

POLITECHNIKA LUBELSKA

WYDZIAŁ MECHANICZNY

mgr inż. Konrad Kowalik

**Wpływ technologii cięcia wybranych produktów
spożywczych na energochłonność procesu**

Rozprawa doktorska

Promotor:
Prof. dr hab. inż. Marek Opielak

Lublin 2011

SPIS TREŚCI

Wykaz ważniejszych oznaczeń	4
1. Wstęp	5
2. Analiza aktualnego stanu literatury z zakresu	
energochłonności cięcia materiałów spożywczych	8
2.1. Praca i energochłonność rozdrabniania	14
2.2. Wpływ właściwości ciętych materiałów na	
energochłonność procesu	24
2.3. Wpływ prędkości cięcia na energochłonność procesu	28
2.4. Wpływ geometrii oraz ustawienia narzędzia na	
energochłonność procesu cięcia	30
2.5. Energochłonność stosowanych technologii cięcia	38
3. Procesy tarcia i smarowania	42
4. Tezy, cel i zakres badań	54
5. Metodyka	57
5.1. Model procesu cięcia	57
5.2. Stanowisko badawcze	60
5.3. Materiały poddawane procesowi cięcia	71
5.4. Stosowane technologie cięcia	74
5.5. Energochłonność procesu cięcia	79
5.6. Plan badań	81
5.7. Metody statystyczne opracowania wyników	85
6. Wyniki i analiza badań	87
6.1. Wyniki badań energochłonności jednostkowej procesu	
cięcia sera	87
6.1.1. Cięcie sera technologią podstawową	87

6.1.2. Cięcie sera nożem pokrytym powłoką TiN	91
6.1.3. Cięcie sera nożem z powłoką AS48	95
6.1.4. Cięcie sera z zastosowaniem smarowania noża	99
6.1.5. Technologia cięcia sera drutem	104
6.2. Wyniki badań energochłonności jednostkowej procesu cięcia marchwi	111
6.2.1. Cięcie marchwi technologią podstawową	111
6.2.2. Cięcie marchwi nożem pokrytym powłoką TiN	114
6.2.3. Cięcie marchwi nożem pokrytym powłoką AS48	118
6.2.4. Cięcie marchwi z zastosowaniem smarowania noża	122
6.2.5. Cięcia marchwi drutem	127
7. Zalecenia do konstrukcji i eksploatacji maszyn i urządzeń tnących ...	134
8. Wnioski	136
9. Literatura	139
Streszczenie	147
Abstrakt	150

Wykaz ważniejszych oznaczeń

β - kąt ostrza noża [°]

V – prędkość cięcia [m/s]

F – siła cięcia [N]

W - wilgotność materiału [%]

m - masa naczynka [g]

m_1 - masa naczynka z próbką przed suszeniem [g]

m_2 - masa naczynka z próbką po suszeniu [g]

g – grubość warstwy odcinanej [mm]

s – odległość pomiędzy fotokomórkami [m]

t – czas odczytany ze stopera [s]

e_j – jednostkowa energochłonność procesu cięcia [J/m^2]

L – praca cięcia [J]

A – pole powierzchni przeciętej próbki [m^2]

$\sum_i F_i$ - suma zarejestrowanych sił podczas przecinania próbki [N]

ds_i - droga jaką pokonuje próbka pomiędzy kolejnymi zarejestrowanymi wartościami siły w przebiegu czasowym [m]

σe_j - odchylenie standardowe energochłonności jednostkowej procesu cięcia [J/m^2]

R – różnica pomiędzy wartościami jednostkowej energochłonności procesu cięcia technologią podstawową a inną stosowaną technologią [%]

stosowane indeksy:

B – technologia podstawowa,

TiN – technologia cięcia nożem z powłoką azotku tytanu,

AS48 – technologia cięcia nożem z powłoką fluoropolimerową o nazwie handlowej AS48,

OL – technologia cięcia nożem smarowanym olejem rzepakowym,

DR – technologia cięcia drutem.

1. WSTĘP

Jedną z głównych grup procesów stosowanych w przetwórstwie rolno-spożywczym stanowią procesy rozdrabniania, spośród których najczęściej stosowaną operacją jest cięcie [23, 77].

Proces cięcia jako jeden z najbardziej istotnych procesów w inżynierii żywności ma najczęściej na celu uzyskanie produktów o określonym wymiarze i kształcie. W suszarnictwie, cukrownictwie, produkcji konserw, kwaszeniu warzyw i innych technologiach chodzi o otrzymanie produktów pokrojonych w specjalny sposób i uzyskanie produktu w postaci plasterków, słupków, segmentów, formatek lub kostki. Cięciu poddaje się także mięso w masarniach i zakładach przetwórczych.

Kształt materiału rozdrobnionego jest podyktowany względami organoleptycznymi, technologicznymi i użytkowymi. Plasterkowanie wędlin, serów i krajanie marchwi w kostkę znacznie ułatwia przygotowanie posiłków, cięcie ziemniaków w prostopadłościany, o karbowanej powierzchni podnosi walory organoleptyczne frytek, a kostkowanie słoniny lub krajanie buraków cukrowych w pasemka o przekroju daszkowatym zapewnia właściwy przebieg procesu technologicznego [10, 52, 67].

W przemyśle spożywczym rozdrabnianiu są poddawane przede wszystkim rozmaite surowce, jak owoce, warzywa, zboże, buraki cukrowe, ziemniaki, mięso, ryby, przyprawy i in., natomiast rozdrabnianie gotowych produktów jest spotykane rzadziej. Jako przykład można tu wskazać rozdrabnianie cukru na puder, ziaren kawy i kakao, produkcję kasz i in [10, 60].

Czynnikami, które mają znaczący wpływ na przebieg procesu cięcia surowca są przede wszystkim jego właściwości wytrzymałościowe ściśle związane z jego budową, strukturą wewnętrzną oraz indywidualnymi cechami odmiany, miejscem pobierania próbek, miejscem i warunkami uprawy, np. na jakość technologiczną korzeni buraka cukrowego, marchwi czy pietruszki składają się cechy morfologiczne, fizyczne, chemiczne i fizjologiczne.

Duży wpływ na przebieg i energochłonność procesu rozdrabniania mają również warunki i rodzaj obróbki termicznej surowców (gotowanie, blanszowanie, suszenie, obróbka mikrofalowa).

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. Nieliczne dotychczas przeprowadzone badania procesu cięcia były prowadzone pod kątem doskonalenia konstrukcji zespołów tnących, analizy parametrów ostrza noża oraz ich roli w tym procesie. Inna grupa badań koncentruje się na poznaniu zjawisk fizycznych oraz biologicznych zachodzących w materiale roślinnym podczas cięcia. [19, 35, 36].

Zużycie energii w świecie na rozdrabnianie ciał stałych osiąga w ciągu roku wartość około 350 miliardów kWh. Taki nakład energii jest jednym z zasadniczych problemów związanych z procesem rozdrabniania i świadczy o jego randze w przemyśle [8, 53].

Większość badań dotyczących sposobów zmniejszania energochłonności procesu cięcia materiałów spożywczych dotyczy oceny zmian parametrów związanych z narzędziem tnącym (kątem ostrza, grubość, kształt krawędzi tnącej), jego ustawieniem względem obrabianego przedmiotu lub właściwościami ciętych materiałów. Nieliczne prace prezentują problematykę badań energochłonności procesu ze względu na zastosowaną technologię cięcia [3, 4, 23, 24, 36, 56, 82, 83, 98].

Energochłonność procesu cięcia w dużym stopniu związana jest z geometrią narzędzia, tarciami występującymi pomiędzy narzędziem a obrabianym przedmiotem. W przemyśle maszynowym i obróbce skrawaniem tarcie występujące pomiędzy współpracującymi elementami zmniejszane jest między innymi poprzez nakładanie na współpracujące powierzchnie powłok

charakteryzujących się małym współczynnikiem tarcia lub wprowadzanie pomiędzy współpracującą parę cierną środka smarnego. Minimalizacja powierzchni kontaktu współpracującej pary ciernej jest kolejnym sposobem zmniejszania oporów wynikających z tarcia elementów takiego układu.

Analiza możliwości wykorzystania powyższych metod w celu zmniejszenia energochłonności procesu cięcia produktów spożywczych stała się pretekstem do podjęcia tematu i przeprowadzenia badań w tym zakresie.

2. ANALIZA AKTUALNEGO STANU LITERATURY Z ZAKRESU ENERGOCHŁONNOŚCI CIĘCIA MATERIAŁÓW SPOŻYWCZYCH

Dość liczna literatura z zakresu cięcia materiałów spożywczych świadczy o randze procesu a także o wciąż istniejącej potrzebie analizy tematu i prowadzenia badań nad zmniejszaniem zużycia energii w procesie cięcia surowców i produktów spożywczych. Wielu autorów, zarówno krajowych jak i zagranicznych podejmowało próby oceny wpływu wielu różnorodnych czynników na energochłonność procesu cięcia. Oceniano zarówno wpływ czynników związanych z ciętym materiałem, jak również z czynnikami konstrukcyjno-eksploatacyjnymi urządzeń rozdrabniających czy zastosowaną technologią cięcia.

Cięcie jest obróbką polegającą na działaniu na surowiec siły przenoszonej przez element tnący, mającą na celu podzielenie materiału na części oraz nadanie mu określonych wymiarów i kształtów [68].

Inna definicja procesu podaje, że jest to zbiór kolejnych uzależnionych zmian mechanicznych, biologicznych, fizycznych zachodzących w materiale pod wpływem działania elementu tnącego w określonych warunkach agrotechnicznych uwzględniających rodzaj i odmianę roślin, stan uprawy, rodzaj zespołu tnącego i inne [100].

Krojenie stanowi odrębną grupę procesów rozdrabniania. Jest to obróbka cięciem charakteryzująca się tym, że żadna z oddzielanych od siebie części produktu nie ma charakteru i cech odpadu. Przy krojeniu narzędzie jest z reguły jednostrzowe [17, 68].

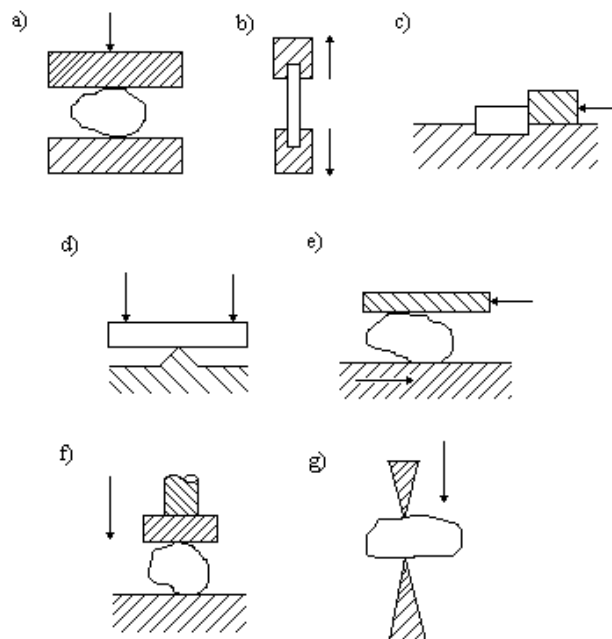
Teoretyczne podstawy rozdrabniania surowców spożywczych są bardzo skromne, dlatego często wykorzystuje się zdobytą empirycznie wiedzę lub korzysta z wiedzy inżynierii chemicznej, dotyczącej zwykle ciał

nieorganicznych. Przyczyną takiego stanu jest skomplikowana struktura i właściwości surowców organicznych stanowiące główną przeszkodę w rozwoju dobrych teorii dających podstawy do projektowania maszyn rozdrabniających dla przemysłu spożywczego [44].

Brak jest do tej pory teorii rozdrabniania materiałów sprężysto-lepkoplastycznych. Istniejące teorie odnoszą się do materiałów kruchych [68].

Jednym z kryteriów rozdrabniania jest sposób działania przyłożonych sił. W rzeczywistym rozdrabnianiu nie ma ostrych granic pomiędzy rodzajem przyłożonych sił. Zwykle podczas rozdrabniania zaangażowanych jest kilka sił, z jedną dominującą np. w często stosowanym krojeniu z dominującym ścinaniem bierze udział zgniatanie i rozrywanie [51].

Sposoby rozdrabniania przedstawione zostały na rysunku 2.1.



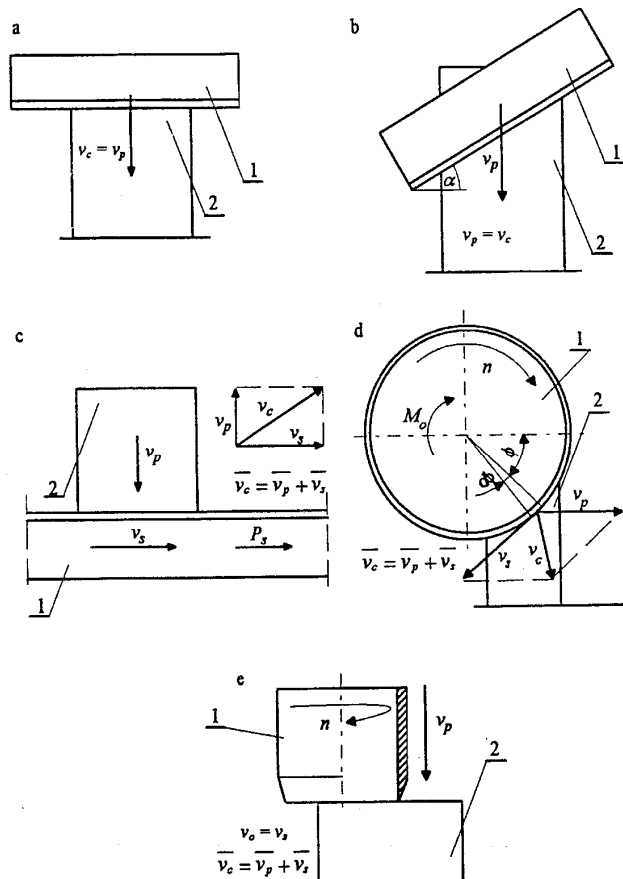
Rys. 2.1. Sposoby rozdrabniania: a) zgniatanie, b) rozrywanie, c) ścinanie, d) zginanie, e) ścieranie, f) uderzenie, g) rozłupywanie [73]

Elementy teorii cięcia ostrzem

Badaniami procesu cięcia materiałów organicznych za pomocą narzędzi w kształcie klina zajmowało się wielu naukowców radzieckich m.in. Iwaszko, Żeligowski czy Goriaczkin [37, 40, 99]. Wyróżnili oni trzy rodzaje cięcia (rysunek 2.2.):

1. *cięcie normalne*, w którym nie występuje względne przesunięcie surowca wzdłuż ostrza noża, może więc być wykonane nożami o dowolnej krzywiznie ostrza. W takim cięciu jego prędkość jest równoważna nadawanej surowcowi lub nożowi prędkości podawania; kąt pomiędzy linią a kierunkiem cięcia $\alpha=90^\circ$;
2. *cięcie skośne*, uważane za normalne, w którym względna prędkość noża i surowca wymuszana jedną siłą, jest odchylona od linii ostrza o kąt $0^\circ < \alpha < 90^\circ$;
3. *cięcie ślizgowe*, w którym względny ruch noża i surowca odbywa się w kierunkach działających w układzie „nóż-surowiec” dwóch sił: normalnej i stycznej do linii ostrza. W układzie występują dwie prędkości: normalna v_p i ślizgowa v_s .

W swej analizie Iwaszko [40] rozważa wpływ mikronierówności ostrza, które wynikają z odstępstw jego profilu teoretycznego od rzeczywistego, na siły występujące w układzie „nóż-surowiec”. Według Iwaszki mikronierówności to kliny o podstawie równej, $p=(6\div 10)$ μm i grubości przy wierzchołku równej $(0,5\div 1)$ μm . Wysokości tych klinów autor nie podaje, ale można przyjąć, że jest ona równa podwojonej wartości średniego arytmetycznego odchylenia profilu chropowatości R_a ostrza – $H=2 R_a$.



Rys. 2.2. Schematy cięcia normalnego (a – gilotynowe normalne, b) – gilotynowe skośne) i ślizgowego (c – nożem taśmowym, d- nożem tarczowym, e - nożem cylindrycznym): 1 – nóż, 2 – próbka [40]

W efekcie przeprowadzonych rozważań sformułował on następujące twierdzenia, które w literaturze określane są jako teoria Iwaszki:

1. siła cięcia skośnego, charakteryzowanego kątem α z przedziału $(30^\circ \div 90^\circ)$, może być 6-7 razy mniejsza niż normalnego, chociaż długość linii jego cięcia jest większa,
2. nie każde cięcie, w którym występują prędkości normalna i styczna jest cięciem ślizgowym. Cięcie ślizgowe występuje tylko wówczas, gdy w czasie t zagłębieniu ostrza bez rozcięcia materiału w kierunku normalnym na głębokość nie większą niż średnia wysokość mikroostrzy towarzyszy jego przemieszczenie w kierunku stycznym o odcinek

równy ich podstawie. W takim przypadku siła normalna powoduje wyłącznie ugięcie materiału, a siła styczna – jego cięcie.

Przyjmując, że kinematycznie cięcie ślizgowe charakteryzuje współczynnik poślizgu $k = v_s/v_p$, z przedstawionej przez Iwaszkę analizy można wywnioskować, że w przypadku cięcia ślizgowego:

- dla takich samych wartości współczynnika k wartość siły normalnej powinna być taka sama,
- spowodowany wzrostem prędkości ślizgowej wzrost wartości współczynnika k spowoduje spadek wartości siły normalnej.

Z definicji cięcia ślizgowego wynika także, że dla ostrza o znanych geometrycznych parametrach mikroostrzy istnieje graniczna wartość współczynnika k_{gr} oddzielająca cięcie normalne lub skośne od ślizgowego. Zgodnie z definicją podaną przez Iwaszkę cięcia ślizgowego, w granicznym jego przypadku w czasie t ostrze w kierunku normalnym przemieszcza się z prędkością v_p o odcinek p , to:

$$\frac{H}{v_p} = \frac{p}{v_s} \quad (2.1)$$

Przekształcając wzór (2.1) otrzymuje się:

$$k_{gr} = \frac{v_s}{v_p} = \frac{p}{2Ra} \quad (2.2)$$

Cięcie jest cięciem ślizgowym, gdy $k > k_{gr}$.

W literaturze poświęconej cięciu materiałów organicznych teoria Iwaszki jest traktowana jako pewnik, mimo iż nie jest poparta żadnymi badaniami [18].

Tymczasem Dowgiałło (2002) przeprowadził trzy doświadczenia dla zweryfikowania twierdzeń Iwaszki, w których mierzono siły podawania próbek surowca organicznego. W pierwszym doświadczeniu z przygotowanych z ziemniaków próbek o wymiarach 20×20 mm, zastosował cięcie normalne ($\alpha=90^\circ$) i cięcie skośne ($\alpha=60^\circ$). Próbki z prędkością $v=1,15$ m/s przecinano nożem o grubości $b=1$ mm i kącie ostrza $\beta=22^\circ$.

Przed przystąpieniem do kolejnych dwóch doświadczeń Dowgiałło obliczył dla wykorzystywanego w nich ostrza graniczną wartość współczynnika poślizgu, niezbędną dla ustalenia takich wartości prędkości normalnej i stycznej, dla których cięcie będzie miało charakter ślizgowy. Mając wartość graniczną współczynnika k , przeprowadził dwa doświadczenia, w których zmierzył siły podawania N takich samych próbek mięsa leszcza przecinanych cięciem ślizgowym wykonywanych nożem taśmowym. Badania były przeprowadzone zachowując stałą wartość współczynnika $k > k_{gr}$ oraz zmieniając prędkość podawania v_p przy stałej prędkości ślizgowej v_s . Wartość współczynnika poślizgu była większa od jego wartości granicznej. Aby stworzyć najlepsze warunki wykonywanego przez mikroostrze cięcia ślizgowego, w obu doświadczeniach stosowano małą prędkość podawania.

Z badań przeprowadzonych przez Dowgiałło wynika, że średnia wartość siły N w przypadku cięcia skośnego nie jest, jak sugeruje Iwaszko, mniejsza, lecz o 10% większa niż w przypadku cięcia normalnego. Wykazał również, że przy cięciu ślizgowym o wartości siły podawania nie decyduje wartość współczynnika k , lecz względna prędkość noża i surowca. W obu doświadczeniach większym prędkościom względnym odpowiadały mniejsze wartości siły podawania. Wyniki te wskazują kierunek poszukiwań ilościowego i jakościowego wpływu kinematycznych parametrów cięcia na jego opory [23, 25, 26].

2.1. PRACA I ENERGOCHŁONNOŚĆ ROZDRABNIANIA

Całkowita energia rozdrabniania jest zużyta m.in. na pracę jaką należy wykonać, aby spowodować zniszczenie struktury ciała i jego podział. Energia w procesie rozdrabniania jest sumą zarówno energii „czystej” koniecznej do zniszczenia struktury surowca oraz energii odkształceń sprężystych, strat związanych z tarciem wewnętrznym i innych strat towarzyszących rozdrabnianiu a objawiających się jako energia cieplna podnosząca temperaturę ciała i rozpraszana do otoczenia. Wymienione składniki dają energię rozdrabniania „netto” z makroskopowego punktu widzenia. Natomiast oddzielny problem stanowi sprawność mechaniczna maszyny rozdrabniającej, na którą to składa się praca przemieszczenia surowca w przestrzeni roboczej, tarcie o ściany i elementy robocze, tarcie surowca między sobą, przemieszczenia elementów roboczych, a także opory ruchu samej maszyny. Energia, którą musimy dostarczyć maszynie jest więc sumą energii „netto” wynikającą z przebiegu procesu podziału surowca, wymuszonego przez elementy robocze oraz energii wynikającej z układu konstrukcyjnego maszyny, organizacji procesu wewnątrz komory roboczej i oporów ruchu mechanizmów [5, 74].

Siła oporu ruchu noża podczas procesu cięcia lub skrawania materiałów określana jest często za pomocą uogólnionego parametru nazywanego jednostkowym oporem cięcia. Parametr ten definiowany jest jako siła przypadająca na jednostkę długości czynnej krawędzi tnącej noża [21].

Jeżeli opór ścinania nożem o długości jednostkowej $l = 1\text{m}$ dla danego materiału oznaczymy przez R [N/m], to praca jaką wykona krawalnica tnąc materiał na jednakowej powierzchni $l \times l$ [m²]

$$L = Rl^2, \text{ [J]} \quad (2.3)$$

W odniesieniu do jednostki powierzchni ścinania otrzymamy jednostkową pracę ścinania

$$L_0 = \frac{Rl^2}{l^2} = R, \text{ [J/m}^2\text{]} \quad (2.4)$$

W tabeli 2.1. podano przykładowo kilka wartości jednostkowej pracy ścinania dla surowców spotykanych w przemyśle spożywczym.

Tab. 2.1. Jednostkowa praca ścinania niektórych surowców spożywczych [8]

Materiał	$L_0 \left[\frac{kJ}{m^2} \right]$
marchew	1,4÷1,6
cebula	1,7÷1,8
kapusta	1,0÷1,2
buraki	0,9÷1,1
ziemniaki	0,6÷0,7
mięso (parowane)	5,0÷8,0
słonina	10,0÷15,0

Teorie rozdrabniania produktów spożywczych

W celu rozdrobnienia ciała należy działać nań siłami zewnętrznymi większymi od sił spójności, wiążących cząstki danego ciała. Wymaga to wykonania pewnej pracy, którą nazywa się pracą rozdrabniania. Składa się na nią przyrost energii powierzchniowej oraz praca zużyta na zmianę kształtu i pokonanie sił tarcia w procesie rozdrabniania pojedynczej cząstki [73].

Duża różnorodność czynników wpływających na proces rozdrabniania powoduje, że niemożliwym staje się ujęcie tego zagadnienia w jednolitą formułę matematyczną [73].

Opracowane dotychczas teorie rozdrabniania mają zazwyczaj charakter teorii wytrzymałościowych i odnoszą się głównie do ciał kruchych. Prace rozdrabniania określa się wówczas jako funkcję [73]:

$$L=k \cdot f(x) \quad (2.5)$$

gdzie: k – stała dla danego materiału, wynikająca z jego cech wytrzymałościowych i podatności na rozdrabnianie,

$f(x)$ – funkcja wymiaru cząstki materiału, wynikająca ze stopnia rozdrobnienia.

Do podstawowych teorii rozdrabniania zalicza się teorie Rittingera, Kicka, Bonda i teorię zwaną hipotezą wielokrotności pracy kruszenia opracowana przez Ignacego Bracha. Oprócz nich istnieje szereg modyfikacji dokonanych przez Mielnikowa, Hermana, Rebintera i Charlsa [20, 74].

Teoria Rittingera. Teoria ta, nazywana również teorią powierzchniową mówi, że praca rozdrabniania jest proporcjonalna do przyrostu powierzchni cząstki materiału rozdrabnianego a więc do wymiaru liniowego w drugiej potędze. Równanie pracy technicznej przyjmuje postać:

$$L_R=L_0 \cdot \Delta F, \quad [J] \quad (2.6)$$

gdzie:

L_0 - jednostkowa praca techniczna rozdrabniania, J/m^2 ;

ΔF – przyrost powierzchni, m^2 .

Teoria ta dotyczy tylko wymiaru materiału rozdrabnianego i nie określa sił działających w procesie rozdrabniania [73]. Teoria Rittingera odpowiada głównie procesowi mielenia drobnego. W tym przypadku nowoutworzona powierzchnia jest bardzo duża.

Teoria Kicka opracowana 11 lat wcześniej przez **Kirpiczewa** mówi, że praca rozdrabniania jest proporcjonalna do przyrostu objętości cząstek materiału rozdrabnianego. Inaczej mówiąc praca rozdrabniania jest proporcjonalna do wymiaru liniowego cząstek w trzeciej potędze.

$$L_K = L_1 \cdot \Delta V, \quad [\text{J}] \quad (2.7)$$

Teoria Kicka uwzględnia odkształcenia i naprężenia zachodzące przy ściskaniu (zgodnie z prawem Hooke'a) aż do momentu osiągnięcia granicy wytrzymałości, czyli uwzględnia zmiany zachodzące w materiale podczas rozdrabniania.

$$L_K = \frac{\sigma_{\max}}{2E} \cdot \Delta V, \quad [\text{J}] \quad (2.8)$$

gdzie: σ_{\max} - doraźna granica wytrzymałości materiału, Pa;

E – moduł Younga, Pa;

ΔV – zmiana objętości materiału w wyniku rozdrabniania, m³;

L_1 – jednostkowa praca rozdrabniania, J/m³.

Z powyższych wzorów wynika, że:

$$L_1 = \frac{\sigma_{\max}}{2E}, \quad [\text{J}] \quad (2.9)$$

Teoria ta dotyczy rozdrabniania wstępnego i zgrubnego (uderzenie i zgniatanie). Poszczególne cząstki są do siebie podobne, co do kształtu przed i po rozdrobnieniu. Są one poddawane jednorazowemu działaniu sił nacisku lub uderzenia aż do pierwszego rozpadu.

Teoria Bonda mówi, że praca rozdrabniania jest proporcjonalna do wymiarów liniowych rozdrabnianych cząstek w potęgę 2,5. Równanie Bonda po

wprowadzeniu stopnia rozdrabniania oraz rozmiarów największej cząstki w produkcie d przyjmuje postać:

$$L_B = m \cdot c \left(\frac{\sqrt{i}}{d} \right)^{0.5} = m \cdot c \cdot i^{0.25} \cdot d^{-0.5}, \quad [\text{J}] \quad (2.10)$$

gdzie: m – masa materiału rozdrabnianego, kg;

c – stała, $\text{Jm}^{0.5}/\text{kg}$;

i – stopień rozdrobnienia [16, 52, 74].

Dla rozdrabniania średniego, gdzie należy uwzględnić pracę deformacji oraz pracę tworzenia nowej powierzchni, Bond zaproponował, aby obliczać pracę rozdrabniania jako średnią geometryczną z pracy deformacji i pracy tworzenia nowej powierzchni:

$$L_B = \sqrt{L_V \cdot L_F}, \quad [\text{J}] \quad (2.11)$$

gdzie: L_V – praca deformacji materiału, J;

L_F – praca tworzenia nowej powierzchni, J;

przy czym

$L_V = L_K$ oraz $L_F = L_R$ [16, 52, 73].

Te trzy teorie można przedstawić za pomocą jednego ogólnego równania. Aby obliczyć pracę potrzebną do rozdrobnienia dowolnej ilości materiału, należy ustalić pracę potrzebną do rozdrobnienia jednostki masy L_j . Wówczas całkowita praca rozdrobnienia wyniesie:

$$L = L_j \cdot G, \quad [\text{J}] \quad (2.12)$$

gdzie: G – masa rozdrabnianego materiału, kg;

zaś jednostkowa praca rozdrobnienia przedstawia się wówczas:

$$L_j = k \cdot x^{-m}, \quad [\text{J/kg}] \quad (2.13)$$

przy czym dla:

- teorii Rittingera $m=1$
- teorii Kicka $m=0$
- teorii Bonda $m=0,5$

Oprócz tych trzech teorii w literaturze możemy spotkać także ich uogólnienia, np. w 1957 roku *Charles* [73, 74], przedstawił równanie w następującej postaci:

$$dL = -K \frac{dx}{x^n}, \quad [\text{J}] \quad (2.14)$$

czyli

$$L = \int -K' \frac{1}{x^n} dx, \quad [\text{J}] \quad (2.15)$$

gdzie: dL – elementarna energia potrzebna do zmniejszenia cząstki o wymiarze x o elementarną wielkość dx ,

przy czym dla:

- teorii Rittingera $n=2$
- teorii Kicka $n=1$
- teorii Bonda $n=1,5$.

Podstawiając do wzoru *Charlesa* [73] powyższe wartości wykładników i całkując równanie otrzymamy:

$$L_R = K_R \left(\frac{1}{x_2} - \frac{1}{x_1} \right), \quad [J] \quad (2.16)$$

$$L_K = K_K (\ln x_1 - \ln x_2), \quad [J] \quad (2.17)$$

$$L_n = K_B \left(\frac{1}{x_2^{0.5}} - \frac{1}{x_1^{0.5}} \right), \quad [J] \quad (2.18)$$

gdzie: K_R , K_K , K_B – stałe odpowiadające poszczególnym teoriom, wyznaczone doświadczalnie.

