprowadzone badania doświadczalne wykazały przydatność zaproponowanej metody badawczej do analizowania zagadnień związanych z energochłonnością procesu cięcia.
2. Badania doświadczalne potwierdziły występowanie istotnych statystycznie różnic między energochłonnością procesu cięcia nożem ze stali NC6 a nożami z powłokami TiN i AS48.

W przypadku cięcia sera nożem z powłoką TiN tylko w 4 punktach, z przyjętego planu badań różnice energochłonności osiągały istotne statystycznie wartości dochodzące do 21,1%. Były to punkty odpowiadające procesowi prowadzonemu z najmniejszymi przyjętymi w planie badań prędkościami cięcia.

Uzyskane różnice energochłonności procesu cięcia sera nożem z powłoką AS48 okazały się być statystycznie istotne we wszystkich punktach planu badań. Wynikały one jednak ze zwiększenia energochłonności procesu.

3. Badania pokazały, że energochłonność jednostkowa procesu cięcia sera drutem różniła się istotnie od energochłonności jednostkowej procesu cięcia nożem ze stali NC6 i osiągała wartość od 54,1% do 80,3%.
4. Stwierdzono zbliżony, dla wszystkich stosowanych narzędzi, z wyłączeniem drutu, charakter zmian energochłonności jednostkowej procesu cięcia. Energochłonność procesu cięcia zwiększała się wraz ze wzrostem prędkości dla wszystkich stosowanych narzędzi tnących. Energochłonność jednostkowa procesu osiągała minimum dla kąta ostrza 25°.
5. Opisy matematyczne zależności pomiędzy energochłonnością procesu a wielkościami wejściowymi dla prowadzonych technologii cięcia mogą być narzędziem dla konstruktorów i technologów pomagającym kierować procesem tak aby osiągać minimalną energochłonność.

## 7. Bibliografia

1. Dowgiałło A. Doświadczalna weryfikacji teorii mikrostrzy. Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego 2002; 2: 15-17.
2. Flizikowski J, Bieliński K, Bieliński M. Podwyższanie energetycznej efektywności wielotarczowego rozdrabniania nasion zbóż na paszę. Wyd. ATR – OPO, Bydgoszcz 1994.
3. Goh S M, Charalambides M N, Williams J G. On the mechanics of wire cutting of cheese. Engineering Fracture Mechanics 2005; 72: 931-946.
4. Kamyab I, Chakrabarti S, Williams J G. Cutting cheese with wire. Journal of Materials Science 1998; 33: 2763-2770.
5. Nadulski R, Wawryniuk P. Wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych zespołu tnącego na proces cięcia warzyw. Inżynieria Rolnicza 2003; 8: 297-305.



6. Opielak M. Rozdrabnianie materiałów w przemyśle rolno-spożywczym. Badanie wpływu konstrukcji rozdrabniacza i cech materiału rozdrabnianego na jakość i energochłonność procesu. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 1996.
7. Opielak M. Analiza teorii procesu rozdrabniania materiałów w przemyśle rolno-spożywczym. *Folia Societatis Scientiarum Lublinensis*. Technika 1999; 8: 95-106.
8. Opielak M, Komsta H. Kierunki doskonalenia konstrukcji urządzeń rozdrabniających w przemyśle spożywczym. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej* 2000; 61: 167-173.
9. Popko H, Mischczuk M. Badania oporów krajania niektórych produktów spożywczych. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* 1989; z. 354: 147-151.
10. Schneider Y, Zahn S, Rohm H. Power requirements of the high-frequency generator in ultrasonic cutting of foods. *Journal of Food Engineering* 2008; 86: 61-67.
11. Schneider Y, Zahn S, Schindler C, Rohm H. Ultrasonic excitation affect friction interactions between food materials and cutting tools. *Ultrasonic* 2009; 49: 588-593.
12. Sykut B, Kowalik K, Opielak M. Badanie wpływu kątów ostrza i przystawienia na opory krojenia produktów spożywczych. *Inżynieria Rolnicza* 2005; 9: 339-344.
13. Szarycz M, Fidos M, Jałoszyński K. Wpływ zakresu ciśnień podczas suszenia mikrofalowego pod obniżonym ciśnieniem selera korzeniowego na kinetykę procesu i pracę cięcia rehydrowanego materiału. *Inżynieria Rolnicza* 2006; 4: 239-246.
14. Ślaska-Grzywna B. Wpływ parametrów obróbki cieplnej selera na siłę cięcia. *Inżynieria Rolnicza* 2008; 6: 175-180.