Kolejną teorię przedstawił **Herman** [73]. Zmodyfikował on wzór na pracę techniczną rozdrabniania korzystając z teorii Rittingera:

$$L_R = k \cdot G \left(\frac{1}{d} - \frac{1}{D} \right), \quad [J] \quad (2.19)$$

gdzie: k – liczba Rittingera (współczynnik zależny od rozdrabnianego materiału),
 m^2 ,

G – ciężar rozdrabnianego materiału, N,

D, d – liniowe wymiary cząstek przed po rozdrobnieniu, m.

Rebinder opracował kolejną teorię [73, 74], która łączy w sobie teorię Rittingera z teorią Kicka:

$$L = L_1 + L_2 + L_3 = K + m_y c_0 + L_0 \Delta F a, \quad [J] \quad (2.20)$$

gdzie: L_1 – praca deformacji urządzenia rozdrabniającego, J,

L_2 - praca deformacji ciała rozdrabnianego zgodnie z teorią Kicka, J,

L_3 – praca potrzebna do wytworzenia nowej powierzchni zgodnie z teorią Rittingera, J,

m_y – liczba cykli deformacji,

c_0 – praca odkształcenia niszczonego, J,

L_0 – praca potrzebna do wytworzenia jednostki przyrostu powierzchni,
J/m²,

ΔF – przyrost powierzchni, m²,

F_1 – powierzchnia materiału przed rozdrobieniem, m²

F_2 – powierzchnia materiału po rozdrobieniu, m²,

$$a = \left(\frac{F_1}{F_2} \right)^n, \quad n > 0 \quad (2.21)$$

Cząstki materiału są do siebie podobne. Teoria ta stosowana jest do rozdrabniania drobnego i bardzo drobnego.

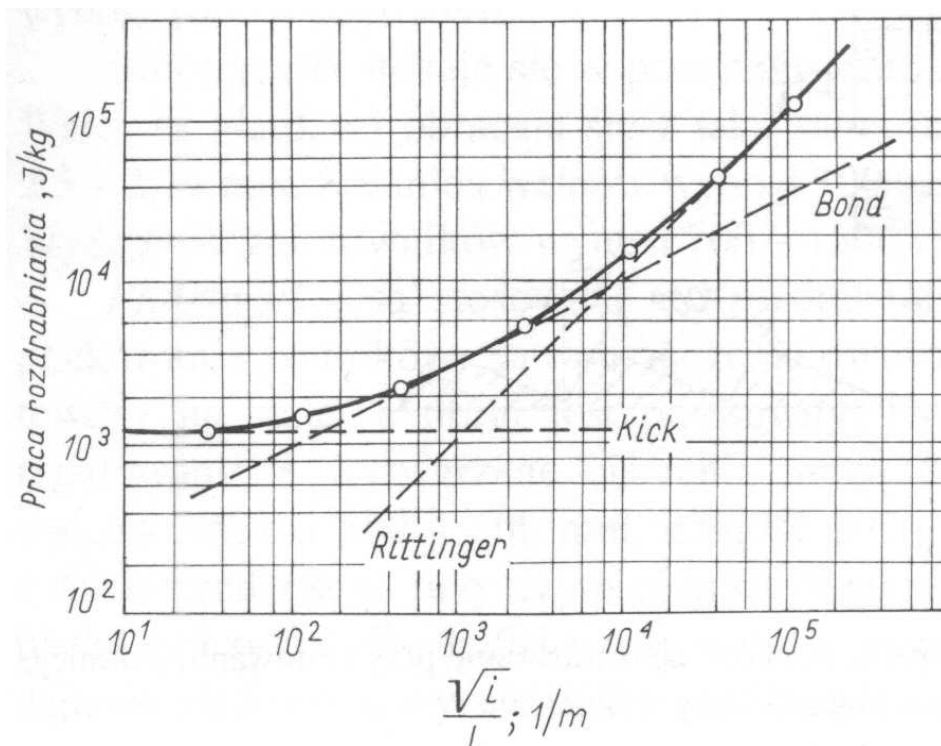
Teorię rozdrabniania opracował prof. **Brach**, została ona nazwana **hipotezą wielokrotności pracy kruszenia** [12, 13, 73]. Istotną cechą tej hipotezy jest to, że aby uzyskać żądany stopień rozdrobienia należy pracę potrzebną do jednorazowego skruszenia wielokrotnie powtarzać.

$$L_{Br} = L_1 \cdot i, \quad [\text{kJ}] \quad (2.22)$$

gdzie: L_1 – praca właściwa kruszenia (obliczona w oparciu o teorię Kicka)

i – wskaźnik wielokrotności powtórzenia (obliczony w oparciu o teorię Rittingera) uwzględniający przyrost powierzchni [13].

Na rysunku 2.3 przedstawiono porównanie sprawdzone przez Hukki wyników teoretycznych z wynikami doświadczalnymi rozdrabniania materiałów twardych. Jak widać z rysunku rozdrabnianie grube najlepiej wyjaśnia teoria objętościowa, mielenie – teoria powierzchniowa, natomiast rozdrabnianie średnie – teoria Bonda-Wanga.



Rys. 2.3. Porównanie wyników teoretycznych z wynikami doświadczalnego rozdrabniania ciał twardych

Przedstawione teorie pozwalają na wyjaśnienie zależności występujące w trakcie rozdrabniania ciał mineralnych oraz obliczanie nakładów całkowitej pracy technicznej zużywanej podczas procesu, jednak nie są zbyt dokładne przy obliczaniu pracy rozdrabniania produktów spożywczych. Przeniesienie tych teorii na grunt technologii żywności jest bardzo trudne i do tej pory nie zostało dokonane. Jednak znajomość ich pozwala na określenie przynajmniej części parametrów decydujących o efektywności procesu rozdrabniania.

Z przedstawionych powyżej wzorów i teorii można wyciągnąć ogólne wnioski, co do czynników decydujących o całkowitej technicznej pracy rozdrabniania materiałów:

1. podatność materiałów na rozdrabnianie zależy od modułu sprężystości i granicy wytrzymałości;

2. możliwość tworzenia nowej powierzchni zależy od wartości swobodnej energii powierzchniowej materiału. Właściwości strukturalno-mechaniczne charakteryzowane między innymi modułem sprężystości, granicą wytrzymałości i swobodną energią powierzchniową zależą od składu i heterogeniczności ciał, a także od jego struktury komórkowej i tkankowej. Tym samym całkowita techniczna praca rozdrabniania danego surowca zależy od wilgotności materiału, stopnia dojrzałości, turgoru i plazmolizy komórek, kierunku ułożenia struktur wewnętrznych w stosunku do kierunku działania siły itp.
3. stopień rozdrobnienia wpływa na energochłonność procesu. Jednak nie jest to jednoznacznie określone, dlatego można teoretycznie wnioskować, że zwiększenie stopnia rozdrobnienia wymaga zwiększenia ilości kontaktu materiału z elementami roboczymi maszyny.
4. skład granulometryczny materiału rozdrabnianego rzutuje na całkowitą techniczną pracę rozdrobnienia. Duże zróżnicowanie wielkości cząstek uniemożliwia wybór odpowiedniej metody rozdrabniania oraz stwarza niekorzystne warunki pracy maszyny. Sortowanie materiału przyczynia się do obniżenia zużycia energii w procesie rozdrabniania.

Jak wynika z przeglądu literatury problem oceny energochłonności maszyn i urządzeń jest wciąż zagadnieniem otwartym i w dalszym ciągu aktualnym, tym bardziej, że przemysł spożywczy zaliczany jest do najbardziej energochłonnych dziedzin gospodarki. Indywidualne analizy energochłonności maszyn i aparatów, chociaż nieodzowne w czasie ich projektowania, nie mogą doprowadzić do opracowania uniwersalnej metody oceny ich energochłonności ze względu na dużą różnorodność i szeroki asortyment urządzeń stosowanych w przemyśle spożywczym.

2.2. WPLYW WŁAŚCIWOŚCI CIĘTYCH MATERIAŁÓW NA ENERGOCHŁONNOŚĆ PROCESU

Spośród wielu czynników wpływających na jakość i energochłonność procesu rozdrabniania bardzo istotne znaczenie mają cięte materiały a dokładniej ich właściwości fizyczne. Należą do nich:

- skład chemiczny,
- struktura surowca,
- skład granulometryczny,
- cechy wytrzymałościowe (twardość, kruchość, sprężystość),
- wilgotność,
- współczynnik tarcia wewnętrznego i zewnętrznego,
- temperatura samozapłonu [73].

Właściwości fizyczne surowców związane są zarówno z ich cechami gatunkowymi (odmianowymi) jak również z warunkami ich uprawy czy magazynowania lub obróbką np. termiczną, przed prowadzeniem procesu cięcia.

W analizowanej literaturze występuje bardzo duża różnorodność materiałów poddawanych procesowi cięcia. Najczęściej były to warzywa i owoce. Krojeniu poddawano również ziarna zbóż, mięso, ryby, sery.

Z grupy warzyw najczęściej materiał badawczy stanowiły: marchew, ziemniak oraz burak cukrowy [2, 42]. Dla tej grupy analizowano wpływ odmiany na opory i energochłonność cięcia (Szot, Kęsik, Gołacki, 1987; Brzozowska-Bakalarz, 1987; Baran i Marks, 2003) czy czasu i miejsca przechowywania (Szot, Kęsik, Gołacki, 1987).

Oprócz cech odmianowych, istotną rolę w procesie cięcia odgrywa parametr jakim jest frakcja wymiarowa. Marks i Kowalski (1994) poddali ocenie opór cięcia różnych frakcji wymiarowych ziemniaka w celu skorelowania go

z podatnością tego materiału na uszkodzenia mechaniczne podczas zbioru kombajnowego. Zauważyli istotną korelację pomiędzy wskaźnikiem uszkodzeń podczas mechanicznego zbioru a oporami cięcia, a także istotne zróżnicowanie oporów cięcia pomiędzy badanymi frakcjami wymiarowymi bulw.

Energochłonność procesu cięcia uzależniona jest także od prowadzonej obróbki termicznej (Ślaska-Grzywna, 2006). Ślaska-Grzywna (2006) poddawała odpowiednio przygotowane próbki ziemniaka parowaniu w czasie 15, 20 i 25 minut. Stwierdziła, że czas obróbki termicznej ma istotny wpływ na siłę cięcia ziemniaków oraz, że siła cięcia maleje wraz ze wzrostem dodanej podczas obróbki termicznej pary.

Cięciu po uprzednio przeprowadzonej obróbce termicznej poddawano również kalafior (Ślaska-Grzywna, 2007) czy seler korzeniowy (Ślaska-Grzywna, 2008; Lentas, Witrowa-Rajchert, 2008).

Szarycz, Fidos i Jaroszyński (2006) przeanalizowali wpływ zakresu obniżonego ciśnienia podczas suszenia mikrofalowego selera korzeniowego na kinetykę procesu i pracę cięcia rehydrowanego materiału. Równaniami empirycznymi autorzy opisali kinetykę suszenia selera oraz wyznaczyli pracę cięcia zrehydrowanego suszu, która to praca okazała się być 1,5-2 razy większa od pracy cięcia surowego materiału.

Innymi materiałami z grupy roślin warzywnych, dla których wyznaczano jednostkową energię cięcia, były: rzodkiew, burak ćwikłowy czy pietruszka korzeniowa (Nadulski, Wawryniuk, 2003).

Figiel, Frontczak (2001) wyznaczali opory i pracę przecinania nasion warzyw strączkowych: bobiku, fasoli, grochu i soi. Przecinali również nasiona zbóż: pszenżyta i kukurydzy. Stwierdzili, iż najwięcej energii wymaga przecięcie nasion grochu i bobiku a najmniej ziaren pszenżyta.

Analizując różnorodność materiałów, dla których określano energochłonność procesu cięcia, należy wspomnieć również o ziarnach zbóż,

których reprezentantami były przede wszystkim ziarna pszenicy i kukurydzy [33, 63, 64, 96, 101].

Ajayi i Clarke (1989) oraz Figiel i Frontczak (2001) przecinając ziarna kukurydzy cukrowej wyznaczali m.in. wpływ wilgotności jej ziaren na siłę i pracę cięcia. Powyższe prace pokazują, że wraz ze wzrostem wilgotności siła i energia cięcia ziaren kukurydzy maleją. Niedziółka, Szymanek, Rybczyński (2002) zauważyli również, że na energochłonność procesu cięcia kukurydzy cukrowej wpływa nie tylko jego wilgotność, ale także położenie na kolbie oraz miejsce, w którym jest ono odcinane od rdzenia kolby. W przypadku ziarna znajdującego się w dolnej części kolby energochłonność procesu cięcia była 23,5-29,2 % wyższa niż dla ziarna z górnej i środkowej części. Odcinanie ziarna w miejscu równym $\frac{2}{3}$ jego długości charakteryzowało się najniższą energią odcinania. Wartość energii odcinania ziarna po rdzeniu kolby była nawet 12-krotnie wyższa niż w stosunku do energii w miejscu równym $\frac{2}{3}$ jego długości. Natomiast odcinanie ziarna przy jego podstawie zwiększało energię odcinania nawet 4-5-krotnie.

W pracy Romańskiego i Stopy (2003) wyznaczano energię potrzebną do dynamicznego ścinania ziarna pszenicy uwzględniając przy tym wiele czynników, a mianowicie: odmianę, masę ziarna, wilgotność, zawartość białka, poziom nawożenia i ułożenie ziarna w stosunku do narzędzia tnącego. Autorzy stwierdzili, że pomiędzy energią potrzebną do dynamicznego ścinania ziarna pszenicy a jego masą występuje bardzo wysoka korelacja i to niezależnie od tego, czy siła ścinająca działa prostopadle czy wzdłuż osi długiej ziarna. Zauważyli również, że poziom nawożenia w sposób istotny wpływa na energochłonność ścinania ziarna i w stosunku do ziarna otrzymanego w wyniku uprawy tradycyjnej jest to wzrost o około 15%. Istotnym stwierdzeniem było również to, że wartość energii jednostkowej dynamicznego ścinania ziarna nie zależy od kierunku działania siły ścinającej oraz, że maksymalne wartości energii występowały podczas ścinania ziarna z przedziału wilgotności 15-17%.

Makaron to kolejny produkt z grupy materiałów spożywczych, które poddawano procesowi cięcia (Oh, Seib, Defoe i Ward, 1983). Autorzy przeanalizowali wpływ różnych czynników takich jak mąka, z której wytworzono makaron, grubość makaronu czy czas po ugotowaniu. Do badań użyli trzech gatunków makaronów pochodzących z Japonii, Korei i Singapuru oraz pięciu, które przygotowano w laboratorium z różnych gatunków mąki i proporcji składników. Maksymalne siła cięcia wzrastała wraz ze wzrostem grubości przecinanego makaronu a malała wraz z czasem, który minął od ugotowania makaronu.

Diakun, Tesmer i Owczarzak (1989) podjęli temat cięcia mięsa mrożonego. Masową i powierzchniową jednostkową energię rozdrabniania uzależnili od grubości odcinanych kawałków i temperatury zamrożenia. Wyniki prac, jak twierdzą autorzy, mogą być pomocne przy obliczaniu mocy napędowej rozdrabniarek.

Dowgiałło w swoich badaniach z 1994, 1996 oraz 2005 przedstawił proces badania oporu cięcia ryb. Stwierdził między innymi, że otrzymane na podstawie przeprowadzonych badań związki funkcyjne dostarczają informacji niezbędnych przy projektowaniu mechanizmów sterujących operacją rozcinania i patroszenia jamy brzusznej śledzi bałtyckich.

Kolejnym materiałem, który poddawano cięciu jest ser. Kamyab i inni, 1998; Atkins i inni, 2004; Goh i inni 2005 oraz Arnold i inni, 2009 w swoich badaniach wyznaczyli siłę i energię cięcia dla różnych gatunków tego materiału. Brown, James i Purnell (2005) przeprowadzili cięcie sera o temperaturach -5°C , $+5^{\circ}\text{C}$ i 15°C . Zauważyli, że wraz ze wzrostem temperatury ciętego materiału następowało zmniejszenie siły cięcia.

Realizowano również proces cięcia takich roślin jak banany (Jakubczyk, Uziak, 2005) czy maniok (Visvanathan, Screenarayanan, Swaminathan, 1996).

2.3. WPLYW PRĘDKOŚCI CIĘCIA NA ENERGOCHŁONNOŚĆ PROCESU

W pracach na temat cięcia materiałów spożywczych, oprócz zmiennych związanych bezpośrednio z ciętym materiałem, oceniano również wpływ parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych na opory i energochłonność procesu. Wpływ zmiennej „prędkość cięcia” jest bardzo często uwzględniany w badaniach cięcia materiałów spożywczych [29].

Twardość i wytrzymałość statyczna większości środków spożywczych jest mała w porównaniu z twardością i wytrzymałością materiałów, z których wykonuje się narzędzia do ich obróbki. Z tych względów nie ma ograniczeń co do szybkości krajania i posuwu materiału obrabianego [17, 89].

Kowalski (1993) stwierdził, iż w badanym zakresie (0-2,2) m/s prędkość nie wpływa istotnie na opór cięcia buraków cukrowych natomiast opór cięcia ziemniaków jest ujemnie skorelowany z prędkością cięcia.

Nadulski i Guz (2001) oraz Nadulski i Wawryniuk (2003) badali jednostkową energię cięcia marchwi, pietruszki korzeniowej, buraka ćwikłowego, selera korzeniowego, ziemniaka oraz rzodkwi, dla zakresu prędkości cięcia (100-500) mm/min. W tym zakresie prędkości cięcia nie stwierdzili jej wpływu na energochłonność procesu poza pietruszką korzeniową. W przypadku korzenia pietruszki stwierdzono najwyższe wartości jednostkowej energii w przypadku cięcia z prędkością 100 mm/min. Natomiast nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic pomiędzy uzyskanymi wartościami przy cięciu korzeni z prędkościami 300 i 500 mm/min.

Z kolei Marks, Krzysztofik, Piech (1985) stwierdzili istotny statystycznie wpływ prędkości noża na kształtowanie się jednostkowego oporu cięcia bulw ziemniaka w zakresie (0,5 – 2) m/s.

Brown, James i Purnell (2005) poddawali cięciu ser Cheddar, mięso wieprzowe i bekon z prędkościami 30 mm/s, 100 mm/s i 250 mm/s. Autorzy zaobserwowali wzrost siły cięcia badanych materiałów wraz ze wzrostem prędkości przecinania próbek.

W badaniach Kowalik, Sykut, Opielak (2005) cięto próbki ziemniaka z prędkościami od 100,7 mm/s do 283,8 mm/s. Do procesu cięcia używano noża o kącie ostrza 10° i dwóch kątów przystawienia noża: 0 i 40° . Autorzy rejestrowali wielkość maksymalnej siły występującej przy przecinaniu próbek. Wyznaczone dla dwóch kątów przystawienia, krzywe zależności pomiędzy prędkością a siłą cięcia, miały charakter krzywych potęgowych. Wraz ze wzrostem prędkości cięcia obserwowano spadek maksymalnej siły występującej przy przecinaniu próbek.

Kowalik, Sykut i Opielak (2005) wyznaczali również wpływ prędkości na jednostkową pracę cięcia dla próbek wycinanych z ziemniaka i buraka ćwikłowego. Z buraka ćwikłowego wycinano próbki w kierunku wzdłużnym i poprzecznym. W badanym zakresie prędkości (100,7 – 283,8) mm/s otrzymane krzywe miały charakter krzywych potęgowych. Różniły się wartościami jednostkowej pracy przecinania dla ciętych materiałów. Wraz ze wzrostem prędkości wartość jednostkowej pracy cięcia warzyw malała.

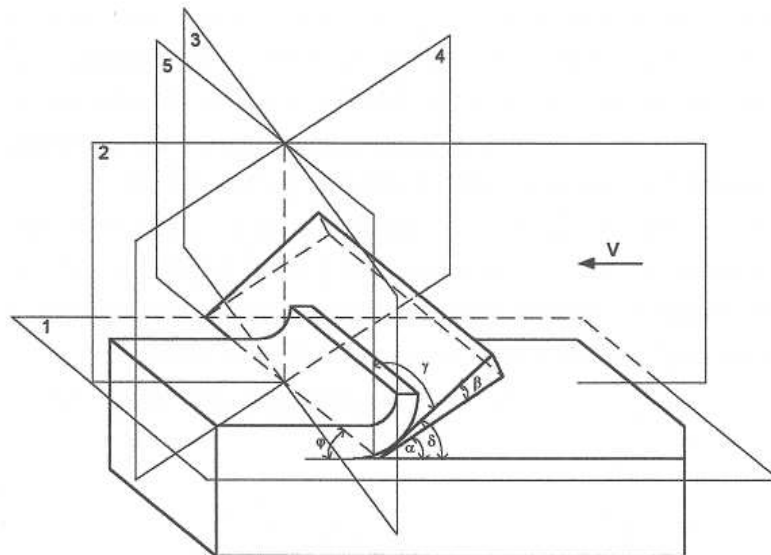
Analiza powyższej literatury pokazuje, iż najczęściej badania prowadzone są w warunkach quasistatycznych, tzn. rozdrabnia się cząstki różnie ukształtowanymi elementami imitującymi elementy robocze maszyn rozdrabniających, w warunkach niewielkich prędkości roboczych. Warunki takie są dalekie od warunków rzeczywistych [73].

2.4. WPLYW GEOMETRII ORAZ USTAWIENIA NARZĘDZIA NA ENERGOCHŁONNOŚĆ PROCESU CIĘCIA

Bardzo istotną rolę w procesie cięcia, a zwłaszcza energochłonności procesu, pełni geometria narzędzia tnącego, jego kształt i ustawienie względem ciętego materiału [29].

Aby ustalić położenie części roboczej narzędzia przyjmuje się dwa układy płaszczyzn odniesienia: ruchowy-kinematyczny, równoległy do kierunku ruchu roboczego oraz siłowy – dynamiczny, prostopadły do głównej krawędzi tnącej [77].

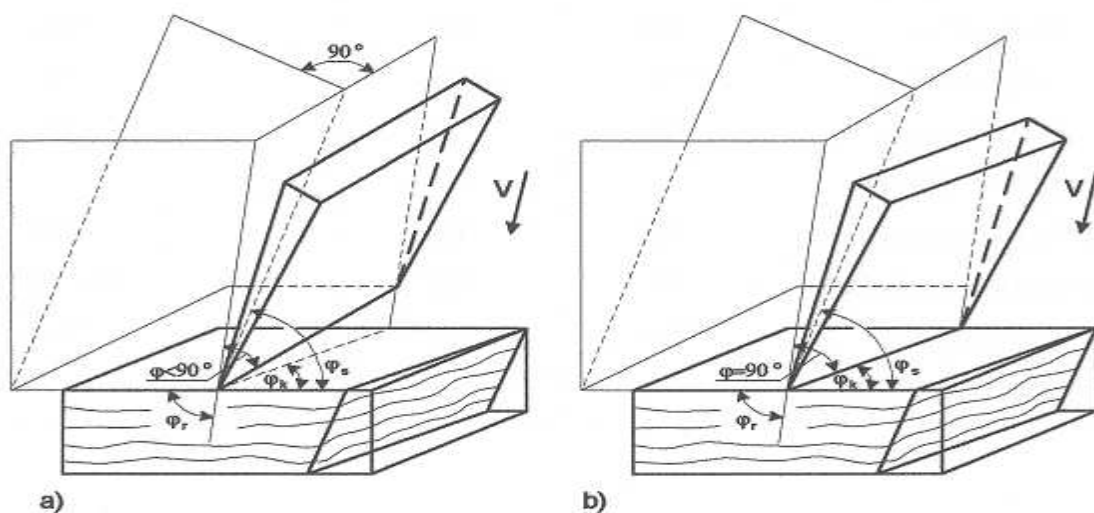
W powyższych układach można również rozpatrywać geometrię ostrza oraz jego położenie względem kierunku ruchu roboczego. Na rysunku 2.4 przedstawione są charakterystyczne kąty położenia ostrza noża prostego: kąt nachylenia głównej krawędzi tnącej φ , kąt przyłożenia α , kąt ostrza β , kąt natarcia γ , kąt krajania δ będący sumą kątów przyłożenia i ostrza.



Rys. 2.4. Płaszczyzny odniesienia i kąty charakteryzujące położenie ostrza noża:
1) płaszczyzna skrawania, 2) płaszczyzna kierunkowa, 3) płaszczyzna czołowa, 4) płaszczyzna normalna, 5) płaszczyzna nożowa, φ) kąt nachylenia głównej krawędzi tnącej, α) kąt przyłożenia, β) kąt ostrza, γ) kąt natarcia, δ) kąt krajania [77]

W układzie narzędzie – przedmiot obrabiany można wyodrębnić następujące płaszczyzny odniesienia: 1 - płaszczyznę skrawania, 2 - płaszczyznę kierunkową, 3 - płaszczyznę czołową, 4 - płaszczyznę normalną, 5 - płaszczyznę nożową.

Ze względu na wysoką anizotropowość produktów spożywczych zarówno opory cięcia jak i przebieg procesu kształtowania się warstwy odciętej i jej struktura zależą w sposób istotny od kątów kierunkowych obróbki. Kąty kierunkowe są to kąty, jakie tworzy kierunek włókien w obrabianym elemencie z kierunkiem ruchu roboczego, krawędzią tnącą noża oraz płaszczyzną cięcia. Na rysunku 2.5 przedstawione zostały kąty kierunkowe w najbardziej ogólnym przypadku cięcia, gdy wszystkie kąty kierunkowe są mniejsze od 90° [77].



Rys. 2.5. Kąty kierunkowe w najbardziej ogólnym przypadku krajania:

a) $\varphi < 90^\circ$, b) $\varphi = 90^\circ$, φ_r - kąt kierunkowy ruchu, φ_k - kąt kierunkowy krawędzi tnącej, φ_s - kąt kierunkowy krajania [77]

Kąt zawarty między kierunkiem ruchu roboczego względnego i kierunkiem włókien określany jest mianem kąta kierunkowego ruchu - φ_r , kąt kierunkowy krawędzi tnącej, czyli kąt zawarty między kierunkiem krawędzi tnącej i kierunkiem włókien określany jest mianem kąta kierunkowego ostrza -

φ_k , natomiast kąt nachylenia kierunku włókien do płaszczyzny cięcia nazwany został kątem kierunkowym krajania - φ_s .

W przemyśle spożywczym możemy wyróżnić siedem przypadków cięcia, z których trzy są przypadkami zasadniczymi, trzy przypadkami pośrednimi oraz jeden przypadek ogólny (tabela 2.2) [77].

Tab. 2.2. Kąty kierunkowe obróbki [77]

Kąty kierunkowe:				Cięcie
ruchu φ_r	składowej ruchu	krajania φ_s	ostrza φ_k	
90°	-	0°	0°	poprzeczne
90°	-	90°	90°	prostopadłe
0°	-	0°	90°	wzdłużne
90°	-	0°	0°	poprzeczno-prostopadłe
90°	-	90°	90°	prostopadło-wzdłużne
0°÷90°	90°	0°	90°	wzdłużno-poprzeczne
90°	90°	90°	90°	poprzeczno-prostopadło-wzdłużne

Do zaistnienia procesu skrawania potrzebne jest dostarczenie odpowiednio dużej energii zapewniającej pokonanie spójności obrabianego materiału. Siła przyłożona przez ostrze narzędzia musi zapewnić pokonanie oporów odkształceń sprężystych, plastycznych i oporów tarcia. Taka siła nosi nazwę siły skrawającej i jest ona równa, co do wartości i zgodna, co do kierunku działania, lecz o zwrocie przeciwnym wypadkowemu oporowi skrawania.

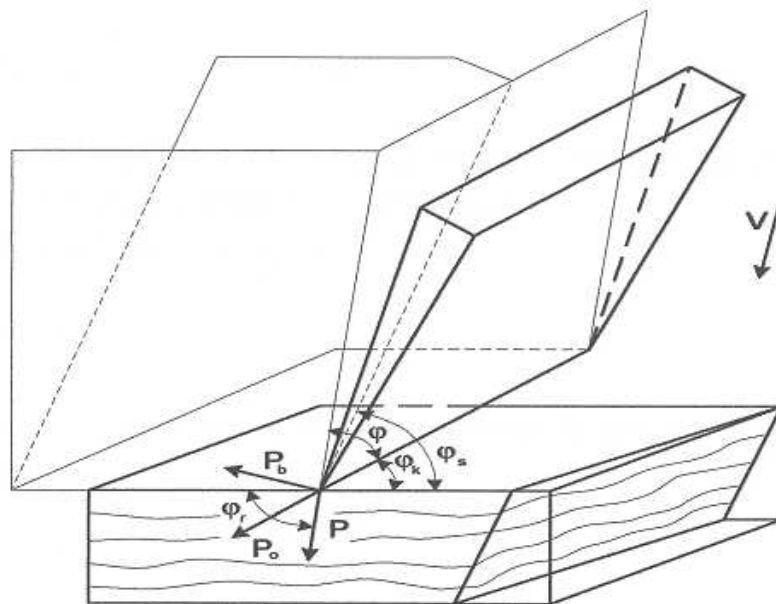
Do podstawowych obliczeń parametrów cięcia wprowadza się tzw. opór właściwy cięcia K ustalony w oparciu o wytrzymałość materiału na ścinanie R_s z uwzględnieniem położenia krawędzi tnącej w stosunku do kierunku włókien.

$$K=c \cdot R_s, \quad [\text{N/m}^2] \quad (2.23)$$

gdzie: c – współczynnik uwzględniający nacisk powierzchni natarcia na cięty materiał oraz wpływ stopnia ostrza; do obliczeń można przyjąć $c = 0,3 \div 1,0$.

Siła skrawająca F posiada w ogólnym przypadku trzy wzajemnie prostopadłe składowe (rysunek 2.6):

- składową P równoległą do kierunku ruchu roboczego, nazywaną siłą skrawania;
- składową P_0 prostopadłą do kierunku ruchu roboczego, leżącą w płaszczyźnie kierunkowej, zwanej siłą oporu;
- składową P_b leżącą w płaszczyźnie skrawania, prostopadłą do kierunku ruchu roboczego, zwaną boczną siłą oporu [77].



Rys. 2.6. Rozkład sił w procesie cięcia: P – siła skrawania, P_0 – siła oporu, P_b – boczna siła oporu; ϕ_r - kąt kierunkowy ruchu, ϕ_k – kąt kierunkowy krawędzi tnącej, ϕ_s – kąt kierunkowy cięcia [77]

Wielkość siły skrawania w procesie cięcia nożem prostym określana jest równaniem:

$$P=K \cdot h, \quad [\text{N}] \quad (2.24)$$

gdzie: h – wielkość zagłębienia noża w cięty materiał, [m].

Wielkość siły oporu określa się w zależności od siły skrawania i określana jest wzorem:

$$P_0=c \cdot P, \quad [\text{N}] \quad (2.25)$$

Znak i wielkość współczynnika c zależy od przypadku cięcia, kątów charakteryzujących, grubości warstwy ciętej oraz stopnia stępienia ostrza.

Całkowita moc cięcia N_k w ogólnym przypadku można określić jako sumę trzech mocy składowych N_p , N_{p0} , i N_{pb} pochodzących od odpowiednich trzech sił składowych P , P_0 i P_b [77].

$$N_k= N_p + N_{p0} + N_{pb}, \quad [\text{kW}] \quad (2.26)$$

Ponieważ składowe N_{p0} oraz N_{pb} w porównaniu ze składową N_p są kilkaset razy mniejsze, a więc praktycznie pomijalne, bez większego błędu wartość N_k można obliczyć ze wzoru:

$$N_k= N_p= \frac{P \cdot v}{612}, \quad [\text{kW}] \quad (2.27)$$

gdzie: v - prędkość skrawania, m/s.

Właściwa praca cięcia powinna być wyznaczona dla obrabianych produktów w ściśle określonych warunkach. Nieuwzględnienie poszczególnych czynników prowadzi do rozbieżności w wartościach właściwej pracy cięcia, a to w konsekwencji prowadzi do ograniczenia zakresu zastosowania wyników badań.

Na wartość właściwego oporu cięcia mają wpływ czynniki, które możemy określić równaniem:

$$K=C_{\varphi} C_r C_w C_t C_{\delta} C_g C_f C_n C_s C_v C_k, \quad [N/m^2] \quad (2.28)$$

gdzie: C_{φ} - wpływ kątów kierunkowych obróbki na wartość K ,

C_r - wpływ rodzaju (gatunku) skrawanego produktu spożywczego,

C_w - wpływ wilgotności produktu,

C_t - wpływ temperatury produktu,

C_{δ} - wpływ kąta skrawania,

C_g - wpływ grubości warstwy skrawanej,

C_f - wpływ tarcia noża o skrawany produkt,

C_n - wpływ nacisku wywieranego na produkt przed nożem,

C_s - wpływ stanu ostrza,

C_v - wpływ prędkości skrawania,

C_k - wpływ wymiaru i kształtu ostrza [77].

Ciekawe wnioski związane z zastosowaniem różnych kątów ostrza narzędzia podczas cięcia ziaren kukurydzy wyciągnęli Figiel i Frontczak (2001). Zauważyli iż wzrost wartości kąta ostrza w zakresie 10-40°, mimo iż powoduje wzrost wartości siły cięcia, sprzyja zmniejszeniu energochłonności procesu. Zauważyli również, że zwiększenie wartości kąta pochylenia krawędzi tnącej w zakresie 0-30° powoduje zmniejszenie wartości siły cięcia oraz zwiększenie wartości prac towarzyszących procesowi przecinania ziarna kukurydzy.

Oceną wpływu kąta ostrza i pochylenia krawędzi tnącej noża na siłę i energię cięcia ziarna kukurydzy cukrowej zajmowali się również Niedziółka, Szymanek, Rybczyński (2003). Stwierdzili, iż wartość siły i energii cięcia zależy od kąta ostrza noża, a w szczególności od kąta pochylenia krawędzi tnącej. Najmniejsze wartości siły i energii cięcia uzyskano podczas ścinania nożem o kącie ostrza równym 20° i kącie pochylenia krawędzi tnącej równym 30° .

Badaniem wpływu kątów ustawienia narzędzia na opory cięcia materiałów takich jak: pietruszka, marchew, jabłka, ziemniaki i buraki zajmowali się Popko i Miszczuk (1989). Podczas badań autorzy wprowadzali zmiany kąta natarcia w zakresie $0-16^\circ$ i kąta przyłożenia noża w zakresie $0-63,4^\circ$. Badania wykazały, że parametry geometryczne ustawienia noża względem przedmiotu krajanego mają istotne znaczenie. Przy właściwym doborze wartości tych kątów można w istotny sposób zmniejszyć energochłonność procesu krajania. Analiza przeprowadzona przez autorów wykazała również, że dla wszystkich krajanych materiałów przebieg zmienności oporów cięcia jest podobny a różnica polega tylko na zmianach ilościowych.

Nadulski i Guz (2001) zaprezentowali wyniki badań cięcia ziemniaków i marchwi oceniając wpływ kątów ostrza i przyłożenia na jednostkową pracę cięcia. Zauważyli, że zwiększanie kątów ostrza podczas krojenia ziemniaka nie zmienia znacząco jednostkowej pracy cięcia. Podczas krojenia korzenia marchwi użycie noża o większym kącie ostrza wyraźnie wpływało na wzrost jednostkowej pracy cięcia. Zwiększanie kąta ostrza z $7,5^\circ$ do 20° powoduje wzrost o około 24% wartości maksymalnej siły cięcia i o około 16% energochłonności procesu. Zmiany wartości jednostkowej pracy cięcia badanych materiałów uzależniono od pozostałych zmiennych tj. prędkości cięcia i kąta ostrza noża. Dla pewnych ustawień w/w zmiennych wzrost kąta przyłożenia powodował wzrost a dla innych spadek jednostkowej pracy cięcia. Zmiany te wynosiły od kilku do nawet 30%.

Nadulski i Wawryniuk (2003) w swoich badaniach cięcia warzyw uzyskali następujące rezultaty. Wzrost kąta ostrza noża z 5° do 20° powoduje wzrost jednostkowej energii cięcia marchwi o około 55%, dla pietruszki o około 160%, dla buraka ćwikłowego o około 67%, dla selera korzeniowego o około 54% natomiast dla rzodkwi o około 28%.

Baran i Marks (2003) w swojej pracy stwierdzili, że jednostkowy opór cięcia bulw ziemniaka jest determinowany w 62,7% przez kąt zaostrenia oraz w 1,7% przez prędkość cięcia.

Zmienne te okazały się mieć również wpływ na siłę i pracę przecinania nasion warzyw zwiększenie wartości kąta pochylenia krawędzi tnącej w zakresie od 15° do 45° powoduje zwiększenie wartości pracy przecinania nasion soi. Wzrost wartości kąta ostrza w zakresie od 10° do 90° powoduje wzrost wartości siły cięcia nasion soi, a także że przecinanie nasion soi nożem o kącie ostrza 20° i pochyleniu krawędzi tnącej 15° jest najmniej energochłonne i przebiega przy najmniejszych wartościach siły cięcia.

Podczas cięcia bulw manioku przez Visvanathan'a, Sreenarayanan'a i Swaminathan'a (1996) określono minimalną energię cięcia dla następujących wartości kątów i prędkości cięcia: kąt ostrza noża od 30° do 45° , kąt ścinania od 63° do 75° , prędkość noża około 2,5 m/s.

Sykut, Kowalik, Opielak (2005) poddawali cięciu próbki wycięte z ziemniaka. Stosowali noże o kątach ostrza: 10° , 20° , 30° i 45° oraz kątach przystawienia 0° i 40° . Wzrost kąta ostrza noża powodował wzrost siły krojenia przy czym zmiana kąta z 10° na 20° powodowała największą zmianę rejestrowanej siły cięcia. Wzrost kąta przystawienia powodował wzrost siły cięcia z wyłączeniem przypadku cięcia nożem o kącie ostrza 10° .

2.5. ENERGOCHŁONNOŚĆ STOSOWANYCH TECHNOLOGII CIĘCIA

Konstrukcja urządzeń do krajania i cięcia musi być przystosowana do charakterystycznych właściwości i wymiarów krojonego materiału. Organem roboczym krajalnic są noże, które mogą wykonywać ruchy obrotowy, postępowy, postępowo-zwrotny, planetarny lub wibracyjny [9, 10, 59].

W literaturze z zakresu cięcia materiałów spożywczych najczęściej mamy do czynienia z cięciem normalnym gilotynowym lub skośnym. Niektórzy badacze przeanalizowali również inne sposoby przecinania tych materiałów.

Kwiecień (1993) przeanalizował warunki pracy noża tarczowego. Przedstawił kinematyczną i dynamiczną analizę procesu cięcia materiału roślinnego nożem tarczowym. Przeprowadził analizę zmienności współczynnika poślizgu w zależności od kąta styku krawędzi tnącej ostrza z materiałem oraz wzajemnych relacji prędkości podawania materiału i prędkości obwodowej noża. Oceniono wpływ tych parametrów na charakter zmienności siły i momentu cięcia wzdłuż czynnego odcinka ostrza.

Dowgiałło (1996) podjął próbę porównania zastosowania różnych technologii cięcia śledzi bałtyckich. Do badań używał noży płaskich i tarczowych. Noże płaskie posiadały różne ostrza krawędzi tnącej. Pierwszy z nich miał ostrze gładkie, a drugi profilowane (owalne nacięcia krawędzi ostrza, nawzajem styczne, o maksymalnej szerokości wcięcia 4 mm i głębokości 3 mm). Poza tym noże płaskie oprócz cięcia gilotynowego wprowadzano również w ruch wibracyjny. Zastosowany nóż tarczowy zastępował nóż taśmowy będący odwzorowaniem noża tarczowego o średnicy zdążającej do nieskończoności. Na podstawie przeprowadzonych badań autor stwierdził, że w przypadku konieczności stosowania w obróbce ryb noży innych niż tarczowe obrotowe, najkorzystniej jest stosować noże taśmowe. Noże takie zapewniają

najpoprawniejszą technologicznie jakość cięcia – nie poszarpana tkanka mięsna – przy najmniejszych spośród stosowanych noży oporach. Jednakże stosowanie tego typu noży komplikuje i rozbudowuje konstrukcję urządzenia. Dlatego też, jak twierdzi autor, praktyczniejsze wydaje się stosowanie noży wibracyjnych – gładkich do ryb o delikatnej tkance kostnej i profilowanych do ryb o tkance kostnej twardej. Zdecydowanie niekorzystne jest stosowanie noży gilotynowych z powodu kilkukrotnie wyższych oporów niż w przypadku pozostałych stosowanych noży.

Kolejnych prób zastosowania w obróbce ryb noży tarczowych dokonali Majewski i Drozdowski (2000). Do badań wykorzystano trzy rodzaje noży tarczowych o jednakowej średnicy. Noże różniły się ostrzami: gładkim, ząbkowanym i profilowanym (owalne nacięcia krawędzi ostrza, nawzajem styczne, o maksymalnej szerokości wcięcia 4 mm i głębokości 3 mm). Dla każdego noża zmieniano prędkość cięcia w zakresie od 1 mm/s do 20 m/s. Po tym etapie badań dobrano optymalny nóż oraz prędkość cięcia a następnie przeprowadzono drugo etap badań, po którym zoptymalizowano prędkość posuwu. Ostatecznie do badań właściwych wybrano nóż profilowany. Zastosowana prędkość cięcia wynosiła 5 m/s a posuw zmieniano w zakresie od 1 mm/s do 10 mm/s. Na podstawie badań stwierdzono, że najmniejsze opory cięcia oraz poprawa jego jakości (brak poszarpanej tkanki) uzyskano przy zastosowaniu profilowanego noża tarczowego przy prędkości cięcia 5 m/s i posuwie 5 mm/s.

W 2002 roku Dowgiałło podjął próbę doświadczalnej weryfikacji teorii mikroostrzy opracowanej przez Iwaszkę (1958). W swojej analizie Iwaszko rozważa wpływ mikronierówności ostrza, wynikających z odstępstw jego profilu teoretycznego od rzeczywistego, na siły występujące w układzie „nóż – surowiec”. Stwierdza, że siła cięcia skośnego, charakteryzowanego kątem α z przedziału ($30^\circ \div 90^\circ$), może być 6-7 mniejsza niż normalnego, chociaż długość linii jego cięcia jest większa. Twierdzi również, że nie każde cięcie, w którym występują prędkości normalna i styczna jest cięciem ślizgowym. Cięcie ślizgowe

występuje tylko wówczas, gdy w czasie t zagłębieniu ostrza bez rozcięcia materiału w kierunku normalnym na głębokość nie większą niż średnia wysokość mikroostrzy towarzyszy jego przemieszczenie w kierunku stycznym o odcinek równy ich podstawie. W takim przypadku siłą normalna powoduje wyłącznie ugięcie materiału, a styczna – jego cięcie. Dowgiało zweryfikował doświadczalnie te teorie i stwierdził, że żadne z przedstawionych przez Iwaszkę twierdzeń nie znalazło potwierdzenia w wynikach przeprowadzonych doświadczeń.

Mając na uwadze stosowanie innych niż cięcie normalne gilotynowe technologii cięcia materiałów spożywczych należy również wspomnieć o cięciu drutem. Materiałem, dla którego realizowano taki sposób cięcia był zazwyczaj ser. Technologię tą przeanalizowali Goh, Charalambides i Williams (2005). W swoim artykule zaprezentowali rezultaty połączenia eksperymentu, teorii i numerycznej symulacji. Eksperyment prowadzono dla dwóch gatunków sera: Mild Cheddar i Gruyere z trzema prędkościami cięcia: 5, 50 i 500 mm/min. Materiał przecinano żyłkami (drutem) o średnicach: 0,25; 0,5; 0,89; 1,6 oraz 2 mm. Przetawione przez autorów wyniki badań i symulacji numerycznych pokazują wzrost energochłonności cięcia serów wraz ze wzrostem średnicy żyłki zastosowanej do przecinania sera. Wzrost energochłonności następował również w miarę wzrostu prędkości cięcia. Zaprezentowano również wpływ średnicy zastosowanego drutu na jakość powierzchni przeciętego materiału. Zwiększanie średnicy drutu powodowało pogarszanie jakości uzyskiwanej powierzchni. Uzyskane przez autorów symulacje numeryczne były porównywalne z wynikami eksperymentów praktycznych.

Technologią cięcia sera przy pomocy drutu zajmowali się także Kamyab, Chakrabarti, Williams (1998). Proces cięcia drutem realizowali dla sześciu gatunków sera z prędkością 10 mm/min. Używane do cięcia narzędzia miały średnice: 50, 125, 240, 420, 560, 760 i 980 μm . Każdorazowo wzrost średnicy użytych do przecinania narzędzi powodował wzrost energochłonności procesu

ciecia. Energochłonność definiowana była jako iloraz siły przecinania do szerokości próbki.

Atkins, Xu i Jeronimidis (2004) zaprezentowali wyniki badań, podczas których realizowali przecinanie sera w inny niż opisywane dotychczas sposoby. Narzędzie podczas pracy realizowało dwa rodzaje ruchu. Pierwszy polegał na przemieszczaniu noża prostopadle do krawędzi tnącej, natomiast drugi ruch odbywał się w kierunku równoległym do krawędzi tnącej noża. Materiałem użytym do badań były dwa gatunki sera: cheddar i salami. Siła niezbędna do przecięcia materiału była mniejsza niż podczas cięcia normalnego.

Kolejną technologią cięcia materiałów spożywczych było cięcie ultrasoniczne. Rezultaty prac z zastosowaniem tej technologii przedstawili Arnold, Leiteritz, Zan i Rohm (2009). Materiałem poddawany cięciu ultrasonicznemu było 8 gatunków sera. Cięcie następowało w kierunku pionowym z jednoczesnym poziomym ruchem posuwisto-zwrotnym noża z częstotliwością 40kHz. Amplituda drgań wynosiła 0, 6, 12 lub 18 μm . Prędkość cięcia w kierunku pionowym wynosił 1000, 1500, 2000 lub 2500 mm/min. Wyniki badań porównano z wynikami cięcia tylko w kierunku pionowym (cięcie normalne, gilotynowe). Podczas cięcia normalnego krzywa cięcia przebiegała charakterystycznie dla homogenicznych, wiskoelastycznych ciał. Wraz z zagłębieniem się narzędzia w materiał siła cięcia rosła. Po zastosowaniu cięcia ultrasonicznego siła cięcia rosła podobnie jak podczas cięcia gilotynowego ale tylko do około 3 mm zagłębienia się noża w materiał. Dalej wzrost siły następował w niewielkim stopniu lub pozostawał na niezmiennym poziomie.

3. PROCESY TARCIA I SMAROWANIA

Cięcie środków spożywczych jest procesem bardzo skomplikowanym. Ruch roboczy narzędzia tnącego sprowadza się do wywarcia nacisku na obrabianą powierzchnię. Nacisk krawędzi tnącej narzędzia powoduje na początku zgniecenie materiału, następnie jego przecięcie, oddzielenie ciętej części, odchylenie od powierzchni natarcia noża oraz odkształcenie. Opory cięcia wynikają więc głównie z właściwości mechanicznych ciętego materiału oraz tarcia produktu o narzędzie [17].

Tarcie jest zespołem procesów i zjawisk fizycznych zachodzących w obszarze stykających się ze sobą powierzchni ciał znajdujących się w ruchu względnym lub będących pod działaniem układu sił czynnych dążących do wywołania tego przemieszczenia. Przejawia się oporem względnego przemieszczania się tych ciał w kierunku stycznym do powierzchni styku [38, 50, 97, 103].

Istnieje wiele klasyfikacji rodzajów tarcia. Jedną z nich przedstawiono w tabeli 3.1.

Tab. 3.1. Klasyfikacja rodzajów tarcia elementów maszyn [50]

Kryterium klasyfikacji	Rodzaje tarcia
Występowanie ruchu względnego	Statyczne
	Kinetyczne
Charakter ruchu	Ślizgowe
	Toczne
	Krętne (wiertne) – odmiana tarcia ślizgowego
Rodzaj smarowania	Suche
	Graniczne
	Mieszane
	Płynne

Przy cięciu czy krajaniu produktów spożywczych występuje zjawisko tarcia powierzchniowego. Zależy ono od fizycznych właściwości krajanych produktów spożywczych, tj. od własności strukturowo-mechanicznych, do których zaliczamy sprężystość, elastyczność, plastyczność, lepkość,

wytrzymałość i inne [17]. Tarcie powierzchniowe występujące podczas cięcia środków spożywczych zależy również od materiału, z którego wykonano narzędzie tnące oraz charakterystyki powierzchni narzędzia mającej kontakt z obrabianym przedmiotem.

Szacuje się, że około 35% energii produkowanej na świecie jest tracona z powodu istnienia tarcia. Część tej energii zostaje zamieniona na ciepło, powodując wzrost temperatury współpracujących elementów [97].

Ze względu na małą twardość i wytrzymałość ciętych materiałów w porównaniu z twardością i wytrzymałością elementów roboczych krajalnic, nie ma obawy o nadmierne zużywanie się ostrzy w wyniku obciążenia cieplnego w procesie obróbki. Ilość wydzielanego ciepła jest niewielka, bowiem uzależniona jest ona od oporów i prędkości krajania.

Niektóre środki 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) [17].

Do najważniejszych zjawisk zachodzących w strefie kontaktu ciała stałe – - ciała stałe należą: adhezja, szczepienie, powstawanie zrostów tarciovych oraz mechaniczne oddziaływanie nierówności powierzchni ciał będących w ruchu względnym [97].

Adhezja polega na szczepianiu się mikroobszarów powierzchni współpracujących ciał w wyniku oddziaływania fizycznego zachodzącego pomiędzy cząsteczkami tych obszarów (działanie sił międzycząsteczkowych). Proces ten powstaje w wyniku wzajemnego oddziaływania powierzchniowych pól sił stykających się ciał. Zjawisku temu mogą podlegać zarówno ciała stałe jak i ciecze [50, 91, 97].

W przypadku styku ciał metalicznych największą skłonność do adhezji wykazują czyste metale, mniejszą – stopy jednofazowe, a najmniejszą – stopy wielofazowe. Obecność warstwy tlenków na powierzchni ciał metalicznych

znacząco obniża ich oddziaływanie adhezyjne (tworzą one wiązania jonowe) gdyż tłumi fale elektrodynamiczne.

Na wartość przyciągania adhezyjnego wpływa budowa stykających się ciał, natura sił powierzchniowych, właściwości mechaniczne powierzchni, rodzaj styku, struktura geometryczna powierzchni, obciążenie styku oraz występowanie i rodzaj błonek powierzchniowych utworzonych przez zaadsorbowane z otoczenia cząstki gazów, cieczy, drobin ciał stałych [97].

Szczepianie jest procesem trwałego bezdyfuzyjnego połączenia stykających się mikroobszarów powierzchni współpracujących w warunkach tarcia ciał na pierwotnej granicy ich rozdziału w wyniku wiązania chemicznego. Szczepianie ciał metalicznych następuje na skutek wiązania metalicznego. Proces powstawania szczepień ciał metalicznych można przedstawić następująco: w pierwszej fazie następuje usunięcie z obszaru styku zaabsorbowanych do metalu cząstek gazów, cieczy i zanieczyszczeń; następnie usunięta zostaje warstwa tlenków. Tak przygotowane mikroobszary współpracujących powierzchni ulegają szczepieniu [50].

Zrastanie tarciove to zjawisko polegające na trwałym połączeniu mikroobszarów powierzchni współpracujących w warunkach tarcia ciał w wyniku dyfuzji atomów przynajmniej jednego ciała przez pierwotną granicę rozdziału ciał. Zrastanie tarciove występuje przy dużych odkształceniach plastycznych oraz w wysokiej temperaturze mikroobszarów powierzchni współpracujących ciał [50].

W przemyśle maszynowym czy obróbce skrawaniem, często stosowaną metodą zmniejszania tarcia i adhezji jest nakładanie powłok na narzędzia skrawające lub powierzchnie stykającej się pary ciernej.

Powłoka jest to nałożona z innego materiału na powierzchnię zewnętrzną elementu maszyny warstwa wierzchnia w celu optymalizowania własności eksploatacyjnych tego elementu [38, 48].

Nakładanie powłok to jedna z metod obróbki powierzchniowej czyli świadomego oddziaływania różnymi metodami na powierzchnię materiału o określonej warstwie wierzchniej [62].

Metody obróbki powierzchniowej można podzielić na trzy grupy w zależności od sposobu zmiany charakteru i właściwości istniejącej przed obróbką warstwy wierzchniej materiału (tabela 3.2) [62, 75].

Tab. 3.2. Klasyfikacja metod obróbki powierzchniowej [62]

Metody wytwarzania warstw powierzchniowych		
Warstwy wierzchnie		Powłoki
Ubytkowa	Bezubytkowa	Dodawanie substancji z zewnątrz
Odłuszczenie - chemiczne - elektrochemiczne Trawienie - chemiczne - elektrochemiczne Polerownie chemiczne Obróbka ścierna - docieranie - gładzenie - dogładzanie oscylacyjne - obróbka strumieniowo-ścierna - obróbka luźnymi kształtkami ściernymi - polerowanie mechaniczne	Dogniatanie - rolowanie - dogniatanie diamentem - przepychanie - śrutowanie - kulowanie - młotkowanie Hartowanie - indukcyjne - płomieniowe - laserowe - elektronowe	Galwanotechnika - osadzanie elektrolityczne - osadzanie chemiczne - osadzanie konwersyjne Nasywanie dyfuzyjne - nie wspomagane (proszkowe, kąpielowe, gazowe) - wspomagane (CVD, PVD) Stopowanie - laserowe - elektronowe - plazmowe Natryskiwanie cieplne - gazowe - płomieniowe - łukowe - plazmowe Metalizowanie zanurzeniowe - ciągłe - indywidualne Osadzanie par - naparowywanie - rozpylanie jonowe Malowanie Platerowanie

Odpowiednio dobrana i wykonana warstwa powierzchniowa umożliwia:

- zastąpienie drogich materiałów tańszymi o gorszych właściwościach użytkowych,
- zwiększenie niezawodności,
- zmniejszenie awaryjności narzędzi, części maszyn i urządzeń,

- zmniejszenie częstotliwości remontów i wymiany zużytych elementów,
- zmniejszenie strat w gospodarce spowodowanych korozją stopów żelaza,
- zmniejszenie zanieczyszczenia środowiska naturalnego w wyniku zastąpienia energochłonnych technologii wytwarzania technologiami oszczędnymi i ekologicznymi,
- zmniejszenie oporów tarcia powierzchni współpracujących, co wiąże się z oszczędnością energii i zmniejszeniem strat spowodowanych nadmiernym zużywaniem się elementów pracujących [48, 62].

Jedną z najwcześniej stosowanych powłok jest warstwa azotku tytanu (TiN). Jak pisze Staśkiewicz (2010), od momentu pierwszego użycia narzędzi pokrytych warstwą TiN minął już okres jednego pokolenia. Powłoka ta stanowi pierwowzór całej, stosowanej obecnie rodziny twardych pokryć.

Podstawowe cechy warstw azotku tytanu, które zdecydowały o jego sukcesie to [81, 85]:

- bardzo duża twardość,
- odporność na ścieranie,
- odporność na korozję,
- mały współczynnik tarcia,
- gorsze od stali przewodnictwo cieplne,
- złoty kolor,
- niewielka grubość (stosuje się warstwy o grubościach w zakresie od kilkudziesiętnych części mikrometra do kilku mikrometrów, co nie stwarza zwykle problemów w tolerancji wymiarów).

Nie bez znaczenia są również właściwości chemiczne TiN:

- proces utleniania staje się widoczny po godzinie jeśli, warstwa znajduje się w atmosferze silnie utleniającej w temperaturze 550°C,
- nie reaguje z H₂, N₂, CO,
- jest obojętny wobec HCl, HNO₃, H₂SO₄.

Jednak warstwy TiN:

- rozkładają się w wrzących roztworach alkalicznych,

- NO oraz O₂ działają na nie szybko utleniająco w temperaturach wyższych od 1200°C.

Pokrycia warstwami TiN wykorzystuje się głównie w takich sytuacjach gdzie istnieją problemy z:

- tarcie,
- erozją,
- korozją,
- zużyciem ściernym i adhezyjnym.

Istotne znaczenie ma też wykorzystanie warstw TiN jako pokryć dekoracyjnych.

Zastosowanie warstw TiN do narzędzi skrawających spełnia następujące role:

- redukuje siły tarcia prowadząc do lepszego przepływu wióra,
- zmniejsza zjawisko przypawania obrabianego materiału (narosty) do ostrza,
- zmniejsza zużycie kraterowe ostrza,
- osłabia mechanizmy mikropęknięć ostrza,
- działa jako bariera cieplna, której zadaniem jest odprowadzanie ciepła, wytworzonego w trakcie obróbki, do wióra - chroni zatem ostrze przed przegrzaniem, a w konsekwencji przed odpuszczeniem.

W wyniku pokrycia warstwą TiN otrzymujemy:

- wzrost trwałości narzędzia,
- możliwość szybszego skrawania,
- lepszą jakość obrabianych powierzchni.

W celu zmniejszenia tarcia pomiędzy współpracującymi powierzchniami stosuje się również powłoki polimerowe, spośród których największe zastosowanie znalazły: teflon (policzterofluoroetylen) oraz poliamidy (nylon).

Teflon charakteryzuje się najmniejszą wartością współczynnika tarcia z dotychczas znanych materiałów, brakiem zjawiska „stick-slip” podczas tarcia, obojętnością chemiczną, niewrażliwością na działanie agresywnego środowiska

oraz możliwością pracy w stosunkowo wysokich temperaturach (do 300°C). Teflon odznacza się jednak małą odpornością na zużycie dlatego wzmacnia się go włóknem szklanym, metalowym, azbestowym lub innym oraz tworzy się mieszaniny z polimerami o dużej wytrzymałości mechanicznej.

Zarówno powłoki TiN jak i powłoki polimerowe są wciąż obiektem zainteresowania badaczy na całym świecie.

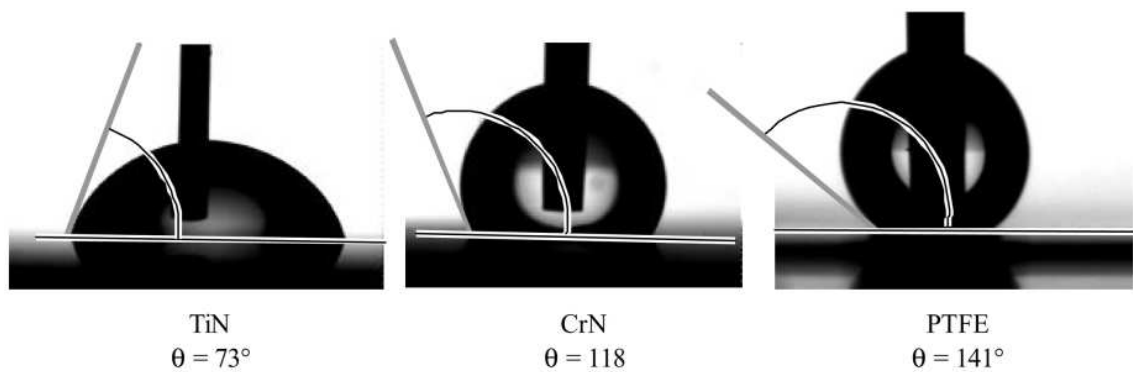
Su Y. L., Yao S. H., Wu C. T. (1996), zaprezentowali wyniki badań trybologicznych powłok TiN porównując je z właściwościami powłok CrN.

Ichimura i Rodrigo (2000), przedstawili wyniki badań adhezji powłok TiN uzyskanych na różnych podłożach metodami PACVD i katodowego odparowania łukowego.

Stallard J., Poulat S., Teer D. G. (2006), badali właściwości powłok TiN nanoszonych na podłoża ze stali i stopu tytanu. Przeprowadzony test rysy posłużył do oceny przyczepności (adhezji) powłoki do podłoża.

Wpływ obciążenia, prędkości ślizgania i temperatury na tarcie polimerów: PTFE, PFCE, PVC, PVDC, PE, PMMA, PC, nylon, pokazują Myshkin N. K., Petrokovets M. I., Kovalev A. V. (2005). Prezentują charakterystykę i właściwości tych powłok.

Lugscheider E., Bobzin K. (2001), przeprowadzili badania swobodnej energii powierzchniowej i kąta zwilżania świadczącego o właściwościach adhezyjnych badanych powłok. Na rysunku 3.1 przedstawiono kąt zwilżania dla trzech badanych powłok, z których największą adhezją charakteryzuje się powłoka TiN a najmniejszą powłoka PTFE.



Rys. 3.1. Kropla wody i kąt zwilżania dla powłok: TiN, CrN i PTFE [55]

Bardzo liczna literatura naukowa, z której przytoczono tylko przykłady prowadzonych badań, nie zawiera informacji na temat potencjalnego wykorzystania powłok TiN oraz PTFE na narzędzia tnące materiałów spożywczych.

Inną znaną i często stosowaną w technice metodą zmniejszania tarcia jest przekształcenie tarcia suchego w tarcie płynne lub mieszane nazywane smarowaniem [50].

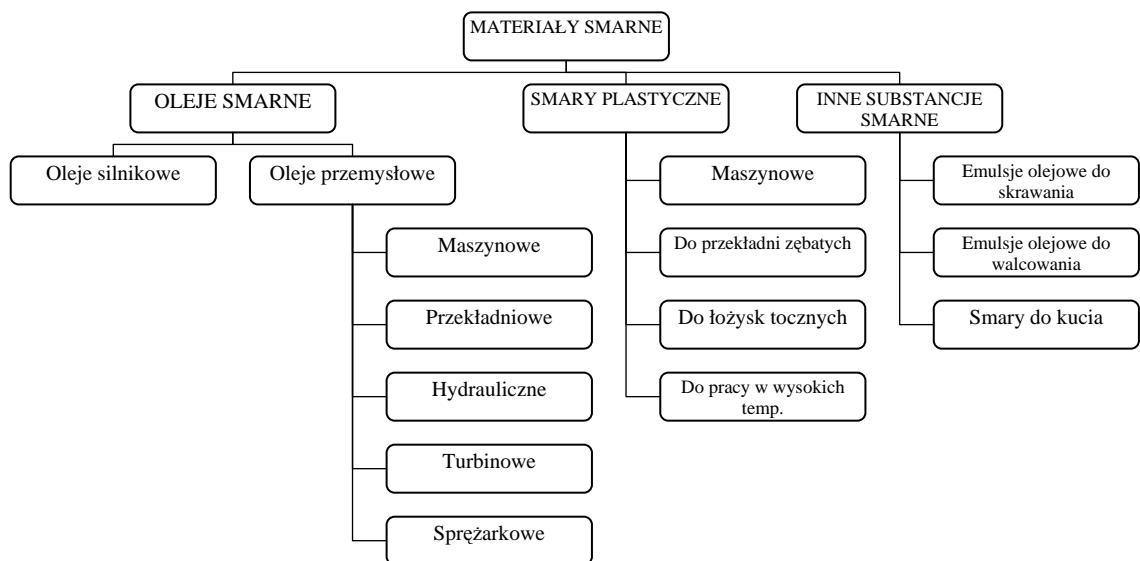
Smarowanie jest celowym wprowadzeniem czynnika smarującego między współpracujące powierzchnie elementów maszyn w celu zapewnienia odpowiedniego poziomu ich trwałości, niezawodności, efektywności, bezpieczeństwa działania i zmniejszenia oporów ruchu. Opory tarcia występującego pomiędzy współpracującymi elementami maszyn można zmniejszyć poprzez wprowadzenie pomiędzy współpracujące powierzchnie tych elementów substancji o małych oporach tarcia wewnętrznego i zastąpienie tarcia zewnętrznego ciał stałych tarcie wewnętrznym w czynniku smarującym [97,102].

Substancje spełniające tę rolę nazywane są substancjami smarnymi lub po prostu smarami, które mogą występować w postaci: gazowej, ciekłej, plastycznej i stałej [97].

Do podstawowych celów smarowania elementów maszyn zalicza się [97]:

- zmniejszenie oporów tarcia,
- ograniczenie intensywności zużywania się elementów maszyn,
- odprowadzenie ciepła ze strefy tarcia,
- odprowadzenie produktów zużycia,
- tłumienie drgań,
- przeciwdziałanie korozji elementów maszyn.

Klasyfikacje środków i materiałów smarnych przedstawiono na schemacie (rysunek 3.2) i w tabeli 3.3.



Rys. 3.2. Podział materiałów smarnych ze względu na ich zastosowanie [97]

Tab. 3.3. Klasyfikacja środków smarnych według kryterium ich głównych cech fizykochemicznych [97]

Gazowe	Ciekłe	Plastyczne	Stałe
- powietrze - azot - dwutlenek węgla - inne	- oleje pochodzenia mineralnego (z ropy naftowej) - oleje pochodzenia syntetycznego - oleje pochodzenia zwierzęcego i roślinnego - inne	- kompozycje olejów mineralnych i mydeł - oleje mineralne lub syntetyczne z zagęszczeniem syntetycznym, - inne	- materiały krystaliczne lub bezpostaciowe jak: grafit, dwusiarczek molibdenu, itp.

Uzyskiwane dzięki zastosowaniu środków smarnych **tarcie płynne** to tarcie ciał, których powierzchnie w strefie styku są oddzielone warstwą substancji płynnej, ciekłej lub gazowej o ciśnieniu równoważącym siły normalne wzajemnego nacisku ciał.

Tarcie graniczne natomiast to tarcie ciał, których powierzchnie w strefie styku są oddzielone warstwą substancji smarnej o najmniejszej grubości, zależnej od właściwości reologicznych i przyczepności substancji smarnej do powierzchni ciał trących.

Tarcie mieszane to tarcie ruchowe, przy którym w strefie styku ciał występują zjawiska charakterystyczne dla co najmniej dwóch z następujących rodzajów tarcia: tarcia suchego, technicznie suchego, granicznego lub płynnego [103].

Właściwością charakteryzującą substancje smarne jest **smarność**. Jest to zdolność substancji do tworzenia na powierzchni elementów maszyn trwałej warstwy granicznej czynnika smarującego w wyniku adhezyjnych właściwości cząsteczek smaru do powierzchni metalowych. Materiały smarne posiadają w swym składzie cząsteczki w postaci łańcuchów, w których jeden z końców jest aktywny elektrostatycznie, przez co mają one polarne właściwości. Polane cząsteczki smaru przylegając aktywnymi końcami do powierzchni elementów

tworzą warstwę ochronną, która do określonego obciążenia nie dopuszcza do bezpośredniego kontaktu elementów maszyn [19, 102, 104].

Smarność charakteryzuje oddziaływanie substancji smarnej na elementy maszyn w warunkach smarowania granicznego. Miarą smarności jest trwałość warstwy granicznej określana zazwyczaj metodami pośrednimi, przez: pomiar współczynnika tarcia, oporów tarcia, obciążenia zacierającego lub stopnia zużycia elementów trących w ściśle określonych warunkach [19, 50, 97].

W celu poprawy właściwości smarnościowych środków smarnych stosuje się dodatki smarne. Są to zazwyczaj związki chemiczne o budowie przeważnie polarnej, dodawane do oleju w ilości stanowiącej do kilku procent masy oleju, zwiększające trwałość filmu olejowego. Ułatwiają one powstawanie na powierzchni smarowanego elementu trwałej warstwy oleju (warstwy granicznej). Warstwy te dzięki swoistym właściwościom chronią smarowane powierzchnie przed zużyciem i zatarciem oraz zmniejszają opory ruchu. Dodatki smarne są zazwyczaj organicznymi związkami siarkowymi (np. siarkowane oleje roślinne, siarkowane estry kwasów tłuszczowych, dwusiarczki dwubenzylu, dwusiarczki molibdenu), związkami chlorowymi (np. chloroparafina, chlorowane terpeny, woski, żywice, tłuszcze, estry), fosforowymi (np. alkilofosforany, fosforyny trójkretylu i trójfenyłu) oraz siarkowo-chlorowymi, chlorofosforowymi, siarkofosforowymi [97].

Literatura z zakresu tribologii podaje także, że zużycie oraz opory tarcia obniżają kwasy tłuszczowe, zwiększając bardzo nieznacznie własności przeciwzatarciowe oleju [50].

Rogoś, Grądkowski i Urbański (2001) przebadali właściwości smarne olejów roślinnych i zestawili je z właściwościami mineralnego oleju maszynowego. Wykazali, że oleje roślinne charakteryzują się lepszymi od produktu mineralnego właściwościami smarnymi. Zauważono również, że surowe oleje roślinne w porównaniu z rafinowanymi wykazują lepsze właściwości przeciwzużyciowe i przeciwzatarciowe [79].

Produkcja żywności jest charakterystycznym rodzajem produkcji, w którym ogromne znaczenie mają zastosowane do konstrukcji maszyn i urządzeń materiały. Wymagania zawarte w dyrektywie Unii Europejskiej 89/392/EEC oraz w normie PN-EN 1672-2, mówią między innymi, że oleje i smary nie mogą przenikać lub stykać się z żywnością. Dozwolone jest stosowanie smarów jadalnych (np. olej rzepakowy) w miejscach, gdzie istnieje potencjalna możliwość zanieczyszczenia produktu (np. przy smarowaniu torów ruchowych przenośników hakowych w ubojniach trzody) [19, 105].

Przegląd literatury naukowej z zakresu tribologii oraz cięcia materiałów spożywczych wykazał brak doniesień na temat stosowania środków smarnych na narzędziach tnących stosowanych w przetwórstwie spożywczym.

4. TEZY, CEL I ZAKRES BADAŃ

Procesy cięcia, występujące powszechnie nie tylko w przetwórstwie spożywczym, charakteryzują się bardzo dużą energochłonnością. Zależy ona od wielu czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych maszyn oraz narzędzi rozdrabniających. Wpływ na energochłonność procesu mają również właściwości rozdrabnianych materiałów.

Aktualnie realizowane w przetwórstwie spożywczym technologie cięcia mają za zadanie obniżyć energochłonność procesu przy zachowaniu odpowiedniej jakości otrzymywanego produktu. Analiza literatury naukowej pokazała, że badania nad cięciem materiałów spożywczych różnymi technologiami skupiają się głównie na ocenie energochłonności procesu realizowanego nożem tarczowym, nożem wibracyjnym, narzędziem o profilowanej krawędzi tnącej czy też energochłonności cięcia ultrasonicznego. Prowadzone są również badania nad oporami cięcia serów drutem.

Energochłonność cięcia rozumiana jako praca niezbędna do zrealizowania procesu związana jest również z tarciem występującym pomiędzy narzędziem rozdrabniającym a ciętym materiałem. Analiza stanu wiedzy wykazała, że prace nad zmniejszaniem energochłonności poprzez zmniejszanie tarcia polegały głównie na zmianach kształtu lub ustawienia narzędzia czy też zastosowaniu wymienionych powyżej technologii.

W przemyśle maszynowym a także obróbce skrawaniem, zmniejszanie oporów wynikających z tarcia współpracujących elementów maszyn lub narzędzia i obrabianego przedmiotu realizowane jest między innymi poprzez stosowanie powłok o małym współczynniku tarcia czy wprowadzanie środka smarnego pomiędzy współpracującą parę cierną.

Brak doniesień literatury naukowej na temat prób zmniejszania energochłonności procesu cięcia produktów spożywczych poprzez stosowanie powłok na narzędziach tnących czy też ich smarowania był pretekstem do podjęcia tematu rozprawy i sformułowania następujących tez badawczych:

- **Jednostkowa energochłonność procesu cięcia wybranych produktów spożywczych, nożami pokrytymi powłokami TiN oraz AS48 różni się istotnie od jednostkowej energochłonności procesu cięcia nożem ze stali NC6,**
- **Smarowanie narzędzia tnącego podczas cięcia wybranych produktów spożywczych, powoduje istotną zmianę jednostkowej energochłonności procesu,**
- **Jednostkowa energochłonność procesu cięcia drutem wybranych produktów spożywczych, różni się istotnie od jednostkowej energochłonności procesu cięcia nożem ze stali NC6.**

Celem rozprawy była weryfikacja postawionych tez poprzez przeprowadzenie badań doświadczalnych procesu cięcia wybranych produktów spożywczych nożem ze stali NC6 a także zaproponowanymi technologiami.

Celem naukowym było opracowanie matematycznego opisu zależności pomiędzy wielkościami wejściowymi a jednostkową energochłonnością procesu cięcia zaproponowanymi technologiami a także wyznaczenie wartości różnic energochłonności wynikających z ich stosowania.

Zakres pracy obejmował:

- analizę literatury dotyczącej cięcia materiałów spożywczych,
- opracowanie metodyki badań,
- wykonanie narzędzi oraz układu do smarowania narzędzia,
- wykonanie badań smarności oraz dobór środka smarnego,
- przeprowadzenie badań doświadczalnych,
- analiza i opracowanie wyników badań.

5. METODYKA

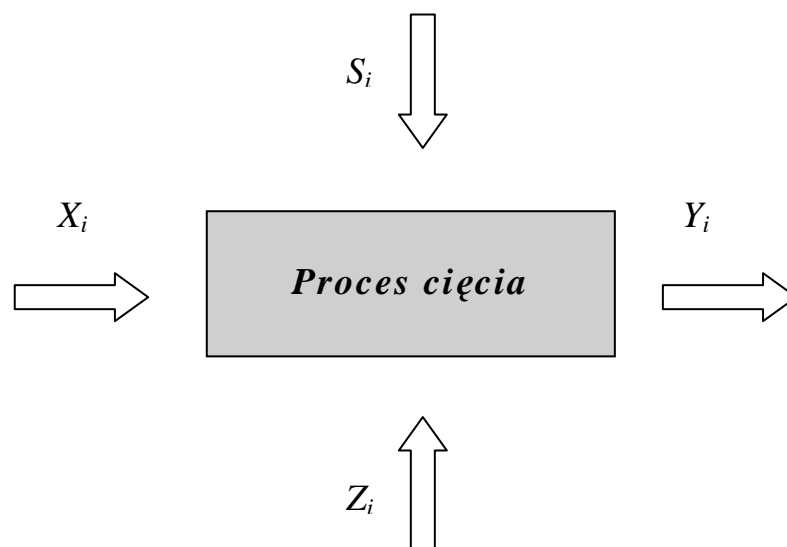
5.1. MODEL PROCESU CIĘCIA

Energochłonność procesu cięcia materiałów spożywczych zależy od wielu czynników, które możemy ująć w dwóch grupach. Pierwsza grupa to czynniki związane z ciętym materiałem takie jak: właściwości wytrzymałościowe materiału, anizotropia budowy, wilgotność, współczynnik tarcia zewnętrznego, itp. Druga grupa to parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne związane z narzędziem i maszyną tnącą takie jak: kąty przyłożenia, ostrza, natarcia i pochylenia krawędzi tnącej, prędkość cięcia, grubość odcinanej warstwy.

Na energochłonność procesu materiałów spożywczych wpływa również zastosowana technologia cięcia o czym świadczą podejmowane przez autorów innych prac tematy badawcze [3, 4, 22, 23, 25, 49, 82, 83, 98].

Aby ocenić wpływ technologii cięcia na energochłonność procesu przeprowadzono badania według takiego samego planu badań dla każdej zastosowanej technologii.

Schemat modelu badań został przedstawiony na rysunku 5.1.



Rys. 5.1. Schemat modelu badań: X_i – wielkości wejściowe (zmiennie niezależne), Y_i – wielkości wyjściowe (zmiennie zależne), Z_i – wielkości zakłócające, S_i – wielkości stałe

W modelu przedstawionym na rysunku 5.1. jako wielkości wejściowe (zmiennie niezależne) przyjęto:

- $X_1 - \beta$ - kąt ostrza noża,
- $X_2 - V$ - prędkość cięcia.

W przypadku prowadzenia procesu cięcia drutem, zmienna X_1 nie była uwzględniana. Badania prowadzono tylko dla jednej zmiennej zależnej – prędkości cięcia.

Wielkości wyjściowe (zmiennie zależne) stanowiły:

wyznaczane bezpośrednio:

- $Y_1 - F$ - siła cięcia,

wyznaczane pośrednio:

- $Y_2 - e_j$ - jednostkowa energochłonność cięcia.

Jako wielkości stałe przyjęto:

- $C_1 - W$ - wilgotność materiału,
- $C_2 - O$ - odmiana (gatunek) materiału,
- $C_3 - g$ - grubość warstwy odcinanej,
- C_4 - temperatura otoczenia,
- C_5 - kąt przyłożenia,
- C_6 - kąt pochylenia krawędzi tnącej.

W badaniach przyjęto, że wielkości zakłócające mają charakter losowy. Potencjalnymi wielkościami zakłócającymi mogą być np.: chwilowe wahania napięcia sieci zasilającej oraz chwilowe wahania ciśnienia oleju w układzie napędowym.

Dla danego modelu tworząc jeden większy zbiór ze zbiorów wielkości wejściowych X_i , wyjściowych Y_i , traktując zakłócające Z_i , jako losowe, a także

wyłączając wielkości stałe S_i na podstawie przyjętego modelu procesu opracowano opis matematyczny wpływu wielkości wejściowych na wielkość wyjściową wyznaczaną pośrednio, przedstawiony równaniem (5.1).

$$Y_i = f(X_i) \quad (5.1)$$

Uwzględniając fakt, że zbiór wielkości wejściowych opisany jest równaniem (5.2):

$$X_i = \{\beta, V\} \quad (5.2)$$

w przypadku cięcia drutem (5.3):

$$X_i = \{V\} \quad (5.3)$$

oraz, że zbiór wielkości wyjściowych opisany jest równaniem (5.4)

$$Y_i = \{e_j\} \quad (5.4)$$

Opracowano następujące zależności matematyczne dla zastosowanych technologii cięcia

$$e_j = f(\beta, V) \quad (5.5)$$

w przypadku cięcia drutem:

$$e_j = f(V) \quad (5.6)$$

Przedstawione równania (5.5) oraz (5.6) są funkcjami odpowiedzi układu, aproksymującymi otrzymane wyniki badań doświadczalnych w badanych zakresach zmienności wartości wielkości wejściowych.

5.2. STANOWISKO BADAWCZE

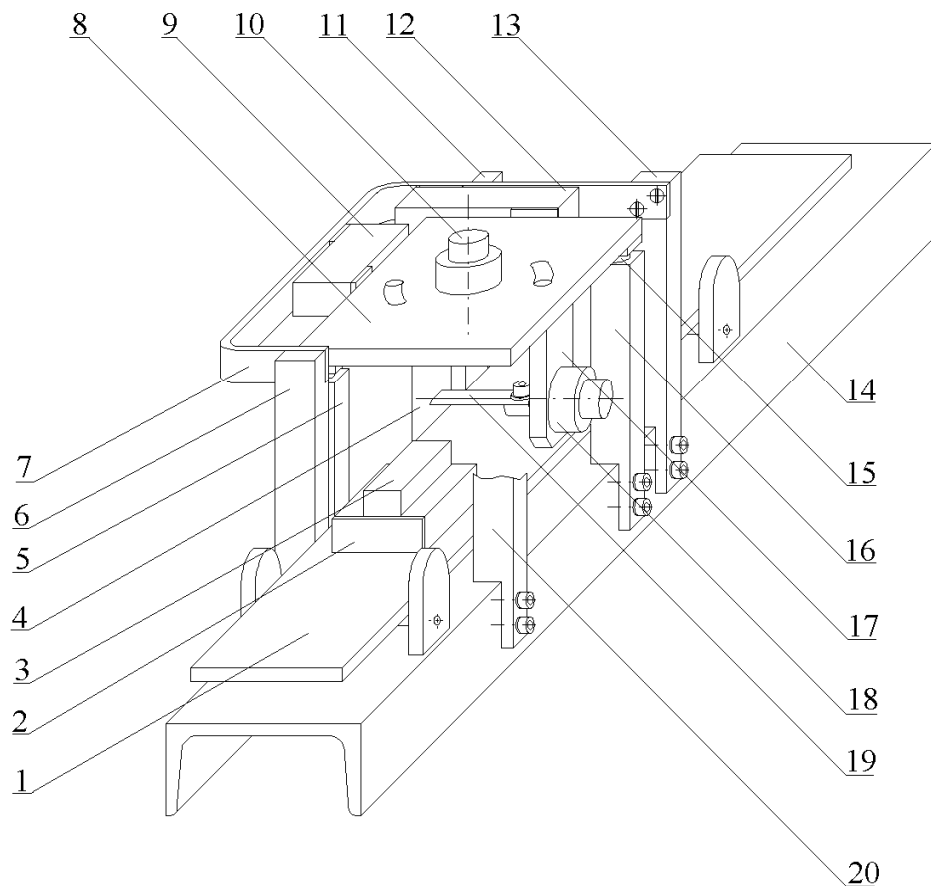
Badania procesu cięcia prowadzono wykorzystując stanowisko znajdujące się w pracowni laboratoryjnej Katedry Inżynierii Procesowej, Spożywczej i Ekotechniki Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej. Widok ogólny stanowiska przedstawia rysunek 5.2.



Rys. 5.2. Widok ogólny stanowiska badawczego

Stanowisko to zostało zgłoszone do Urzędu Patentowego RP i dnia 05.02.2007 zostało nadane mu *Prawo Ochronne* na wzór użytkowy pt. „*Stanowisko do badania oporów cięcia*”, obowiązujące od 08.03.2004r.

Zasada działania stanowiska badawczego opisano poniżej stosując jednocześnie odwołania do rysunku 5.3, przedstawiającego schemat stanowiska.



Rys. 5.3. Schemat stanowiska do badania oporów cięcia produktów spożywczych (oznaczenia i opis w tekście)

Stanowisko do badania oporów cięcia składa się z urządzenia, które posiada poziome łożo (14), po którym przesuwa się wzdłużnie stalowa belka (1) o przekroju prostokątnym, do której zamocowany jest uchwyt badanej próbki (2). Do płyty (8) w kształcie prostokąta zamocowany jest nóż (19) za pomocą wieszaka (17) z obrotową poziomą osią regulacji (18). Płyta (8) w swojej środkowej części posiada regulację (10) z pionową osią obrotu wieszaka (17) i przemieszcza się na kulkach (15) znajdujących się w górnej części na końcach pionowych słupów (4, 5, 16, 20). Do słupów (6, 11, 13) w górnej części zamocowana jest opaska (7), do której przymocowane są indukcyjne belki

pomiarowe (9, 12) za pomocą których mierzone są siły w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach (wzdłużnie i poprzecznie). Belki te podłączone są do komputera PC poprzez mostek zaciskowy i kartę pomiarową.

Stanowisko badawcze składa się z dwóch układów:

- *układu napędowego*, który składa się z silnika elektrycznego, pompy zębatej, elektrozaworów, siłownika hydraulicznego oraz belki z zamocowanym uchwytem na próbkę,
- *układu pomiarowego*, który składa się z dwóch czujników indukcyjnych, dwóch mierników elektronicznych, które mierzą siłę poprzeczną i siłę wzdłużną, terminala zaciskowego PCLD-8115 firmy Advantech, komputera PC z kartą pomiarową i zainstalowanym uniwersalnym, elastycznym programem kontrolno-sterującym „POMIAR”. Program ten umożliwia odbieranie sygnałów z modułów pomiarowych, przetwarzanie, wizualizację i archiwizowanie danych.

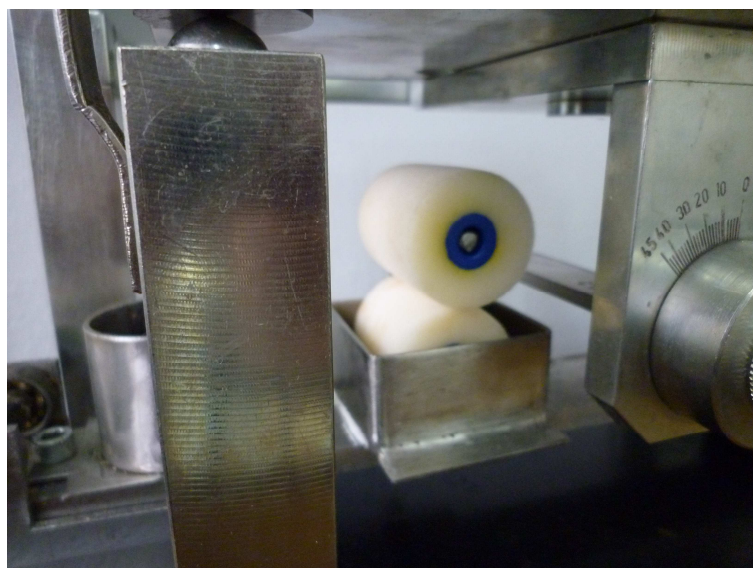
Stanowisko umożliwia wymianę narzędzia tnącego co pozwala ocenić wpływ geometrii narzędzia (kąta ostrza, grubość, charakterystyka powierzchni, technologii cięcia, itp.). Możliwa jest również zmiana położenia noża tj. kąta przyłożenia i kąta pochylenia krawędzi tnącej. Konstrukcja stanowiska pozwala również na równoczesny pomiar sił cięcia w dwóch prostopadłych kierunkach: wzdłużnym (równoległym do kierunku ruchu głównego) oraz poprzecznym (prostopadłym do kierunku ruchu głównego).

Badania procesu cięcia z reguły odnoszone są do pola przekroju poprzecznego próbki o regularnym kształcie wycinanej z badanych surowców. W przypadku takich materiałów jak warzywa i owoce powoduje to naruszenie ciągłości struktury i rzutuje na wyniki pomiarów. Stanowisko badawcze przed modernizacją wyposażono w uchwyt wymagający wycinanie z ciętego materiału próbek prostopadłościennych. Aby umożliwić cięcie korzeni marchwi prostopadle do ich osi, bez wcześniejszej ingerencji w strukturę materiału, wykonano dodatkowy uchwyt umożliwiający odpowiednie zamocowanie materiału (rys. 5.4).



Rys. 5.4. Uchwyt do cięcia korzeni marchwi prostopadle do ich osi

Aby możliwa była ocena wpływu wszystkich przewidzianych w planie badań technologii cięcia na energochłonność procesu, przeprowadzono modernizację stanowiska. Zaprojektowano i wykonano konstrukcję, której zadaniem było nanoszenie środka smarnego na narzędzie tnące. Zmodernizowane stanowisko umożliwiło łatwy montaż i demontaż układu smarującego (rys. 5.5). Smarowanie narzędzia odbywało się metodą powielaczową. Wykonane z materiału porowatego walce, nasączone środkiem smarnym, przenosiły go na narzędzie bezpośrednio przed procesem cięcia.



Rys. 5.5. Układ do nanoszenia środka smarnego na narzędzie

Zaprojektowano i wykonano również uchwyt do zamocowania narzędzia (drutu) wykorzystywany podczas prowadzenia procesu cięcia drutem (rys. 5.6).



Rys. 5.6. Widok stanowiska z zamocowanym uchwytem dla technologii cięcia drutem

Układ pomiarowy sił cięcia podłączono do komputera, przy pomocy którego w czasie trwania badań, wyniki pomiarów były rejestrowane oraz wizualizowane a otrzymane dane archiwizowane.

Zainstalowane na stanowisku czujniki indukcyjne zbliżeniowe typu IH firmy Mensor (rys. 5.7) działają na zasadzie zmiany swojego pola elektromagnetycznego wskutek przemieszczania przewodnika metalicznego.



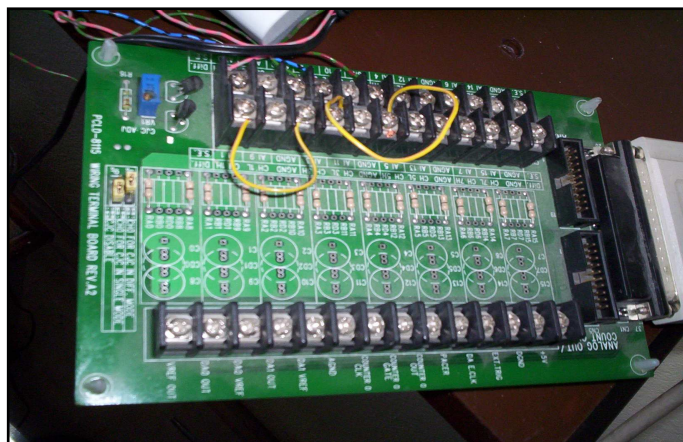
Rys. 5.7. Czujnik indukcyjny firmy MENSOR

Czujniki te połączone były z miernikami elektronicznymi (rys. 5.8) przesyłającymi mierzony sygnał do karty pomiarowo – sterującej A/C, A/D typu PCL – 818 GH firmy Advantech zainstalowanej w komputerze. Przesyłanie sygnału następowało poprzez terminal zaciskowy PCLD-8115 firmy Advantech (rys. 5.9). Odbieranie sygnałów z modułów pomiarowych, przetwarzanie, wizualizacja i archiwizowanie danych było możliwe dzięki zastosowaniu specjalistycznego, elastycznego programu „POMIAR”. Okno programu zaprezentowano na rysunku 5.10. Program ten ma możliwość rejestracji sygnału wchodzącego do karty pomiarowej, a także przeprowadzenia wizualizacji uzyskanych przebiegów czasowych. Dane rejestrowane przez ten program zapisywane były w postaci kodów ASCII do pliku formatu *.dat.. Karta ta posiada

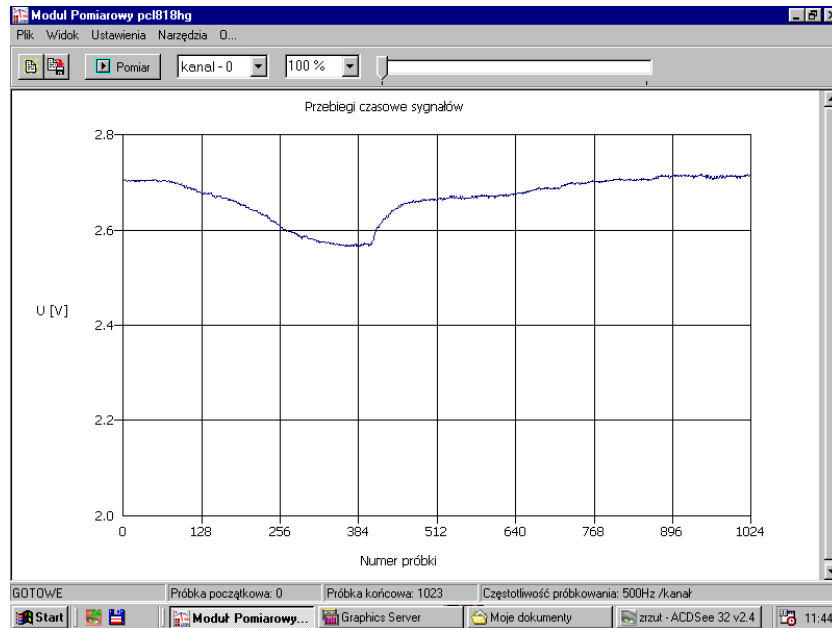
wzmacniacz wejściowy o programowalnym wzmacnieniu od $\times 0,5$ do $\times 1000$ pozwalający na próbkowanie sygnałów o bardzo małym poziomie napięcia. Pełna szybkość próbkowania karty w środowisku Windows wynosi 100 kHz, a wbudowany bufor FIFO pozwala na pełne przetwarzanie jednocześnie odbieranych sygnałów. Transmisja danych z karty do komputera jest możliwa za pomocą przerwania przez kanał DMA i w trybie programowym. Karta posiada 16 wejść i 16 wyjść TTL, przetwornik analogowo – cyfrowy A/D i przetwornik cyfrowo – analogowy D/A jak również jeden kanał licznika 8253.



Rys. 5.8. Miernik elektroniczny firmy MENSOR



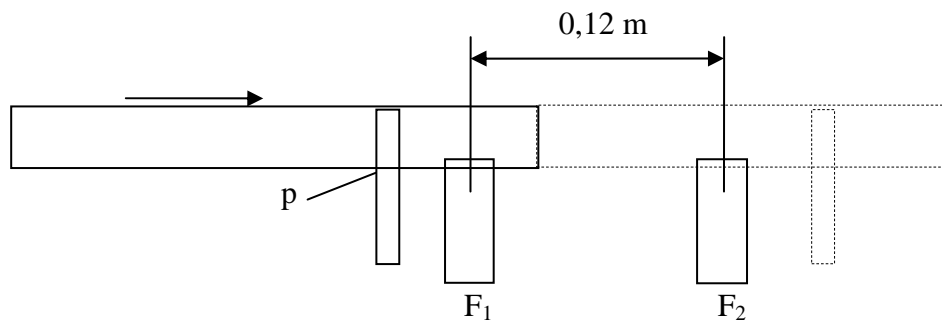
Rys. 5.9. Terminal zaciskowy PLCD-8115 firmy Advantech



Rys. 5.10. Okno programu POMIAR w czasie prezentacji zarejestrowanego przebiegu czasowego sygnału z miernika

Stanowisko badawcze umożliwia prowadzenie procesu cięcia z różnymi prędkościami. Prędkość cięcia, rozumiana jako prędkość przemieszczania się ciętego materiału względem narzędzia może być zmieniana zakresie (50-400) mm/s.

Aby wyznaczyć prędkość cięcia zaprojektowano i wykonano tor pomiarowy pozwalający mierzyć czas na stałym odcinku 0,12 m. Składał się on z dwóch fotokomórek, stopera i przesłony zamocowanej na belce. Rysunek 5.11 przedstawia schematycznie zasadę działania układu do pomiaru czasu a rysunek 5.12 schemat toru do pomiaru czasu. Gdy w polu fotokomórki nie znajduje się przesłona to zaciski S_1 , S_2 są rozwarne, a gdy przesłona przechodzi przez jedną z fotokomórek to tranzystor T_4 (na czas przebywania przesłony w polu) zaczyna przewodzić prąd zwierając zaciski S_1 , S_2 . Zwarcie i rozwarzenie zacisków S_1 , S_2 uruchamia lub zatrzymuje stoper.



Rys. 5.11. Schemat układu do pomiaru czasu: F1 i F2 – fotokomórki, p - przesłona

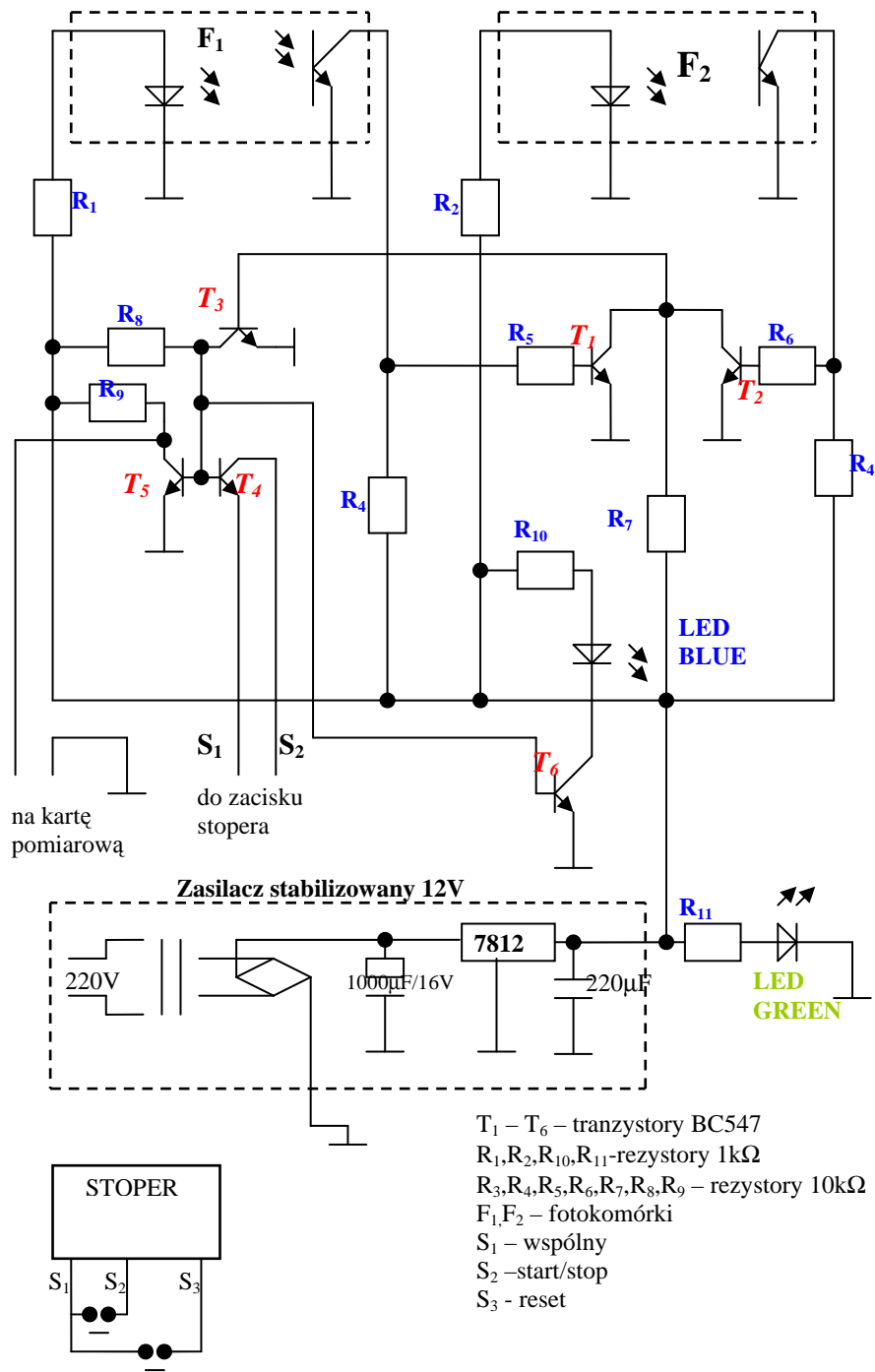
Prędkość cięcia obliczano ze wzoru:

$$V = \frac{s}{t}, \quad [\text{m/s}] \quad (5.7)$$

gdzie:

s – odległość pomiędzy fotokomórkami [m],

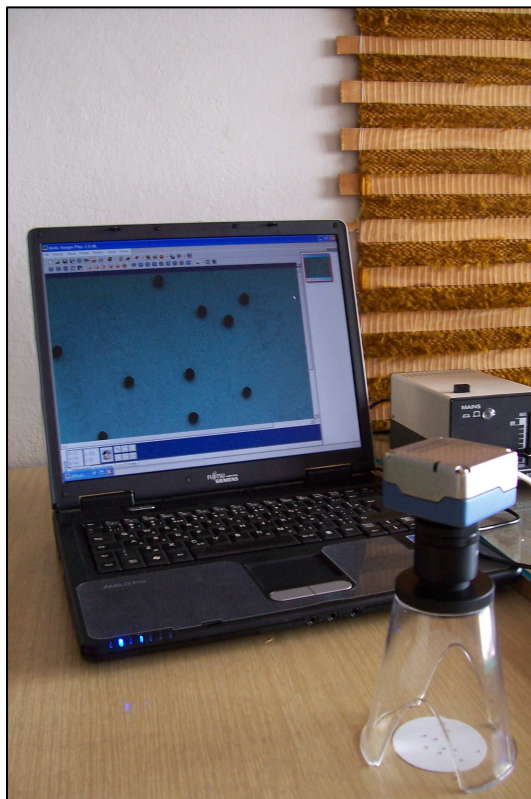
t – czas odczytany ze stopera [s].



Rys. 5.12. Schemat toru do pomiaru czasu

Energochłonność cięcia, stanowiąca zmienną zależną modelu badań, odnieszono do jednostki pola powierzchni przeciętego materiału. Wyznaczano w ten sposób jednostkową energochłonność procesu.

Do pomiaru pola powierzchni przeciętych próbek wykorzystywano stanowisko do komputerowej analizy obrazu (rys. 5.13). Stanowisko to znajdowało się w pracowni Katedry Inżynierii Procesowej, Spożywczej i Ekotechniki Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej. W skład stanowiska wchodziła kamera cyfrowa MotiCAM 2000 podłączona do komputera. Pomiaru pola powierzchni przeciętych próbek dokonywano przy pomocy zainstalowanego oprogramowania Motic Images Plus 2.0, analizującego obraz pochodzący z kamery.



Rys. 5.13. Stanowisko do pomiaru pola powierzchni przeciętych próbek

5.3. MATERIAŁY PODDAWANE PROCESOWI CIĘCIA

Procesowi cięcia poddawano materiały, będące reprezentantami dwóch różniących się właściwościami, grup materiałów spożywczych.

Pierwszym materiałem była marchew odmiany *Bolero F1* (rysunek 5.14), charakteryzująca się bardzo gładkim, wyrównanym i cylindrycznym korzeniem z mało wyraźnie zarysowanym rdzeniem. Ważną cechą tej odmiany jest również duża zawartość suchej masy i wysoka zdolność do długiego przechowywania. Jest to odmiana polecana dla przemysłu jako odmiana plastrowa. Surowiec ten w technologiach przemysłowych poddawany jest cięciu w celu przygotowania mrożonek czy suszu. Marchew odmiany *Bolero F1* poddawana jest również rozdrabnianiu w celu przygotowywania przecierów lub soków [54].

Cięciu poddawano całe korzenie marchwi prostopadle do osi korzenia, odcinając warstwę o grubości 5 mm. Cylindryczny kształt korzenia pozwalał na cięcie materiału o zbliżonej średnicy. Proces cięcia prowadzono w połowie długości korzenia. Każda partia ciętej marchwi poddawana była badaniu wilgotności.



Rys. 5.14. Marchew odmiany *Bolero F1*

Wilgotność próbek badano metodą wagowo-suszarkową zgodnie z PN-70/A-74001 i obliczana ze wzoru:

$$W = \frac{(m_1 - m_2)}{(m_1 - m)} \cdot 100 \% \quad (5.8)$$

gdzie:

m- masa naczynka, g

m₁- masa naczynka z próbką przed suszeniem, g

m₂- masa naczynka z próbką po suszeniu, g.

Otrzymany wynik w % jest średnią arytmetyczną z dwóch wyników równoległe przeprowadzonych oznaczeń, i jest podany z dokładnością do 0,1%.

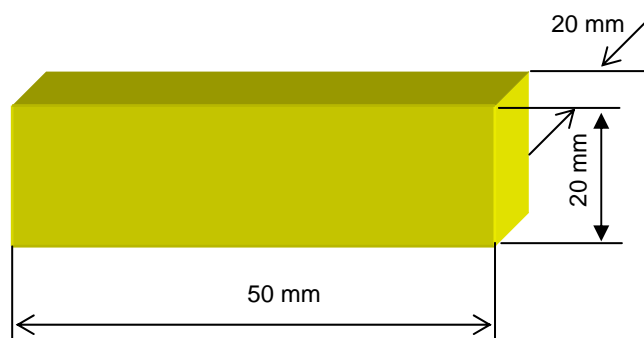
Drugim materiałem, dla którego określano energochłonność procesu cięcia był ser żółty Podlaski pochodzący z OSM Włoszczowa (rys. 5.15). Ser ten zaliczany jest do serów twardych charakteryzujących się zawartością wody mniejszą niż 50%. Materiał ten ma jednolitą strukturę. Zawartość tłuszczu w suchej masie wynosi 45%.



Rys. 5.15. Blok sera, z którego wycinano próbki do badań

Ser jest produktem, który poddaje się cięciu na plastry, rozdrabnianiu do postaci wiórów a także dzieleniu dużych kilkudziesięciokilowych bloków na mniejsze.

Z sera do badań wycinano próbki prostopadłościennie o wymiarach przedstawionych na rysunku 5.16.



Rys. 5.16. Wymiary wycinanych do badań próbek sera

5.4. STOSOWANE TECHNOLOGIE CIĘCIA

W celu weryfikacji postawionych tez przeprowadzono proces cięcia opisanych w poprzednim rozdziale materiałów różnymi technologiami. Wyniki badań porównywano z wynikami procesu cięcia technologią nazywaną w pracy *technologią podstawową*.

Technologia podstawowa to metoda cięcia materiałów nożem płaskim o grubości 1,5 mm, długości 27 mm i szerokości 70 mm. Opracowany plan badań wymagał wykonania kompletu noży różniących się kątem ostrza (rys. 5. 17). Materiałem , z którego wykonano noże była stal narzędziowa NC6 do pracy na zimno, charakteryzująca się niewielkimi odkształceniami podczas hartowania i wysoką odpornością na ścieranie. Twardość noży z tej stali wynosiła 42 HRC a chropowatość 0,8 Ra.



Rys. 5.17. Noże wykorzystywane do prowadzenia procesu cięcia technologią podstawową

Realizowane cięcie było cięciem normalnym. Charakteryzuje się ono tym, że nie występuje względne przesunięcie surowca wzdłuż ostrza noża. Przy takim

rodzaju cięcia jego prędkość jest równoważna nadawanej surowcowi lub nożowi a kąt pomiędzy krawędzią tnącą a kierunkiem cięcia jest równy 90° .

Krawędź tnąca noża była dłuższa od szerokości obrabianego przedmiotu. Taki przypadek cięcia nazywamy cięciem swobodnym [17].

Inną zastosowaną technologią cięcia materiałów spożywczych było realizowanie procesu narzędziem pokrytym powłoką zmniejszającą opór tarcia pomiędzy narzędziem a obrabianym przedmiotem.

W tym celu wykonano dwa komplety noży, z których jeden pokryto powłoką azotku tytanu TiN (rys. 5.18), natomiast drugi powłoką o nazwie handlowej AS48 (rys. 5.19).

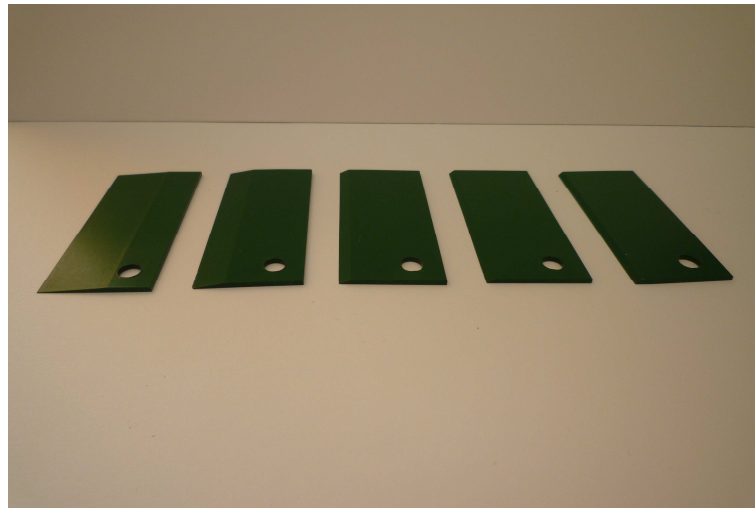


Rys. 5.18. Komplet noży z naniesioną powłoką TiN

Powłokę TiN wykonano w Instytucie Technologii Eksploatacji w Radomiu. Powłokę o grubości $0,9 \mu\text{m}$ osadzono metodą łukowo-próżniową na urządzeniu MZ383 firmy Metaplas Ionon. Powłoka ta charakteryzuje się wysoką odpornością na zużycie ściernie, dużą twardością oraz niskim współczynnikiem tarcia o stale zmieniającym się w zakresie $0,1 - 0,6$. Powłoka ta znajduje zastosowanie m.in. na powierzchniach roboczych narzędzi skrawających.

Posiada również ciekawą barwę (złoty kolor) nadającą pokrywającym powierzchniom także rolę dekoracyjną.

Drugą zastosowaną na nożach powłoką była powłoka o nazwie handlowej AS48 wykonana przez firmę PFP Polska. Firma ta zajmuje się nakładaniem powłok fluoropolimerowych na elementy maszyn i urządzeń.



Rys. 5.19. Komplet noży pokrytych powłoką AS48

Zastosowana powłoka jest powłoką powstałą na bazie polimerów fluorowych zachowując właściwości podobne do materiału jakim jest PTFE (Teflon). Posiada ona bardzo dobre właściwości antyadhezyjne, wysoką odporność na ścieranie, niski współczynnik tarcia a także dopuszczenie do kontaktu z żywnością. Grubość powłoki wynosiła 40 μm . Wykonana powłoka miała barwę zieloną.

Badania energochłonności procesu cięcia narzędziami z naniesionymi powłokami prowadzono według planu badań przyjętego dla *technologii podstawowej*.

Kolejną stosowaną technologią, która miała na celu zmniejszenie oporów cięcia a przez to energochłonności procesu, była technologia cięcia narzędziem pokrywanym środkiem smarnym.

Zastosowaną metodą smarowania była metoda powielaczowa. Polegała ona na nanoszeniu środka smarnego przy pomocy wałków wykonanych z porowatego materiału (gąbki). Wałki przemieszczające się w kierunku narzędzia tnącego wprowadzane były w ruch obrotowy na skutek kontaktu z narzędziem. Substancja smarna наносzona była na powierzchnie natarcia i przyłożenia. Układ smarowania narzędzia zaprezentowano w rozdziale 5.2.

Jako środek smarny wykorzystano olej rzepakowy. Substancję tą wybrano na podstawie analizy literatury badawczej dotyczącej właściwości środków smarnych możliwych do zastosowania podczas bezpośredniego kontaktu z żywnością a także badań smarnościowych wykonanych w Instytucie Nafty i Gazu w Krakowie oraz badań wstępnych autora rozprawy.

Proces cięcia polegający na zastosowaniu technologii smarowania narzędzia tnącego prowadzono zgodnie z planem badań wykorzystanym dla *technologii podstawowej*.

Ostatnią zastosowaną technologią było cięcie drutem. Metoda ta jest obecnie stosowana podczas cięcia serów. Charakteryzuje się ona małymi oporami ze względu na niewielką powierzchnię kontaktu narzędzia i obrabianego materiału. Przeprowadzenie badań dla drugiego materiału (marchwi) pozwoliło ocenić możliwości stosowania tej metody dla materiałów innych niż sery.

Badania przeprowadzono używając do cięcia drutu o średnicy 0,3 mm wykonanego ze stali chromowo-molibdenowej. Średnica narzędzia została wybrana na podstawie przeglądu literatury oraz wyników badań wstępnych. Dla cięcia realizowanego z prędkościami wynikającymi z planu badań średnica taka zapewniała odpowiednią wytrzymałość drutu oraz jakość powierzchni przecinanego materiału.

Proces cięcia drutem prowadzono z prędkościami przyjętymi w planie badań technologii opisanych powyżej.

5.5. ENERGOCHŁONNOŚĆ PROCESU CIĘCIA

Energochłonność jednostkową procesu cięcia definiowano jako pracę potrzebną do przecięcia jednostki pola powierzchni materiału i obliczano z zależności:

$$e_j = \frac{L}{A}, \quad \left[\frac{J}{m^2} \right] \quad (5.9)$$

gdzie:

L – praca cięcia [J],

A – pole powierzchni przeciętej próbki [m²].

Przy czym pracę cięcia obliczano z zależności:

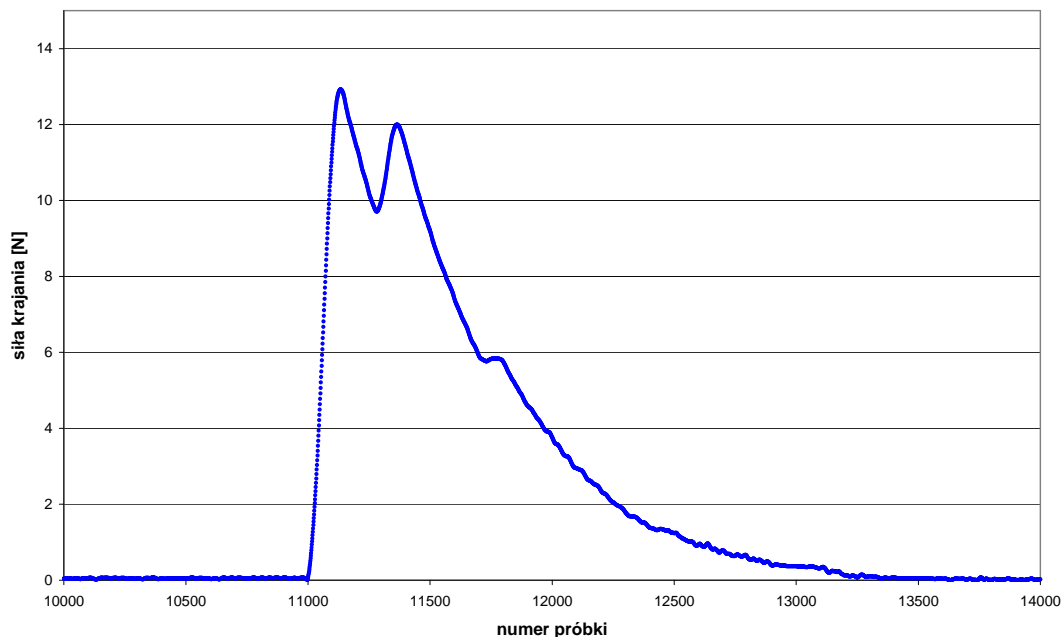
$$L = \int_S F \cdot ds = \sum_i F_i \cdot ds_i, \quad [J] \quad (5.10)$$

gdzie:

$\sum_i F_i$ - suma zarejestrowanych sił podczas przecinania próbki [N],

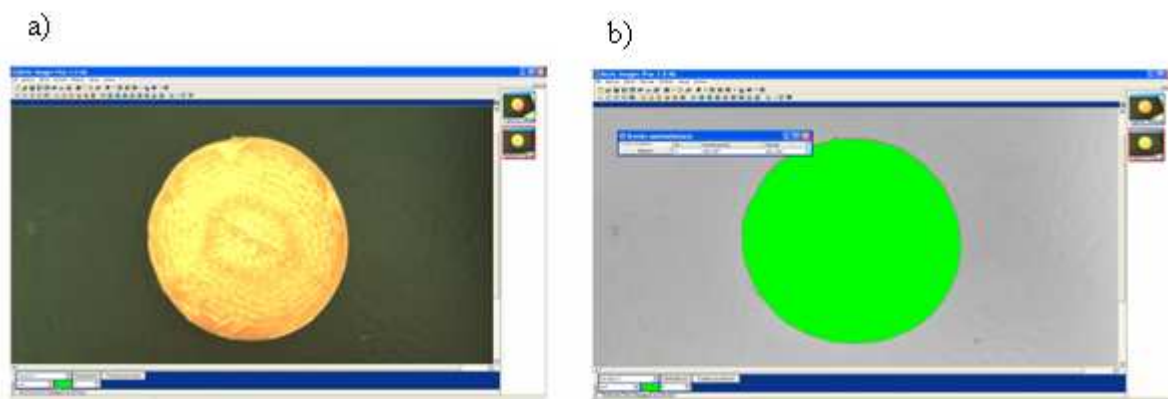
ds_i - droga jaką pokonuje próbka pomiędzy kolejnymi zarejestrowanymi wartościami siły w przebiegu czasowym [m].

Otrzymana wartość pracy cięcia była równa polu powierzchni pod zarejestrowaną krzywą. Przykładową krzywą cięcia przedstawia rys. 5.20.



Rys. 5.20. Przykładowa krzywa krajania marchwi

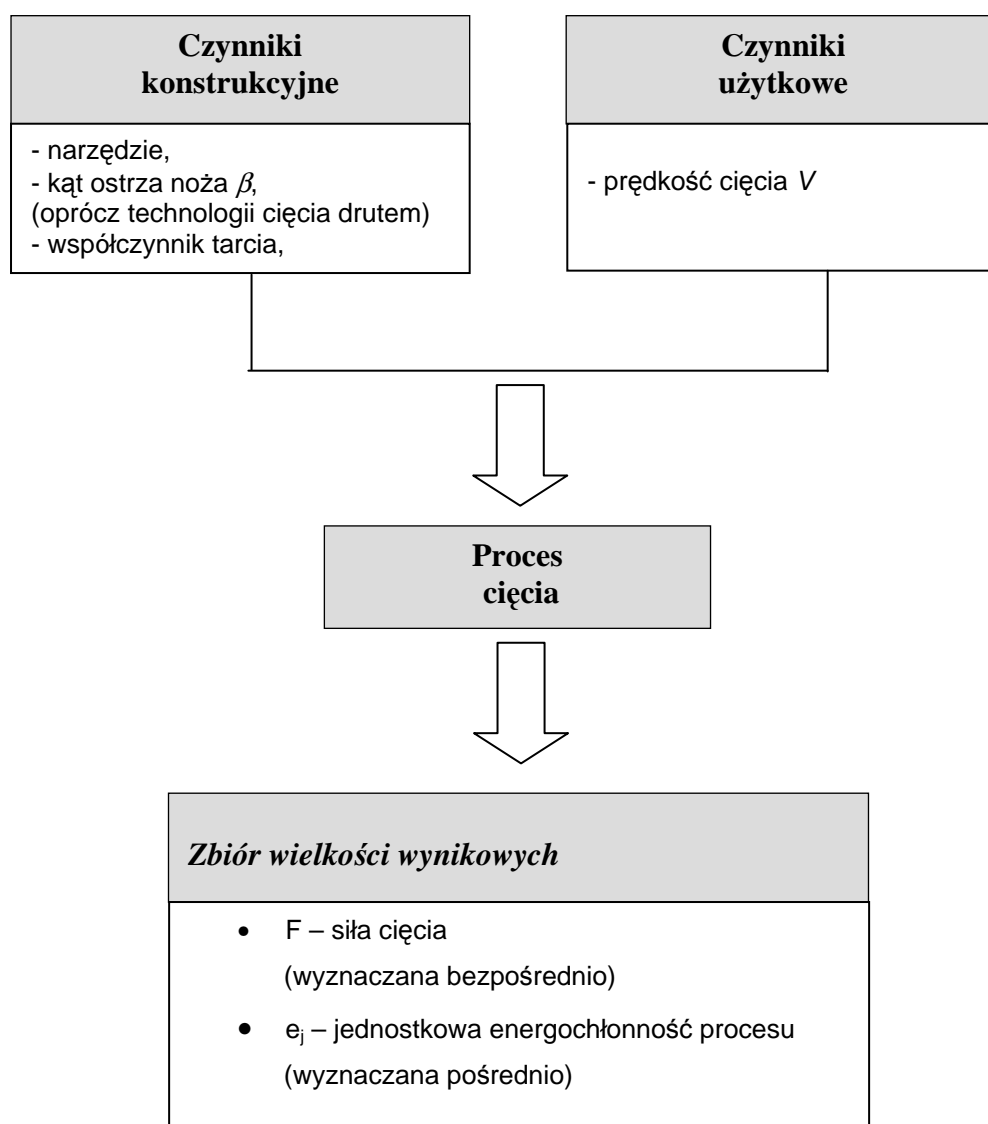
Pole powierzchni przeciętych próbek mierzono na stanowisku do komputerowej analizy obrazu, opisanym w rozdziale 5.2. Rysunek 5.21 przedstawia okno programu z obrazem przeciętej próbki oraz okno programu z mierzonym polem powierzchni.



Rys. 5.21. Okno programu Motic Images Plus 2.0: a-obraz przeciętej próbki, b-mierzone pole powierzchni przeciętej próbki

5.6. PLAN BADAŃ

W celu weryfikacji postawionych tez, przeprowadzono badania według schematu przedstawionego na rysunku 5.22. W badaniach energochłonności procesu cięcia sera i marchwi uwzględniono czynniki konstrukcyjne oraz jeden czynnik użytkowy. Wszystkie metody cięcia, poza technologią z wykorzystaniem narzędzia tnącego - drut, prowadzono według jednego opracowanego planu badań. Cięcie drutem realizowano tylko dla jednej zmiennej zależnej *prędkość cięcia*, która przyjmowała wartości takie jak w planie badań opracowanym dla pozostałych technologii cięcia.



Rys. 5.22. Schemat badań

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: X_1 - kąt ostrza noża β , X_2 -prędkość cięcia V .

Wielkości charakteryzujące plan eksperymentu przedstawiają się następująco:

- liczba czynników wejściowych = 1, bloków = 1
- liczba układów planu = 10, (liczba układów w jądrze planu $n_c = 2^2 = 4$, liczba układów punktów gwiazdnych $n_\alpha = 4$, liczba układów centrum planu $n_0 = 2$)
- alfa rotalności $\alpha = 1,4142$

Tabela 5.1 przedstawia przyjęte do planu eksperymentu wielkości czynników wejściowych a także zakresy ich wartości.

Tab. 5.1. Zmienne niezależne przyjęte do planu badań

Wielkości wejściowe X_i	Nazwa wielkości wejściowej	Oznaczenie czynnika	Zakres zmienności	Dokładność pomiaru
X_1	kąt ostrza	$\beta [^\circ]$	5÷45	0,1
X_2	prędkość cięcia	$V \times 10^{-3} [m/s]$	50÷400	0,1

Na podstawie powyższej tabeli oraz przyjętego rotalno-uniformalnego planu eksperymentu wyznaczono pośrednie wartości wielkości wejściowych niezbędne do przeprowadzenia doświadczenia. Wartości te przedstawiono w tabeli 5.2.

Tab. 5.2. Wartości wielkości wejściowych odpowiadające opracowanemu planowi badań eksperymentalnych

X_i	Oznaczenie wielkości wejściowej	$\alpha = 1,4142 (i=2)$				
		$-\alpha$	-1	0	1	$+\alpha$
X_1	$\beta [^\circ]$	5,0	10,9	25,0	39,1	45,0
X_2	$V \times 10^{-3} [m/s]$	50,0	101,3	225,0	348,7	400,0

Ogólną postać macierzy eksperymentu przyjętą w realizowanym planie badań w postaci unormowanej (kodowanej) oraz fizycznej przedstawiono w tabeli 5.3.

Tab. 5.3. Ogólna postać macierzy eksperymentu

Lp.	Wielkości wejściowe X_i			
	macierzy kodowana		postać fizyczna	
	X_1	X_2	$\beta [^\circ]$	$V \times 10^{-3} [m/s]$
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 technologii cięcia drutem.

Matematyczny opis procesu cięcia sera i marchwi (model matematyczny)
ma postać ogólną opisaną równaniem (5.11):

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{12}x_1x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 \quad (5.11)$$

5.7. METODY STATYSTYCZNE OPRACOWANIA WYNIKÓW

W celu weryfikacji postawionych tez przeprowadzono badania doświadczalne, których rezultaty analizowano przy pomocy programu *Statistica 9.0 PL*. Program ten zawiera wszystkie moduły statystyczne potrzebne do wykonania pełnej analizy przeprowadzonych badań doświadczalnych.

Badania prowadzono według wygenerowanego centralno-kompozycyjnego planu eksperymentu. Plan ten opracowano przy pomocy modułu *Planowanie doświadczeń* wchodzącego w skład oprogramowania *Statistica 9.0*.

Oszacowanie błędów wyników w określonych w planowaniu doświadczeń punktów pomiarowych, przeprowadzono testem t-Studenta z założonym poziomem istotności $\alpha=0,05$ [76]. Po wyznaczeniu średniej arytmetycznej oraz odchylenia standardowego badano istotność pomiarów według zależności 5.12.

$$\frac{|y_i - \bar{y}|}{\sigma} < t_\alpha \quad (5.12)$$

gdzie:

y_i , - wartość zmierzona,

\bar{y} – średnia arytmetyczna z pomiaru,

σ - odchylenie standardowe,

t_α – wartość testu *t – Studenta* dla $\alpha=0,05$.

Wyniki, które nie spełniały zależności 5.12 odrzucano.

Dla pozostałych wyników generowano powierzchnie odpowiedzi. Estymatory efektów standaryzowanych posortowane według ich wartości bezwzględnej przedstawiano na wykresach Pareto. Pionowa linia na wykresach wskazywała minimalną wartość statystycznie istotnego efektu przy danym modelu, składniku błędu i ustalonym poziomie istotności. Następnie generowano

współczynniki regresji i określano równanie regresji modelu matematycznego. Istotność współczynników regresji badano testem t-Studenta. Do sprawdzania adekwatności równania stosowano test Fishera. Na wykresach przedstawiano również wzajemną korelację pomiędzy wartościami zmierzonymi i aproksymowanymi.

Dla technologii cięcia drutem prowadzono analizę regresji wyznaczając równanie regresji. Oceniono również istotność współczynników równania regresji oraz wygenerowano krzywą regresji przedstawiając ją na rysunku.

W celu oceny wpływu zastosowanej technologii cięcia sera i marchwi wyliczono dla wszystkich punktów planu badań różnice jednostkowej energochłonności procesu. Różnice te wyznaczano względem *technologii podstawowej*. Wartość różnic pomiędzy technologią podstawową a inną zastosowaną w badaniach doświadczalnych, w poszczególnych punktach planu badań obliczano z zależności 5.13.

$$R = \frac{(e_{jB} - e_{j(T)})}{e_{jB}}, \quad [\%] \quad (5.13)$$

gdzie:

e_{jB} – jednostkowa energochłonność procesu cięcia technologią podstawową,

$e_{j(T)}$ – jednostkowa energochłonność procesu cięcia inną niż podstawowa technologią cięcia.

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

6. WYNIKI I ANALIZA BADAŃ

Niniejszy rozdział rozprawy przedstawia wyniki badań energochłonności procesu cięcia materiałów spożywczych opisanych w rozdziale 5.3. Zaprezentowano również analizę różnic pomiędzy energochłonnością procesu prowadzonego technologią nazwaną w pracy technologią podstawową a innymi zaproponowanymi metodami cięcia.

6.1. Wyniki badań energochłonności jednostkowej procesu cięcia sera

6.1.1. Cięcie sera technologią podstawową

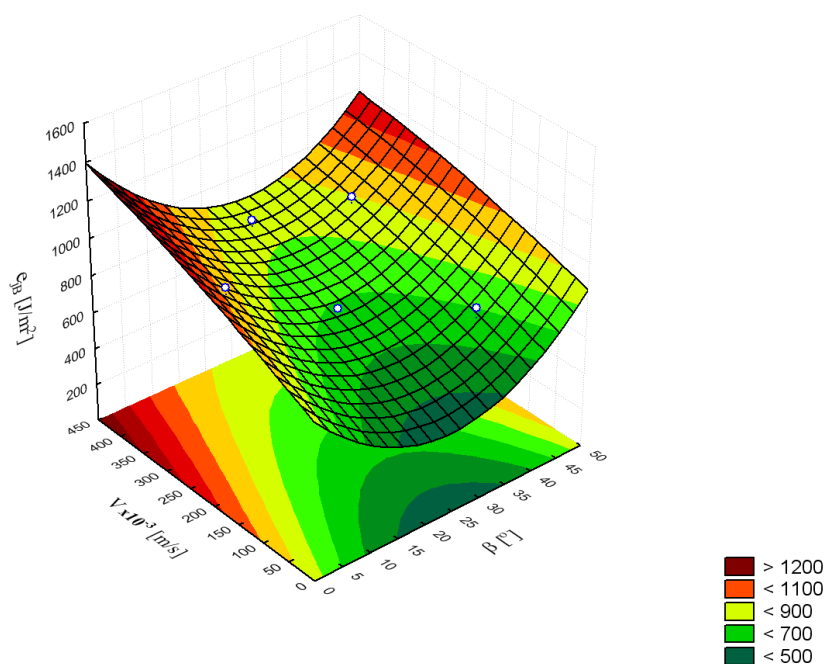
Jako pierwsze zaprezentowane będą wyniki cięcia sera technologią określaną w pracy jako technologia podstawowa ponieważ do rezultatów tych badań odnoszone będą wyniki cięcia pozostałymi technologiami.

Tabela 6.1, przedstawiona poniżej, zawiera wyniki obliczeń jednostkowej energochłonności procesu cięcia sera dla kątów ostrza i prędkości cięcia zgodnych z przyjętym planem badań. Kąt przyłożenia α podczas badań nie zmieniał się a jego wartość wynosiła 0° .

Na podstawie wartości zmiennych niezależnych oraz odpowiadającej im energochłonności procesu cięcia, przedstawionych w tabeli 6.1, wygenerowano powierzchnię odpowiedzi przedstawioną na rysunku 6.1.

Tab. 6.1. Macierz planu badań wraz z odpowiadającymi jej wynikami jednostkowej energochłonności procesu cięcia sera technologią podstawową

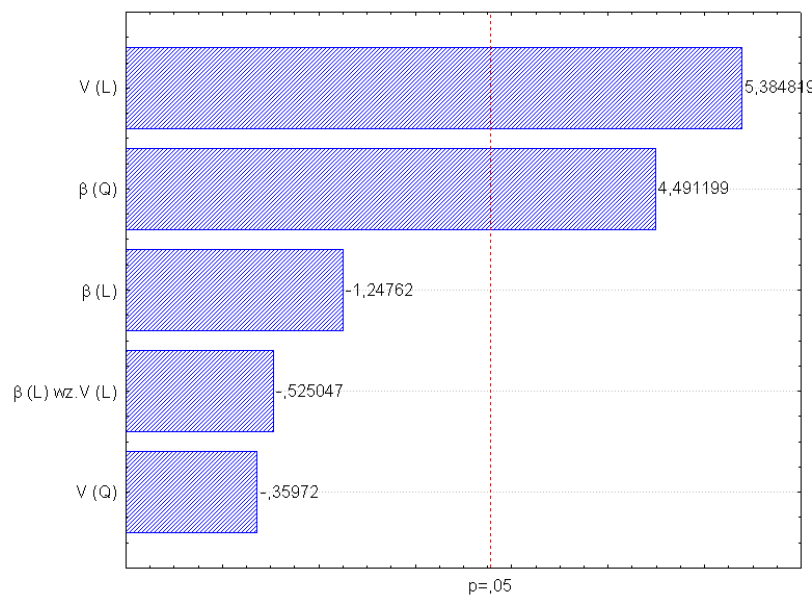
β [°]	$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jB} [J/m ²]	σe_{jB} [J/m ²]
10,9	101,3	664,4	80,56
25,0	50,0	485,3	60,26
25,0	400,0	868,6	112,03
10,9	348,7	911,5	94,35
5,0	225,0	1064,1	65,47
39,1	348,7	904,9	65,87
45,0	225,0	867,4	69,12
25,0	225,0	688,4	89,29
39,1	101,3	724,6	73,81
25,0	225,0	688,4	89,29



Rys. 6.1. Wykres przedstawiający jednostkową energochłonność procesu cięcia sera technologią podstawową

Zawarte w tabeli 6.1 wartości zmiennych poddano analizie statystycznej a na rysunku 6.2 przedstawiono standaryzowane (kodowane) wielkości

wejściowe X_i , uszeregowane według istotności efektów ich wpływów liniowych (L) i potęgowych (Q) na wartość mierzonej wielkości wyjściowej. Znak (+) przy współczynnikach liczbowych oznacza dodatni kierunek działania badanej wielkości wejściowej na wielkość wyjściową, zaś znak (-) oznacza ujemny kierunek działania wielkości wejściowej. Im większa wartość współczynnika tym większy wpływ badanej zmiennej niezależnej na zmienną zależną.



Rys. 6.2. Wykres Pareto istotności wpływu efektów standaryzowanych wielkości wejściowych na jednostkową energochłonność procesu cięcia sera technologią podstawową

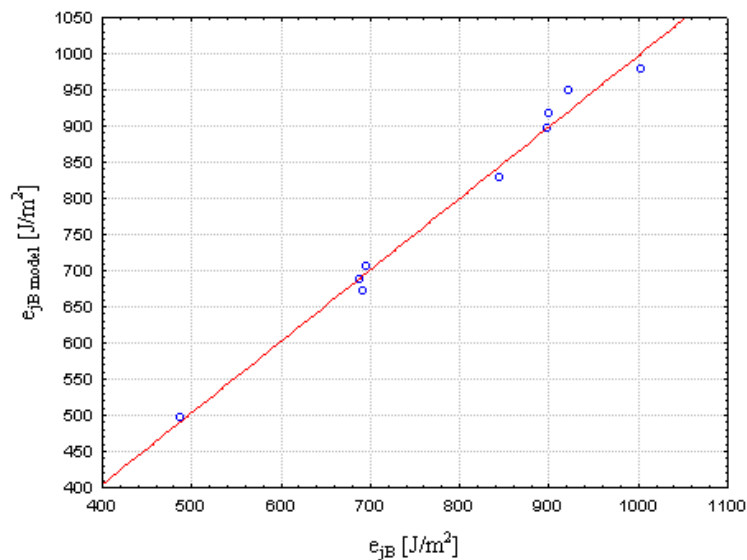
Jak wynika z wykresu Pareto, przedstawionym na rysunku 6.2, zarówno prędkość cięcia jak i kąt ostrza narzędzia mają istotny wpływ na jednostkową energochłonność procesu cięcia sera technologią podstawową dla przyjętego poziomu istotności $\alpha= 0,05$.

Równanie regresji opisujące powyższą zależność przyjmuje postać:

$$e_{jB} = 846,35769 - 33,26005 \cdot \beta + 0,66846 \cdot \beta^2 + 1,53258 \cdot V - 0,000699 \cdot V^2 - 0,00955 \cdot \beta V; \quad R^2 = 0,93485 \quad (6.1)$$

Adekwatność równania 6.1 sprawdzono testem Fishera.

Poprawność przyjętego modelu matematycznego opisującego powyższą zależność potwierdza przedstawiona na rysunku 6.3 korelacja wartości aproksymowanych z wartościami pomiarów.



Rys. 6.3. Korelacja pomiędzy przyjętym modelem a wartościami pomiarów jednostkowej energochłonności procesu cięcia sera technologią podstawową

Analiza wpływu kąta ostrza β oraz prędkości cięcia V na jednostkową energochłonność procesu e_{jB} podczas cięcia sera technologią podstawową pokazała, że dla każdej prędkości cięcia (z badanego zakresu) najmniejszą energochłonnością charakteryzował się proces prowadzony narzędziem o kącie ostrza 25° . Wzrost prędkości cięcia skutkował wzrostem e_{jB} .

6.1.2. Cięcie sera nożem pokrytym powłoką TiN

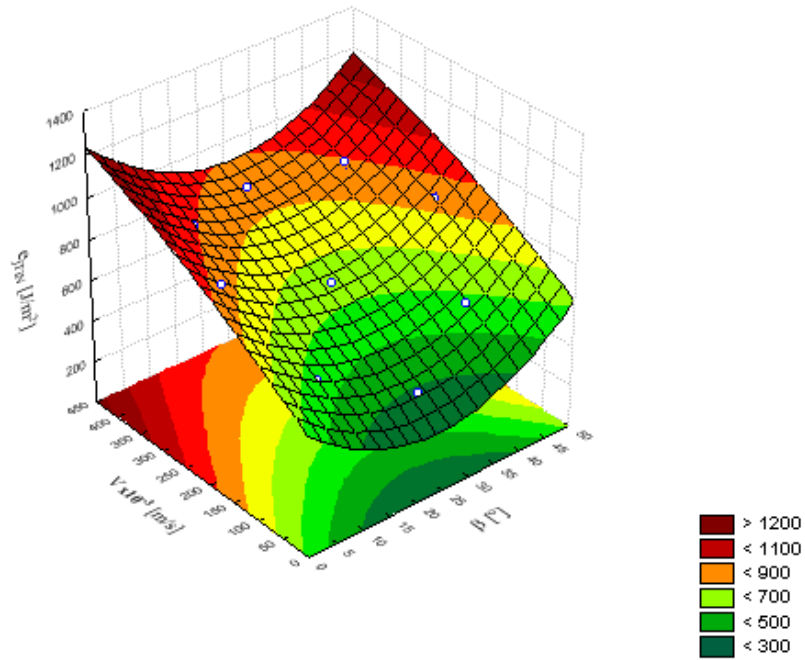
Badania jednostkowej energochłonności cięcia sera z wykorzystaniem technologii cięcia narzędziem pokrytym powłoką TiN prowadzono według planu badań, którego macierz przedstawiono w tabeli 6.2.

Tab. 6.2. Macierz planu badań wraz z odpowiadającymi jej wynikami jednostkowej energochłonności procesu cięcia sera nożem z powłoką TiN

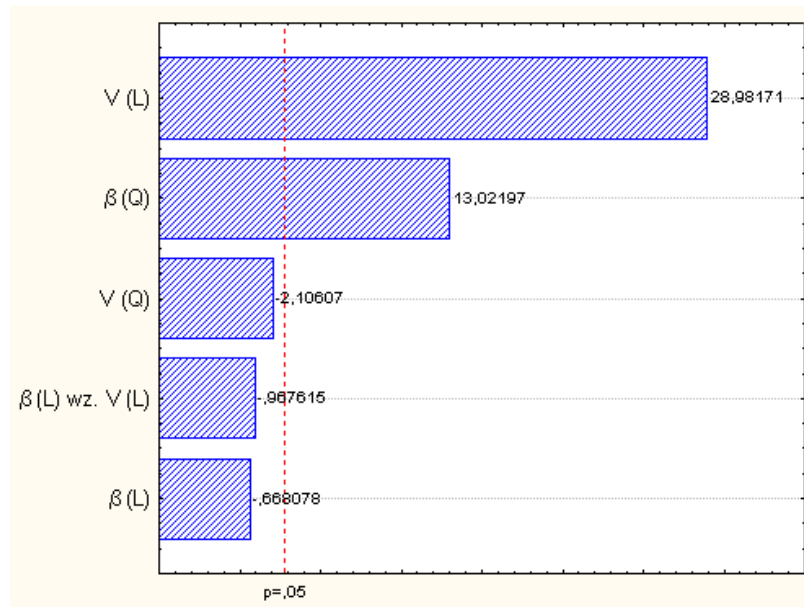
β [°]	$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jTiN} [J/m ²]	σe_{jTiN} [J/m ²]
10,9	101,3	543,3	50,66
25,0	50,0	390,5	36,47
25,0	400,0	848,6	59,62
10,9	348,7	897,6	102,28
5,0	225,0	868,2	92,88
39,1	348,7	894,8	71,31
45,0	225,0	828,4	89,01
25,0	225,0	647,9	40,08
39,1	101,3	571,8	44,69
25,0	225,0	647,9	40,08

Na podstawie powyższych wyników wygenerowano powierzchnię odpowiedzi, którą przedstawia rysunek 6.4.

Wykres Pareto wpływu standaryzowanych wielkości wejściowych na jednostkową energochłonność procesu dla zastosowanej technologii cięcia przedstawia rysunek 6.5.



Rys. 6.4. Wykres przedstawiający jednostkową energochłonność procesu cięcia sera nożem z powłoką TiN

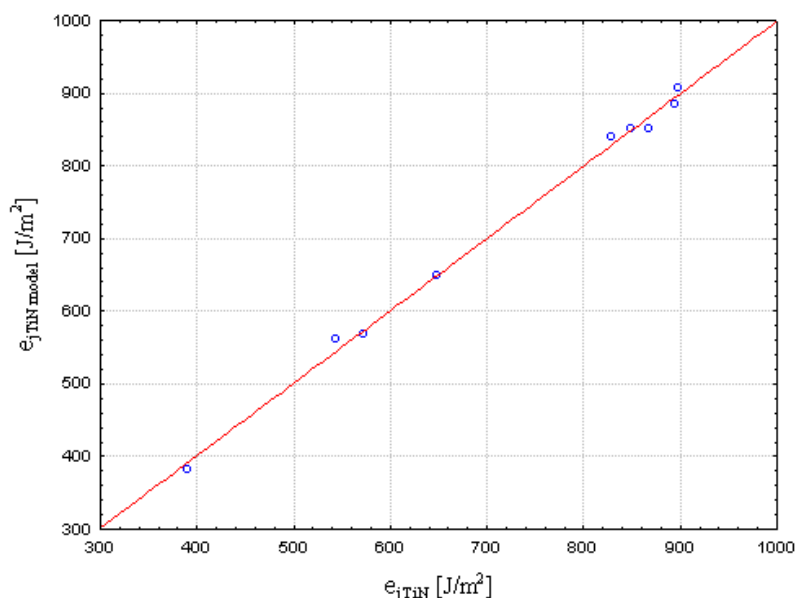


Rys. 6.5. Wykres Pareto istotności wpływu efektów standaryzowanych wielkości wejściowych na jednostkową energochłonność procesu cięcia sera nożem z powłoką TiN

Wykres Pareto pokazuje istotny, na poziomie $\alpha=0,05$, wpływ prędkości cięcia oraz kąta ostrza noża. Równanie regresji przyjmuje postać:

$$e_{jTiN} = 583,33605 - 23,87759 \cdot \beta + 0,49226 \cdot \beta^2 + 1918,20684 \cdot V - 1039,86427 \cdot V^2 - 4,46894 \cdot \beta V; \quad R^2=0,99632 \quad (6.2)$$

Adekwatność modelu, sprawdzona testem Fishera, zaprezentowana została graficznie w postaci wykresu korelacji wartości pomiarów z wartościami modelu matematycznego. Wykres ten przedstawia rysunek 6.6.



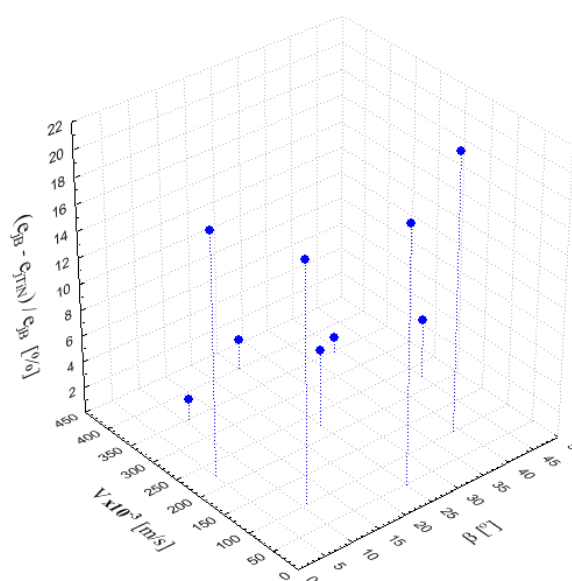
Rys. 6.6. Korelacja pomiędzy przyjętym modelem a wartościami pomiarów jednostkowej energochłonności procesu cięcia sera nożem z powłoką TiN

Otrzymany model matematyczny charakteryzuje się największym wpływem prędkości cięcia (wpływ liniowy) oraz mniejszym ale również istotnym, przy założonym poziomie istotności, wpływem kąta ostrza (wpływ potęgowy). Charakter zmian jednostkowej energochłonności procesu jest zbliżony do zmian energochłonności dla cięcia technologią podstawową.

Wyniki badań cięcia nożem pokrytym powłoką TiN odniesiono do wyników cięcia nożem bez powłoki. Tabela 6.3 przedstawia różnice $e_{jB} - e_{jTiN}$ uzyskane w poszczególnych punktach zastosowanego planu badań, odniesione do technologii cięcia nożem bez powłoki. Graficznie, różnice te zaprezentowano na rysunku 6.7. Przypadki, dla których obliczone różnice są statystycznie istotne, przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$, zaznaczono kolorem czerwonym.

Tab. 6.3. Wartości różnic energochłonności jednostkowej procesu dla technologii podstawowej i cięcia nożem z powłoką TiN

β [°]	$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jB} [J/m ²]	e_{jTiN} [J/m ²]	$\frac{e_{jB} - e_{jTiN}}{e_{jB}}$ [%]
10,9	101,3	664,4	543,3	18,2
25,0	50,0	485,3	390,5	19,5
25,0	400,0	868,6	848,6	2,3
10,9	348,7	911,5	897,6	1,5
5,0	225,0	1064,1	878,2	17,5
39,1	348,7	904,9	894,8	1,1
45,0	225,0	867,4	838,4	3,3
25,0	225,0	688,4	660,9	3,9
39,1	101,3	724,6	571,8	21,1
25,0	225,0	688,4	660,9	3,9



Rys. 6.7. Wartości uzyskanych różnic jednostkowej energochłonności procesu cięcia technologią podstawową oraz nożem z powłoką TiN

We wszystkich punktach planu badań technologia cięcia narzędziem z powłoką TiN spowodowała zmniejszenie jednostkowej energochłonności procesu. Największe wartości różnic uzyskano dla najmniejszych wartości prędkości cięcia. Różnice w tych punktach kształtowały się na poziomie 20%.

6.1.3. Cięcie sera nożem z powłoką AS48

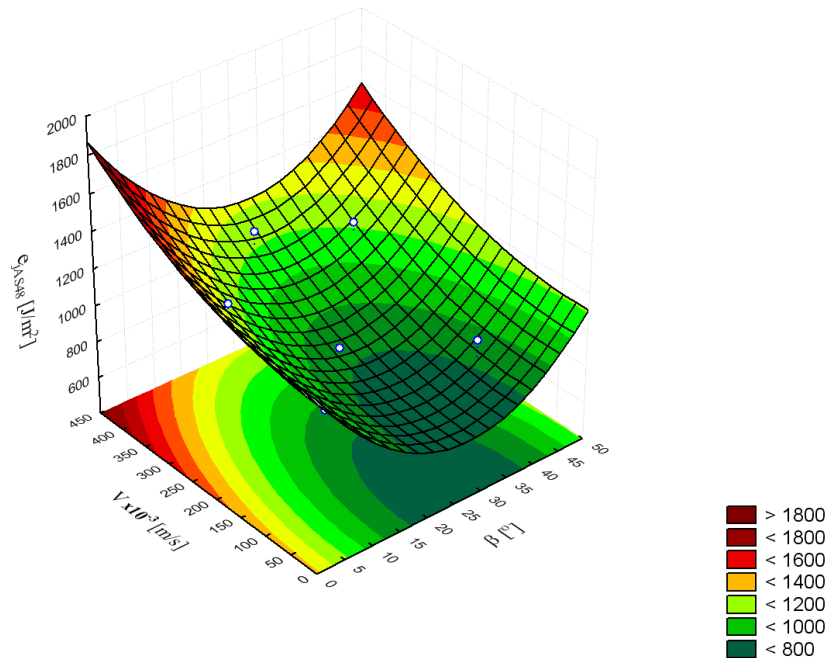
Rezultaty badań dotyczących cięcia nożem pokrytym powłoką o nazwie handlowej AS48 przedstawiono poniżej. Wyniki pomiarów jednostkowej energochłonności procesu cięcia dla macierzy zastosowanego planu badań przedstawiono w tabeli 6.4.

Tab. 6.4. Macierz planu badań wraz z odpowiadającymi jej wynikami jednostkowej energochłonności procesu cięcia sera nożem z powłoką AS48

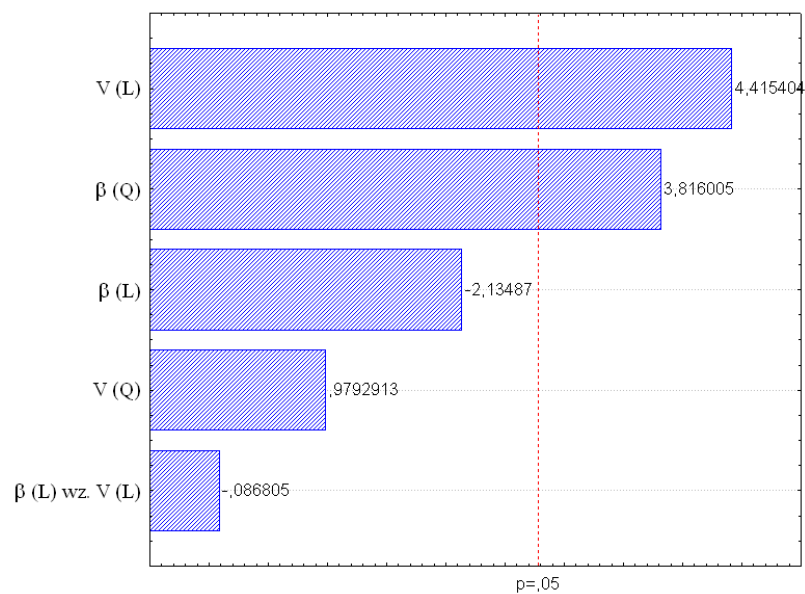
β [°]	$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jAS48} [J/m ²]	σe_{jAS48} [J/m ²]
10,9	101,3	923,2	59,74
25,0	50,0	684,5	30,96
25,0	400,0	1164,1	79,55
10,9	348,7	1156,6	85,65
5,0	225,0	1341,0	103,51
39,1	348,7	1125,7	73,90
45,0	225,0	987,5	79,13
25,0	225,0	833,5	68,61
39,1	101,3	908,0	103,07
25,0	225,0	833,5	68,61

Graficzna prezentacja wyników badań cięcia nożem z powłoką AS48 przedstawiona została na rysunku 6.8.

Podobnie jak w przypadku poprzednich dwóch technologii cięcia, na energochłonność jednostkową procesu istotnie wpływają obie wielkości wejściowe. Jak pokazuje wykres Pareto, przedstawiony na rysunku 6.9, prędkość cięcia ma największy wpływ na zmienną zależną.



Rys. 6.8. Wpływ kąta ostrza β oraz prędkości cięcia V sera na jednostkową energochłonność procesu cięcia e_{jAS48} , sera nożem z powłoką AS48

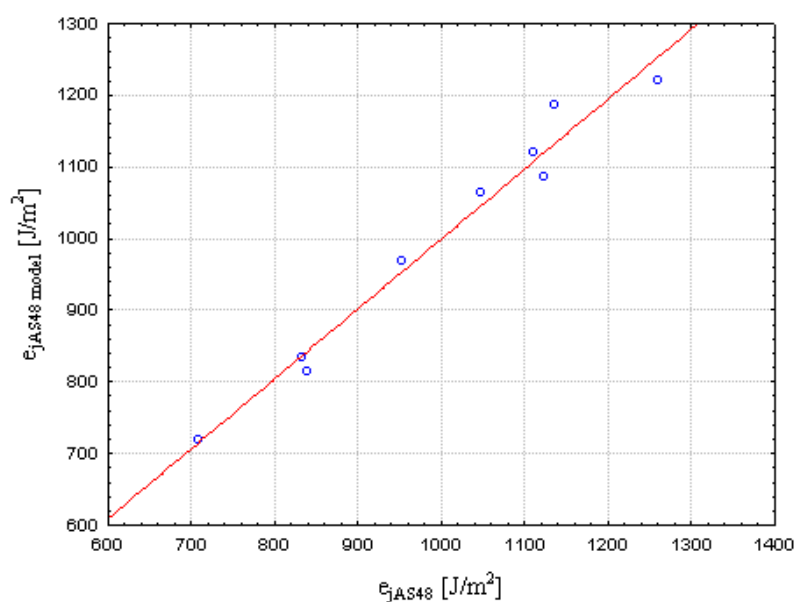


Rys. 6.9. Wykres Pareto istotności wpływu efektywności standaryzowanych wielkości wejściowych na e_{jAS48}

Równanie regresji kształtuje się następująco:

$$e_{jAS48} = 1326,18205 - 44,67264 \cdot \beta + 0,80701 \cdot \beta^2 - 20,323399 \cdot V + \\ + 2705,00281 \cdot V^2 - 2,24283 \cdot \beta V; \quad R^2=0,9073 \quad (6.3)$$

Wykres korelacji pomiędzy wartościami mierzonymi a aproksymowanymi, po sprawdzeniu poprawności modelu matematycznego testem Fishera, przedstawiono na rysunku 6.10.



Rys. 6.10. Korelacja pomiędzy przyjętym modelem a wartościami pomiarów e_{jAS48}

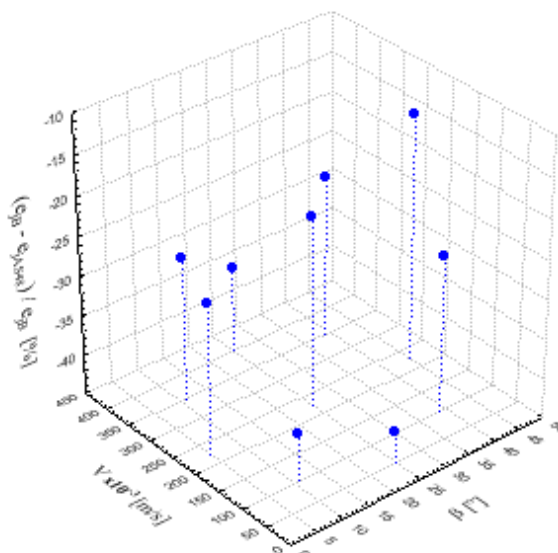
Analiza powyższych danych pokazuje, że energochłonność jednostkowa procesu cięcia narzędziem z powłoką AS48 zmienia się podobnie jak dwie poprzednio analizowane metody cięcia. Kształt uzyskanej powierzchni odpowiedzi jest zbliżony do dwóch wcześniej przedstawionych powierzchni. Również w tym przypadku najbardziej istotny wpływ na energochłonność procesu, przy założonym $\alpha=0,05$, ma prędkość cięcia.

Wyniki badań cięcia nożem pokrytym powłoką AS48 odniesiono do wyników cięcia nożem bez powłoki. Tabela 6.5 przedstawia różnice $e_{jB} - e_{jAS48}$ uzyskane w poszczególnych punktach zastosowanego planu badań, odniesione do technologii cięcia nożem bez powłoki. Graficznie, różnice te zaprezentowano na rysunku 6.11. Przypadki, dla których obliczone różnice są statystycznie istotne, przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$, zaznaczono kolorem czerwonym.

Tab. 6.5. Wartości różnic energochłonności jednostkowej procesu dla technologii podstawowej i cięcia nożem z powłoką AS48

β [°]	$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jB} [J/m ²]	e_{jAS48} [J/m ²]	$\frac{e_{jB} - e_{jAS48}}{e_{jB}}$ [%]
10,9	101,3	664,4	923,2	-38,9
25,0	50,0	485,3	684,5	-41,0
25,0	400,0	868,6	1164,1	-34,0
10,9	348,7	911,5	1156,6	-26,9
5,0	225,0	1064,1	1341,0	-26,0
39,1	348,7	904,9	1125,7	-24,4
45,0	225,0	867,4	987,5	-13,8
25,0	225,0	688,4	833,5	-21,1
39,1	101,3	724,6	908,0	-25,3
25,0	225,0	688,4	833,5	-21,1

Różnice jednostkowej energochłonności procesu przedstawione w tabeli 6.5 są statystycznie istotne. Jednak technologia ta spowodowała wzrost jednostkowej energochłonności procesu cięcia sera w stosunku do technologii podstawowej dla wszystkich punktów planu badań. Prędkość cięcia wynosząca 0,225 m/s charakteryzowała się najmniejszą zmianą wartości energochłonności procesu w stosunku do podstawowej technologii cięcia.



Rys. 6.11. Wartości uzyskanych różnic jednostkowej energochłonności procesu cięcia technologią podstawową oraz nożem z powłoką AS48

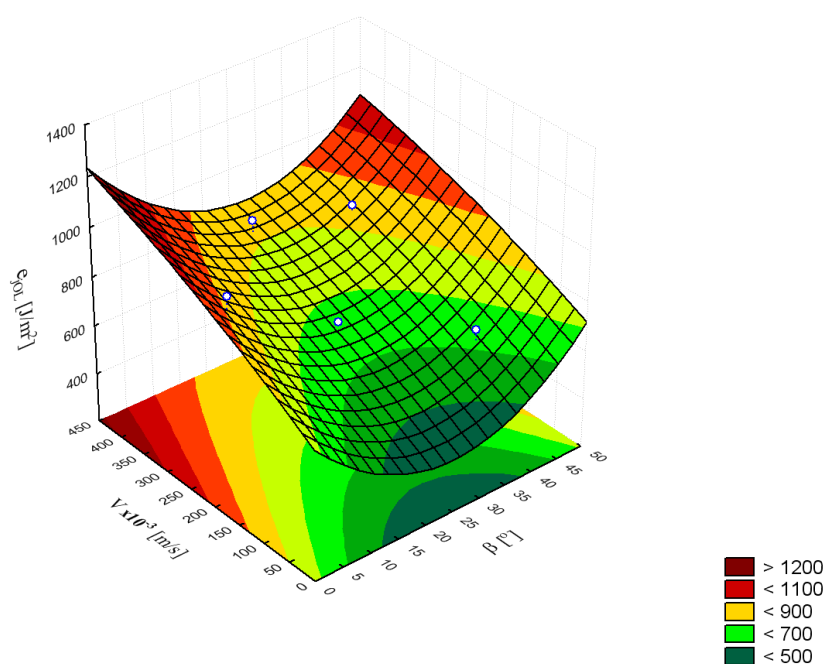
6.1.4. Cięcie sera z zastosowaniem smarowania noża

Kolejną technologią cięcia, prowadzoną w celu weryfikacji postawionych tez, było nanoszenie środka smarnego na narzędzie. Rezultaty badań wykorzystujących tę technologię przedstawiono w tabeli 6.6.

Powierzchnia odpowiedzi wygenerowana na podstawie wyników zamieszczonych w tabeli 6.6 przedstawiona została na rysunku 6.12.

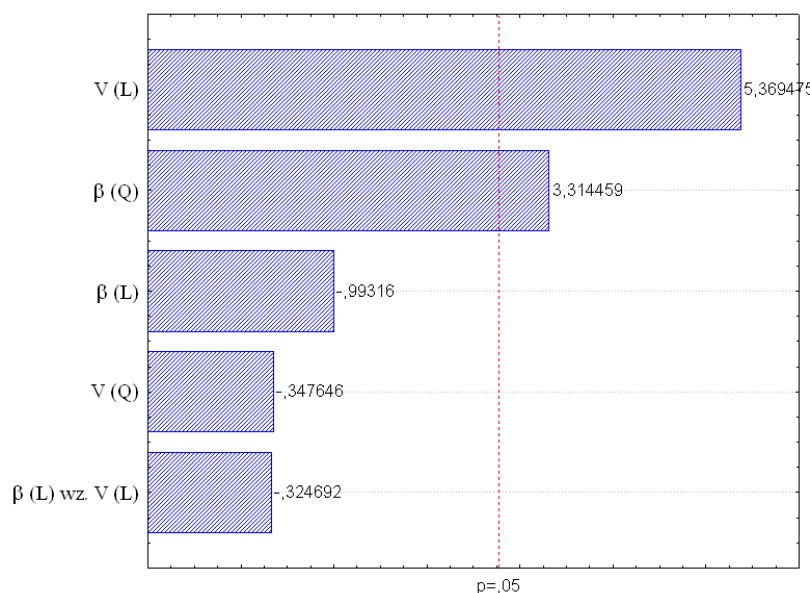
Tab. 6.6. Macierz planu badań wraz z odpowiadającymi jej wynikami jednostkowej energochłonności procesu cięcia sera nożem z nanoszonym środkiem smarnym

β [°]	$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jOL} [J/m ²]	σ e_{jOL} [J/m ²]
10,9	101,3	604,8	43,85
25,0	50,0	472,2	73,23
25,0	400,0	854,8	81,81
10,9	348,7	837,3	70,77
5,0	225,0	967,4	88,35
39,1	348,7	849,5	33,23
45,0	225,0	794,8	52,18
25,0	225,0	668,7	88,38
39,1	101,3	658,3	56,01
25,0	225,0	668,7	88,38



Rys. 6.12. Wpływ kąta ostrza β oraz prędkości cięcia V na jednostkową energochłonność procesu cięcia sera, nożem z nanoszonym środkiem smarnym

Wykres Pareto wpływu standaryzowanych wielkości wejściowych na jednostkową energochłonność procesu dla zastosowanej technologii cięcia przedstawia rysunek 6.13.

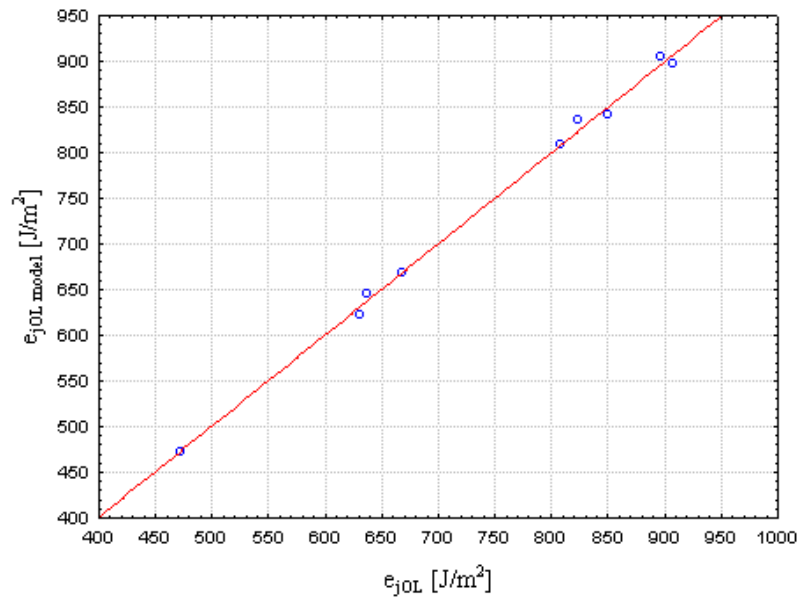


Rys. 6.13. Wykres Pareto istotności wpływu efektów standaryzowanych wielkości wejściowych na e_{jOL}

Wykres Pareto pokazuje istotny na poziomie $\alpha=0,05$ wpływ prędkości cięcia (wpływ o charakterze liniowym) oraz kąta ostrza noża (potęgowy charakter wpływu). Równanie regresji dla tej technologii przyjmuje postać:

$$e_{jOL} = 722,91108 - 24,61937 \cdot \beta + 0,48736 \cdot \beta^2 + 1454,763379 \cdot V - 739,82087 \cdot V^2 - 5,892857 \cdot \beta V; \quad R^2 = 0,9177 \quad (6.4)$$

Adekwatność modelu sprawdzona została testem Fishera. Wykres korelacji wartości pomiarów z wartościami modelu matematycznego przedstawia rysunek 6.14.



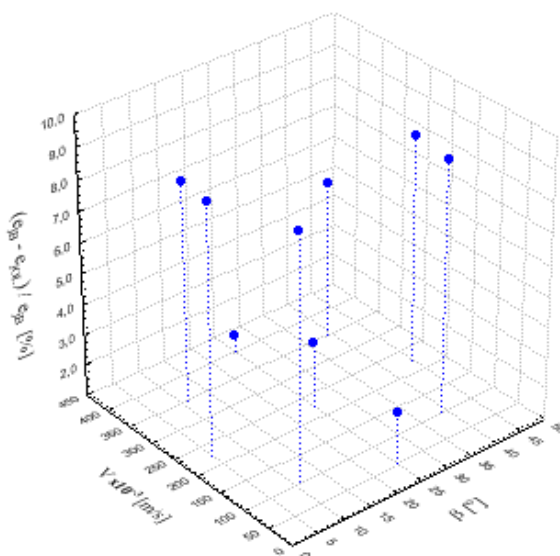
Rys. 6.14. Korelacja pomiędzy przyjętym modelem a wartościami pomiarów e_{jOL}

W przypadku zastosowanie technologii cięcia polegającej na pokrywaniu narzędzia środkiem smarnym uzyskano odpowiedź układu o charakterze zbliżonym do innych przedstawionych wcześniej technologii. Najbardziej istotny wpływ na energochłonność procesu ma również w tym przypadku prędkość cięcia.

Wyniki badań cięcia nożem smarowanym olejem rzepakowym także odniesiono do wyników cięcia technologią podstawową. Tabela 6.7 przedstawia różnice $e_{jB} - e_{jOL}$ uzyskane w poszczególnych punktach zastosowanego planu badań. Graficznie, różnice te zaprezentowano na rysunku 6.15. Przypadki, dla których obliczone różnice są statystycznie istotne, przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$, zaznaczono kolorem czerwonym.

Tab. 6.7. Wartości różnic energochłonności jednostkowej procesu dla technologii podstawowej i cięcia nożem smarowanym olejem rzepakowym

β [°]	$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jB} [J/m ²]	e_{jOL} [J/m ²]	$\frac{e_{jB} - e_{jOL}}{e_{jB}}$ [%]
10,9	101,3	664,4	604,8	9,0
25,0	50,0	485,3	472,2	2,7
25,0	400,0	868,6	854,8	1,6
10,9	348,7	911,5	837,3	8,1
5,0	225,0	1064,1	967,4	9,1
39,1	348,7	904,9	849,5	6,1
45,0	225,0	867,4	794,8	8,4
25,0	225,0	688,4	668,7	3,1
39,1	101,3	724,6	658,3	9,2
25,0	225,0	688,4	668,7	3,1



Rys. 6.15. Wartości uzyskanych różnic jednostkowej energochłonności procesu cięcia technologią podstawową oraz nożem smarowanym olejem rzepakowym

Analiza zaprezentowanych powyżej rezultatów badań pokazuje korzystny wpływ zastosowania tej technologii w stosunku do technologii podstawowej. Wartość energochłonności procesu zmniejszyła się nieznacznie w przypadku cięcia narzędziem o kącie ostrza 25°. Pomimo tego, iż różnice nie okazały się być istotne statystycznie przy założonym $\alpha=0,05$, to wartości tych różnic na

poziomie 9% wydają się być istotna z punktu widzenia praktycznego wykorzystania ocenianej technologii.

6.1.5. Technologia cięcia sera drutem

Ostatnią prowadzoną metodą cięcia było cięcie drutem. Jediną zmienną, której wpływ oceniano, była prędkość cięcia. Wyniki procesu cięcia przedstawiono w tabeli 6.8.

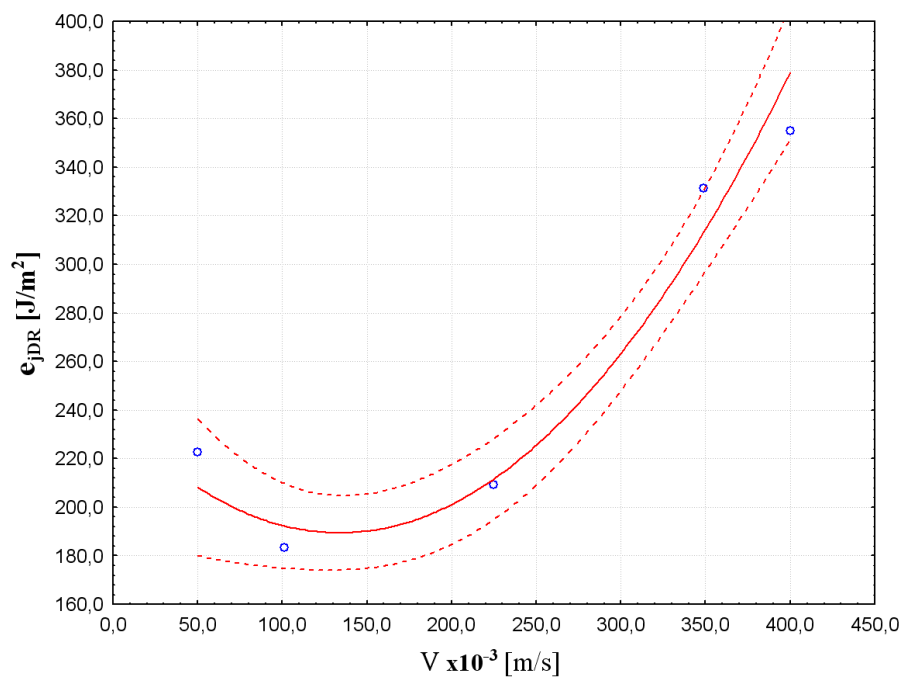
Tab. 6.8. Wyniki badań procesu cięcia sera drutem

$V \cdot 10^{-3}$ [m/s]	e_{jDR} [J/m ²]	σ e_{jDR} [J/m ²]
50,0	222,6	10,66
101,3	183,5	39,43
225,0	209,3	31,47
348,7	331,4	47,52
400,0	355,1	45,59

Wyniki prowadzonych badań poddano analizie regresji. Sporządzono krzywą regresji wpływu prędkości cięcia na jednostkową energochłonność procesu., którą przedstawiono na rysunku 6.16.

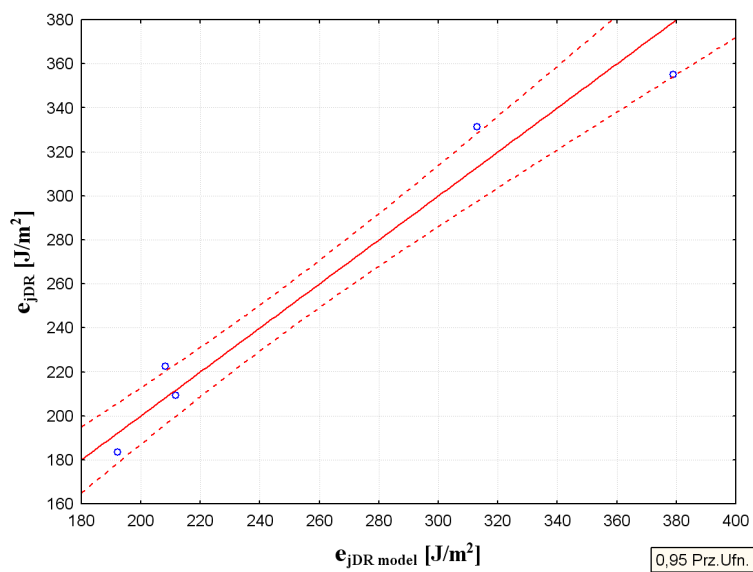
Równanie regresji dla powyższych zmiennych przyjmuje postać:

$$e_{jDR} = 237,2352 - 715,031 \cdot V + 2673,851 \cdot V^2; \quad R^2 = 0,9594 \quad (6.5)$$



Rys. 6.16. Wykres przedstawiający wpływ prędkości cięcia sera drutem na jednostkową energochłonność procesu

Wykres 6.17 przedstawia korelację wartości otrzymanych z pomiarów z wartościami modelu matematycznego.



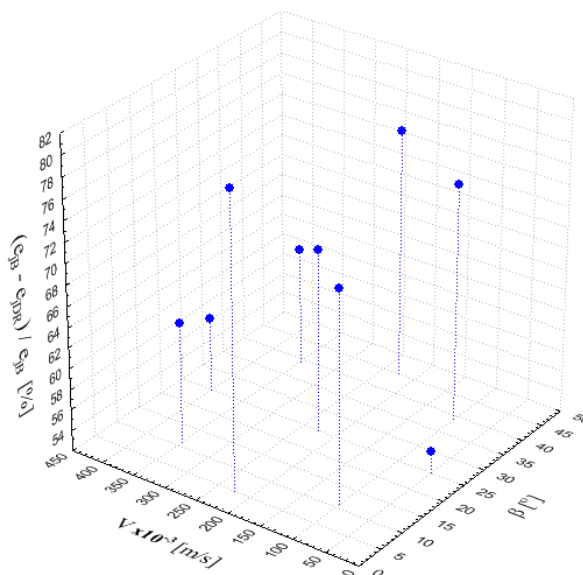
Rys. 6.17. Korelacja pomiędzy przyjętym modelem a wartościami pomiarów e_{jDR}

Równanie regresji opisujące proces cięcia sera drutem mało charakter wielomianu stopnia drugiego. Dla badanych wartości zmiennej niezależnej V najniższą wartością energochłonności procesu charakteryzowało się cięcie z prędkością 0,1013 m/s.

Wyniki badań cięcia drutem także odniesiono do wyników cięcia technologią podstawową. Tabela 6.9 przedstawia różnice $e_{jB} - e_{jDR}$ uzyskane w poszczególnych punktach zastosowanego planu badań. Graficznie, różnice te zaprezentowano na rysunku 6.18. Przypadki, dla których obliczone różnice są statystycznie istotne, przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$, zaznaczono kolorem czerwonym.

Tab. 6.9. Wartości różnic energochłonności jednostkowej procesu dla technologii podstawowej i technologii cięcia sera drutem

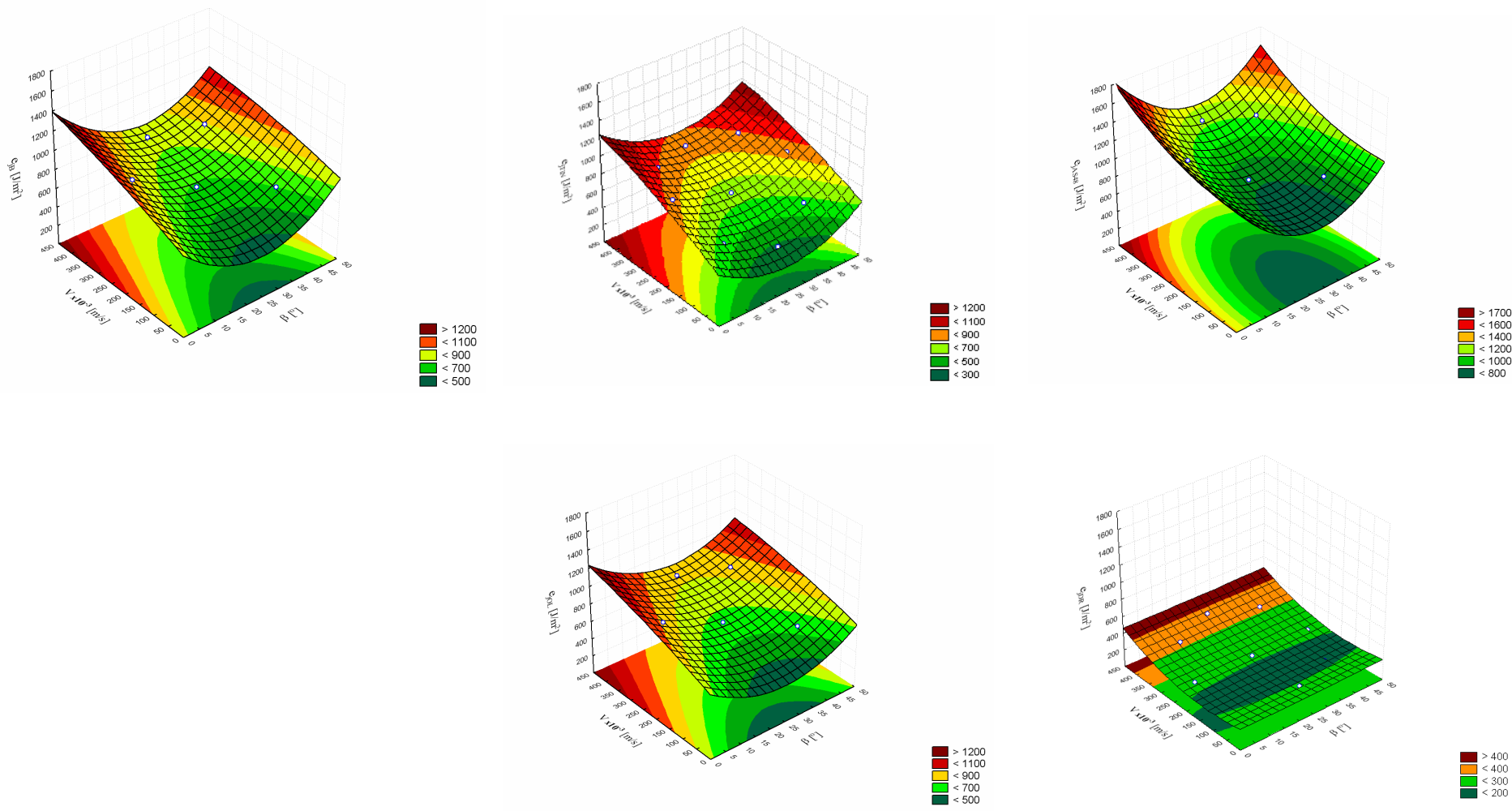
β [°]	$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jB} [J/m ²]	e_{jDR} [J/m ²]	$\frac{e_{jB} - e_{jDR}}{e_{jB}}$ [%]
10,9	101,3	664,4	183,5	72,4
25,0	50,0	485,3	222,6	54,1
25,0	400,0	868,6	355,1	59,1
10,9	348,7	911,5	331,4	63,6
5,0	225,0	1064,1	209,3	80,3
39,1	348,7	904,9	331,4	63,4
45,0	225,0	867,4	209,3	75,9
25,0	225,0	688,4	209,3	69,6
39,1	101,3	724,6	183,5	74,7
25,0	225,0	688,4	209,3	69,6



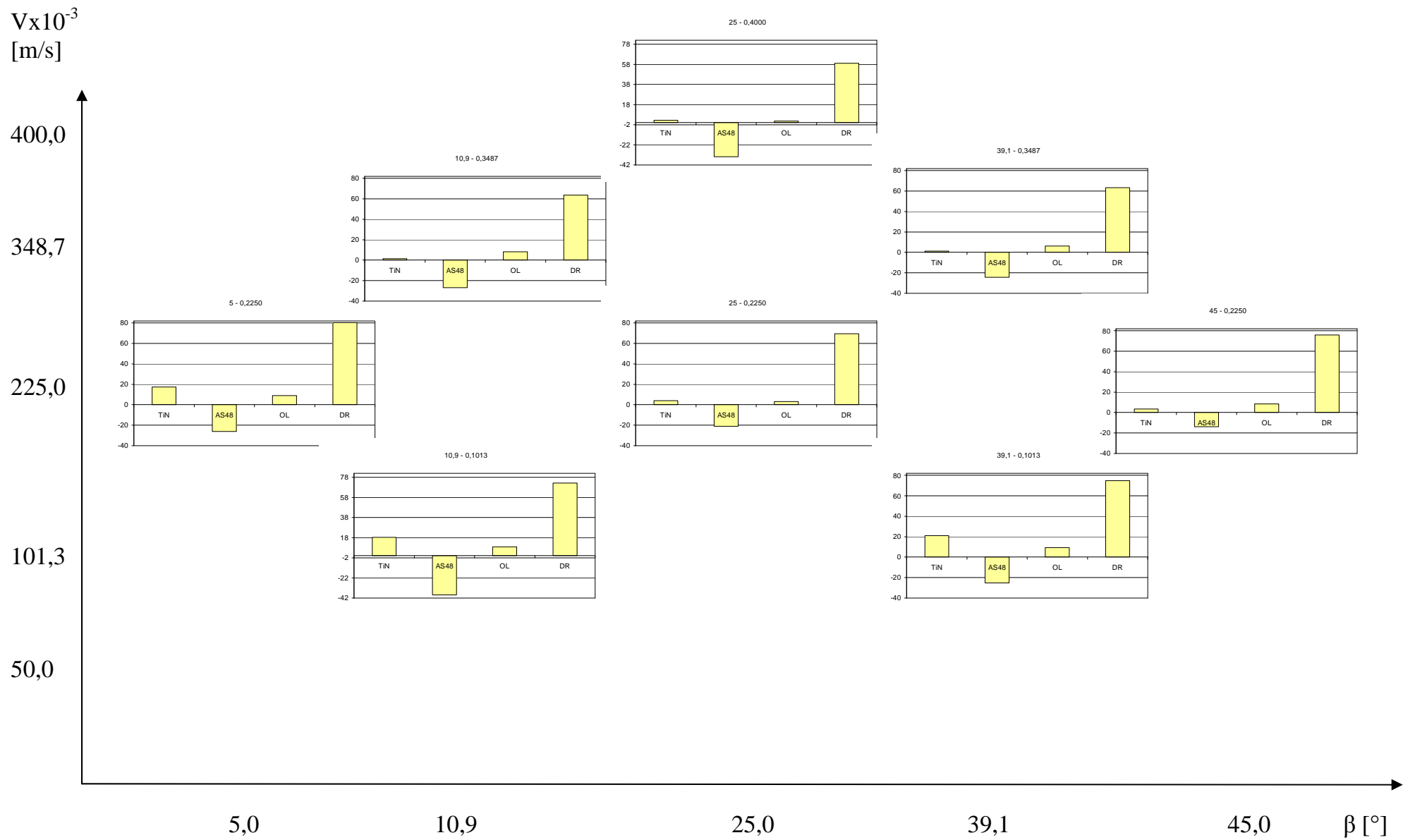
Rys. 6.18. Wartości uzyskanych różnic jednostkowej energochłonności procesu cięcia sera technologią podstawową oraz technologią cięcia drutem

Zastosowana technologia okazała się być najmniej energochłonną spośród analizowanych. Różnice jednostkowej energochłonności procesu w odniesieniu do technologii podstawowej zawierały się pomiędzy 54% a 80%. Największe korzyści uzyskano podczas cięcia z prędkością 0,225 m/s, najmniejsze zaś dla prędkości 0,050 m/s.

Rysunek 6.19 prezentuje wszystkie wygenerowane powierzchnie odpowiedzi uzyskane podczas cięcia sera różnymi technologiami. Natomiast na rysunku 6.20 zaprezentowano wartości osiąganych różnic jednostkowej energochłonności procesu cięcia sera we wszystkich punktach planu badań.



Rys. 6.19. Wykres przedstawiający wszystkie powierzchnie odpowiedzi dla prowadzonych technologii cięcia sera



Rys. 6.20. Wykres przedstawiający różnice procentowe energochłonności procesu cięcia sera we wszystkich punktach planu badań w odniesieniu do podstawowej technologii

W przypadku sera stwierdzono, że największe korzyści w postaci zmniejszenia energochłonności procesu, uzyskano technologią cięcia drutem. Wartość różnicy zmienia się od 54,1% do 80,3%.

Technologią cięcia sera nożem z powłoką TiN spowodowała różnicę energochłonności sięgającą 21,1%. Różnice na tym poziomie osiągnięto dla czterech punktów planu badań.

Cięcie sera nożem z powłoką AS48 spowodowało we wszystkich punktach planu podwyższenie jednostkowej energochłonności procesu.

Różnice osiągnięte dla technologii z zastosowaniem smarowania narzędzia nie okazały się być istotne statystycznie pomimo, iż w pięciu punktach planu badań osiągały wartości około 9%.

6.2. Wyniki badań energochłonności jednostkowej procesu cięcia marchwi

6.2.1. Cięcie marchwi technologią podstawową

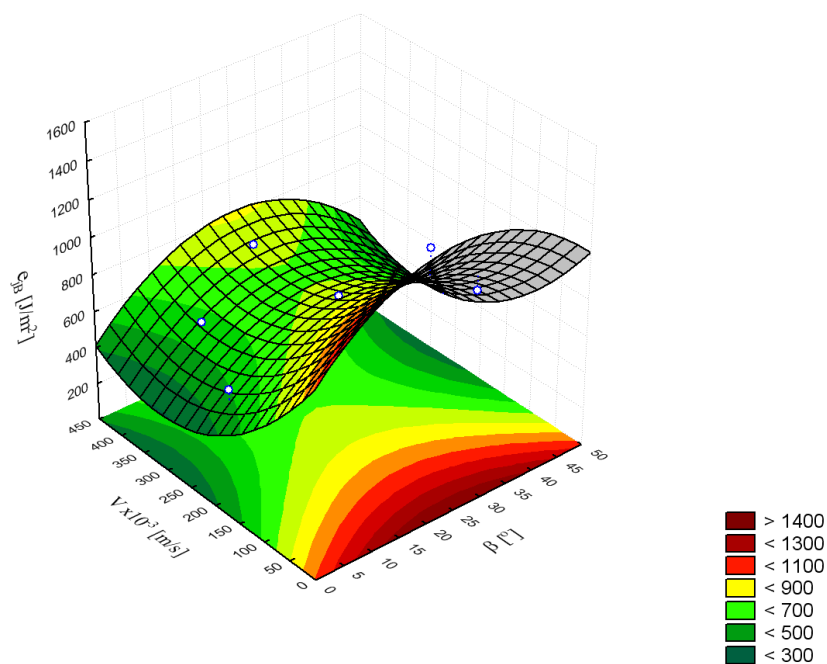
Tabela 6.10 zawiera wyniki obliczeń jednostkowej energochłonności procesu cięcia marchwi technologią podstawową.

Tab. 6.10. Macierz planu badań wraz z odpowiadającymi jej wynikami jednostkowej energochłonności procesu cięcia marchwi technologią podstawową

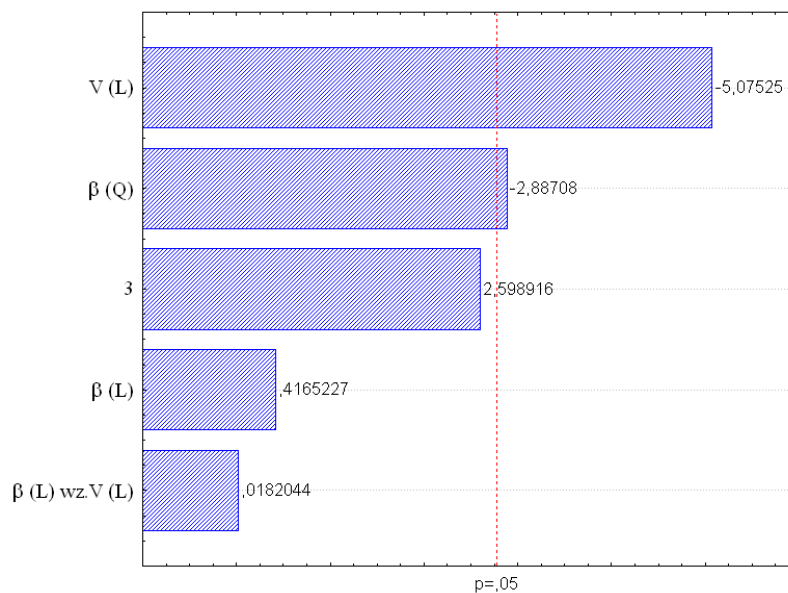
β [°]	$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jB} [J/m ²]	σe_{jB} [J/m ²]
10,9	101,3	817,7	42,66
25,0	50,0	1306,0	36,91
25,0	400,0	728,6	52,12
10,9	348,7	576,6	20,79
5,0	225,0	513,6	39,62
39,1	348,7	574,0	43,57
45,0	225,0	594,7	34,72
25,0	225,0	752,5	56,78
39,1	101,3	811,9	48,82
25,0	225,0	752,5	56,78

Powierzchnię odpowiedzi dla powyższych danych przedstawiono na rysunku 6.21.

Wykres Pareto wpływu standaryzowanych wielkości wejściowych na jednostkową energochłonność procesu dla zastosowanej technologii cięcia przedstawia rysunek 6.22.



Rys. 6.21. Wykres przedstawiający jednostkową energochłonność procesu cięcia marchwi technologią podstawową



Rys. 6.22. Wykres Pareto istotności wpływu efektów standaryzowanych wielkości wejściowych na e_B

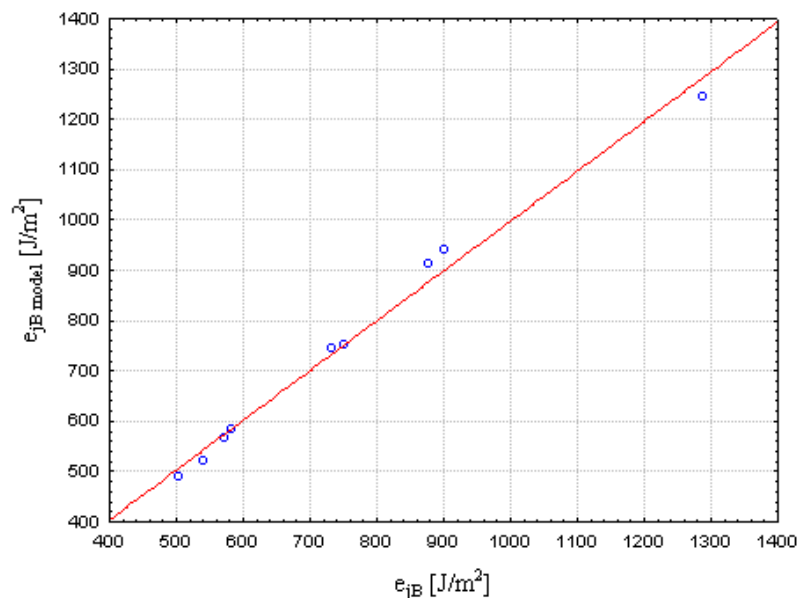
Jak wynika z wykresu Pareto, przedstawionym na rysunku 6.22, zarówno prędkość cięcia jak i kąt ostrza narzędzia mają istotny (dla $\alpha=0,05$) wpływ na jednostkową energochłonność procesu cięcia marchwi podstawową technologią.

Równanie regresji opisujące powyższe zależności przyjmuje postać:

$$e_{jB} = 1008,02381 + 31,30172 \cdot \beta - 0,60935 \cdot \beta^2 - 4544,49768 \cdot V + 7164,48158 \cdot V^2 + 0,469427 \cdot \beta V; \quad R^2 = 0,92895 \quad (6.6)$$

Adekwatność równania 6.6 sprawdzono testem Fishera.

Poprawność przyjętego modelu matematycznego opisującego powyższą zależność potwierdza przedstawiona na rysunku 6.23 korelacja wartości aproksymowanych z wartościami pomiarów jednostkowej energochłonności procesu cięcia.



Rys. 6.23. Korelacja pomiędzy przyjętym modelem a wartościami pomiarów e_{jB}

Analiza wpływu kąta ostrza β oraz prędkości cięcia V na jednostkową energochłonność procesu e_{jB} podczas cięcia marchwi podstawową technologią pokazała, że dla każdej prędkości cięcia (z badanego zakresu) największą energochłonnością charakteryzował się proces prowadzony narzędziem o kącie ostrza 25° .

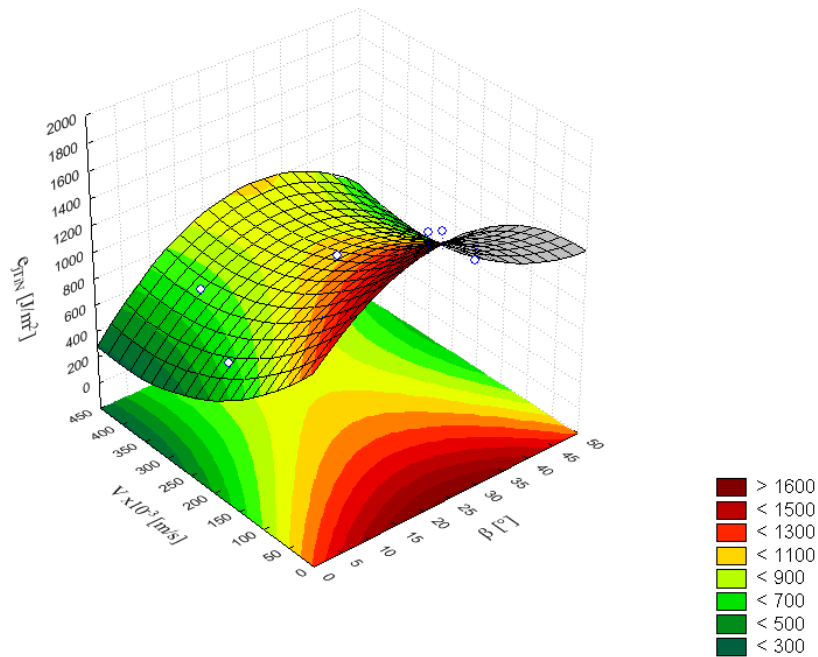
6.2.2. Cięcie marchwi nożem pokrytym powłoką TiN

Badania jednostkowej energochłonności cięcia marchwi z wykorzystaniem technologii cięcia narzędziem pokrytym powłoką TiN prowadzono zgodnie z planem badań, którego macierz przedstawiono w tabeli 6.11.

Tab. 6.11. Macierz planu badań wraz z odpowiadającymi jej wynikami jednostkowej energochłonności procesu cięcia marchwi nożem z powłoką TiN

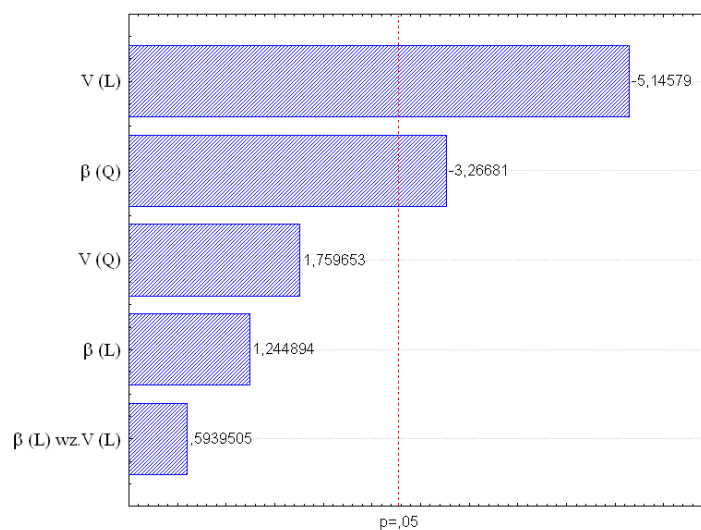
β [°]	$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jTiN} [J/m ²]	σe_{jTiN} [J/m ²]
10,9	101,3	1129,0	48,92
25,0	50,0	1644,2	45,10
25,0	400,0	927,3	47,08
10,9	348,7	770,1	43,65
5,0	225,0	638,6	38,35
39,1	348,7	845,4	51,71
45,0	225,0	898,5	49,26
25,0	225,0	1068,4	51,14
39,1	101,3	1071,6	52,51
25,0	225,0	1068,4	51,14

Na podstawie powyższych wyników wygenerowano powierzchnię odpowiedzi, którą przedstawia rysunek 6.24.



Rys. 6.24. Wykres przedstawiający jednostkową energochłonność procesu cięcia marchwi nożem z powłoką TiN

Wykres Pareto wpływu standaryzowanych wielkości wejściowych na jednostkową energochłonność procesu dla zastosowanej technologii cięcia przedstawia rysunek 6.25.

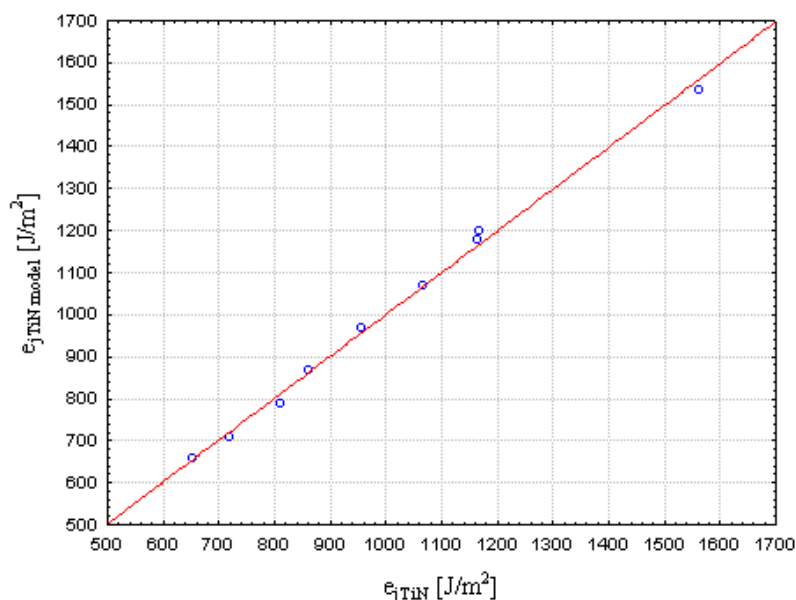


Rys. 6.25. Wykres Pareto istotności wpływu efektów standaryzowanych wielkości wejściowych na e_{TiN}

Wykres Pareto pokazuje istotny na poziomie $\alpha=0,05$ wpływ prędkości cięcia oraz kąta ostrza noża. Równanie regresji przyjmuje postać:

$$e_{jTiN} = 1225,78845 + 41,24354 \cdot \beta - 0,840403 \cdot \beta^2 - 4744,705243 \cdot V + 5912,55832 \cdot V^2 + 18,66797 \cdot \beta V; \quad R^2 = 0,92765 \quad (6.7)$$

Adekwatność modelu, sprawdzona testem Fishera, zaprezentowana została graficznie w postaci wykresu korelacji wartości pomiarów z wartościami modelu matematycznego. Wykres ten przedstawia rysunek 6.26.



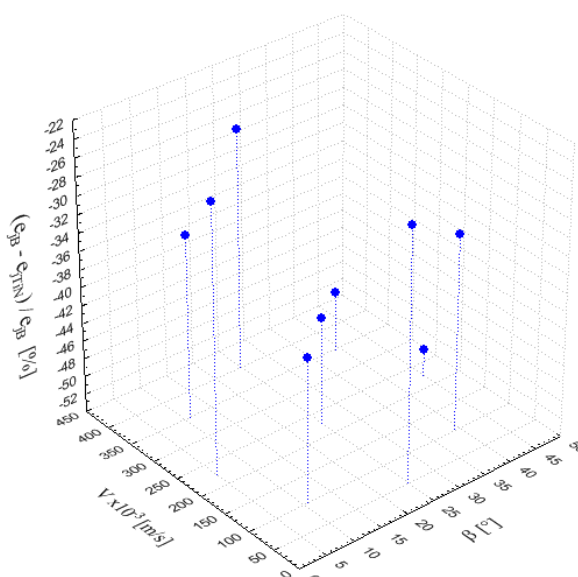
Rys. 6.26. Korelacja pomiędzy przyjętym modelem a wartościami pomiarów e_{jTiN}

Otrzymany model matematyczny charakteryzuje się największym wpływem prędkości cięcia (wpływ liniowy) oraz mniejszym ale również istotnym, przy założonym poziomie istotności, wpływem kąta ostrza (wpływ potęgowy).

Tabela 6.12 przedstawia różnice $e_{jB} - e_{jTiN}$ uzyskane w poszczególnych punktach zastosowanego planu badań, odniesione do technologii podstawowej. Graficznie, różnice te zaprezentowano na rysunku 6.27. Przypadki, dla których obliczone różnice są statystycznie istotne, przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$, zaznaczono kolorem czerwonym.

Tab. 6.12. Wartości różnic energochłonności jednostkowej procesu dla technologii podstawowej i technologii cięcia marchwi nożem z powłoką TiN

β [°]	$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jB} [J/m ²]	e_{jTiN} [J/m ²]	$\frac{e_{jB} - e_{jTiN}}{e_{jB}}$ [%]
10,9	101,3	817,7	1129,0	-38,1
25,0	50,0	1306,0	1644,2	-25,9
25,0	400,0	728,6	927,3	-27,3
10,9	348,7	576,6	770,1	-33,6
5,0	225,0	513,6	638,6	-24,3
39,1	348,7	574,0	845,4	-47,3
45,0	225,0	594,7	898,4	-51,1
25,0	225,0	752,6	1068,4	-41,9
39,1	101,3	811,9	1073,6	-32,2
25,0	225,0	752,6	1068,4	-41,9



Rys. 6.27. Wartości uzyskanych różnic jednostkowej energochłonności procesu cięcia marchwi narzędziem pokrytym powłoką TiN

Zaobserwowane różnice energochłonności procesu cięcia pomiędzy podstawową technologią a cięciem nożem pokrytym powłoką TiN okazały się być statystycznie istotne. Otrzymane różnice są jednak niekorzystne z punktu widzenia zmniejszania energochłonności procesu. Podczas cięcia marchwi nożem o kącie ostrza 25° z prędkością 0,4 m/s energochłonność procesu wzrosła o ponad 50%.

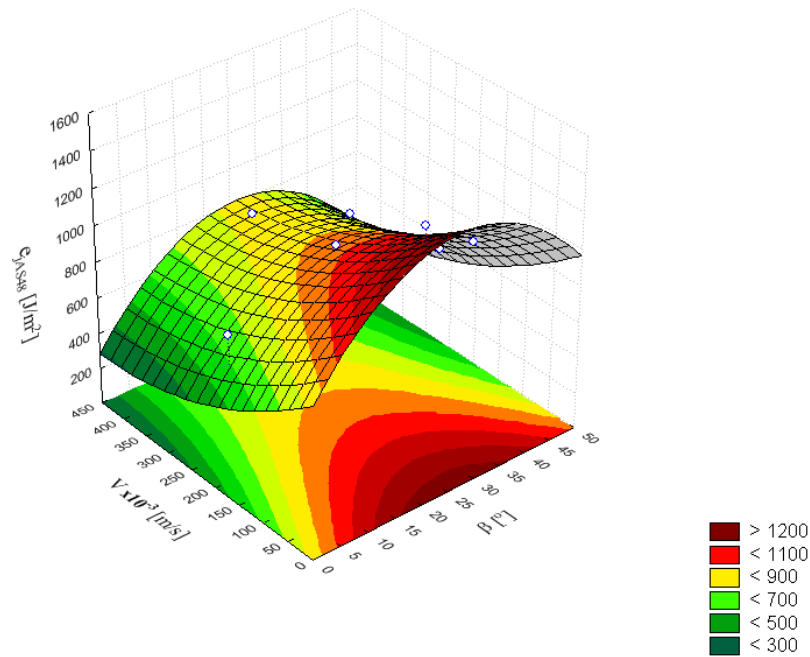
6.2.3. Cięcie marchwi nożem pokrytym powłoką AS48

Rezultaty badań dotyczących cięcia nożem pokrytym powłoką AS48 przedstawiono poniżej. Wyniki pomiarów jednostkowej energochłonności procesu cięcia dla macierzy zastosowanego planu badań przedstawiono w tabeli 6.13.

Tab. 6.13. Macierz planu badań wraz z odpowiadającymi jej wynikami jednostkowej energochłonności procesu cięcia marchwi nożem z powłoką AS48

β [°]	$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jAS48} [J/m ²]	σe_{jAS48} [J/m ²]
10,9	101,3	839,2	59,15
25,0	50,0	1358,2	85,16
25,0	400,0	834,2	59,15
10,9	348,7	585,3	35,12
5,0	225,0	731,9	35,78
39,1	348,7	744,1	60,00
45,0	225,0	679,7	76,58
25,0	225,0	958,7	85,80
39,1	101,3	1006,8	87,72
25,0	225,0	958,7	85,80

Powierzchnię odpowiedzi wygenerowaną na podstawie wyników zamieszczonych w tabeli przedstawiono na rysunku 6.28.



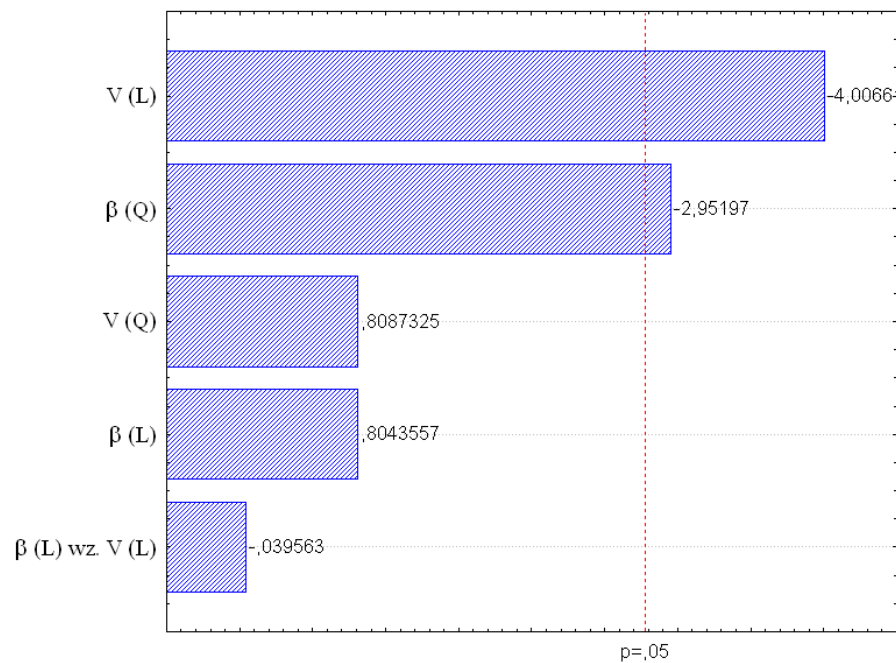
Rys. 6.28. Wykres przedstawiający jednostkową energochłonność procesu cięcia marchwi nożem z powłoką AS48

Podobnie jak w przypadku poprzednich analizowanych technologii cięcia marchwi, na energochłonność jednostkową procesu istotnie wpływają obie wielkości wejściowe. Jak pokazuje wykres Pareto, przedstawiony na rysunku 6.29, prędkość cięcia ma największy wpływ na zmienną zależną.

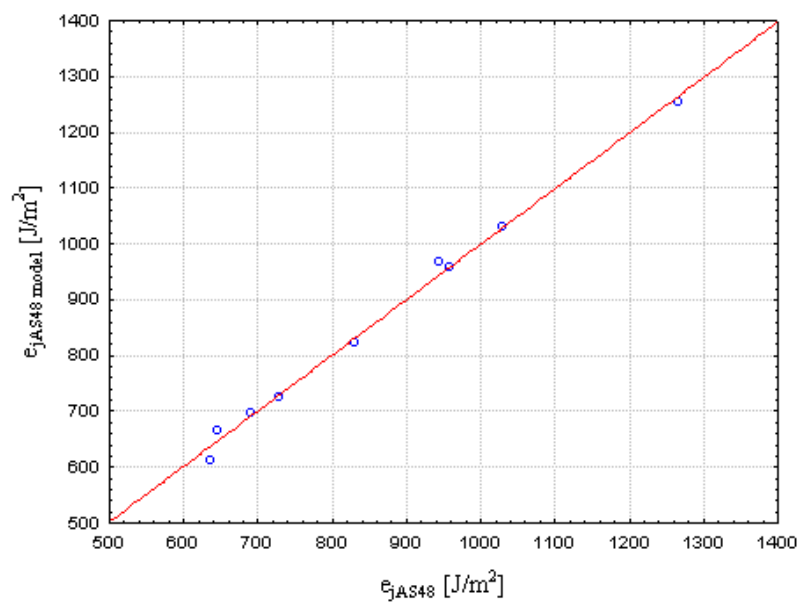
Równanie regresji kształtuje się następująco:

$$e_{jAS48} = 841,64488 + 40,82172 \cdot \beta - 0,76615 \cdot \beta^2 - 2472,81429 \cdot V + 2741,53273 \cdot V^2 - 1,25451 \cdot \beta V; \quad R^2 = 0,88467 \quad (6.8)$$

Wykres korelacji pomiędzy wartościami mierzonymi a aproksymowanymi, po sprawdzeniu poprawności modelu matematycznego testem Fishera, przedstawiono na rysunku 6.30.



Rys. 6.29. Wykres Pareto istotności wpływu efektów standaryzowanych wielkości wejściowych na e_{jAS48}



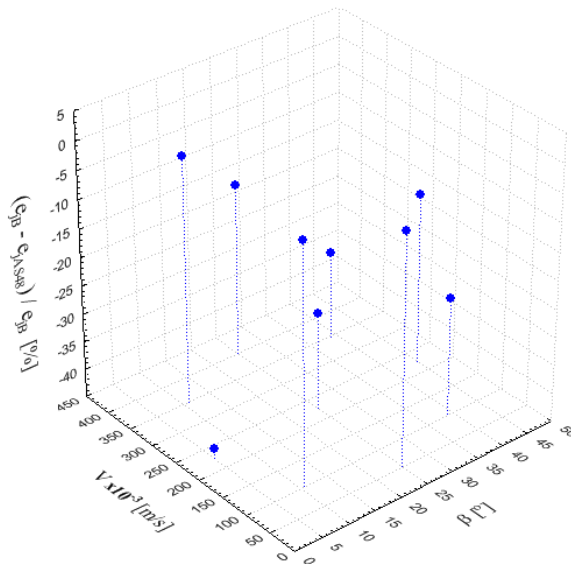
Rys. 6.30. Korelacja pomiędzy przyjętym modelem a wartościami pomiarów e_{jAS48}

Powierzchnię charakteryzującą energochłonność procesu cięcia nożem z powłoką AS48 cechuje istotny wpływ prędkości cięcia oraz kąta ostrza noża. Największa energochłonność procesu występuje podczas cięcia materiału nożem o kącie ostrza 25° z najmniejszą przewidzianą w planie badań prędkością.

Wyniki badań cięcia nożem pokrytym powłoką AS48 odniesiono do wyników cięcia nożem bez powłoki. Tabela 6.14 zawiera różnice $e_{jB} - e_{jAS48}$ uzyskane w poszczególnych punktach zastosowanego planu badań. Graficznie, różnice te zaprezentowano na rysunku 6.31. Przypadki, dla których obliczone różnice są statystycznie istotne, przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$, zaznaczono kolorem czerwonym.

Tab. 6.14. Wartości różnic energochłonności jednostkowej procesu dla technologii podstawowej i technologii cięcia marchwi nożem z powłoką AS48

β [°]	$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jB} [J/m ²]	e_{jAS48} [J/m ²]	$\frac{e_{jB} - e_{jAS48}}{e_{jB}}$ [%]
10,9	101,3	817,7	839,2	-2,6
25,0	50,0	1306,0	1358,2	-3,9
25,0	400,0	728,6	834,2	-14,5
10,9	348,7	576,6	585,3	-1,5
5,0	225,0	513,6	731,9	-42,5
39,1	348,7	574,0	744,1	-29,6
45,0	225,0	594,7	679,7	-14,3
25,0	225,0	752,6	958,7	-27,4
39,1	101,3	811,9	1006,8	-24,0
25,0	225,0	752,6	958,7	-27,4



Rys. 6.31. Wartości uzyskanych różnic jednostkowej energochłonności procesu cięcia marchwi narzędziem pokrytym powłoką AS48

Podobnie jak w przypadku cięcia marchwi nożem z powłoką TiN tak i podczas cięcia nożem z powłoką AS48 zauważono niekorzystny wpływ zastosowanej powłoki na energochłonność procesu cięcia. Różnice te wynoszą nawet 40% w stosunku do cięcia technologią podstawową.

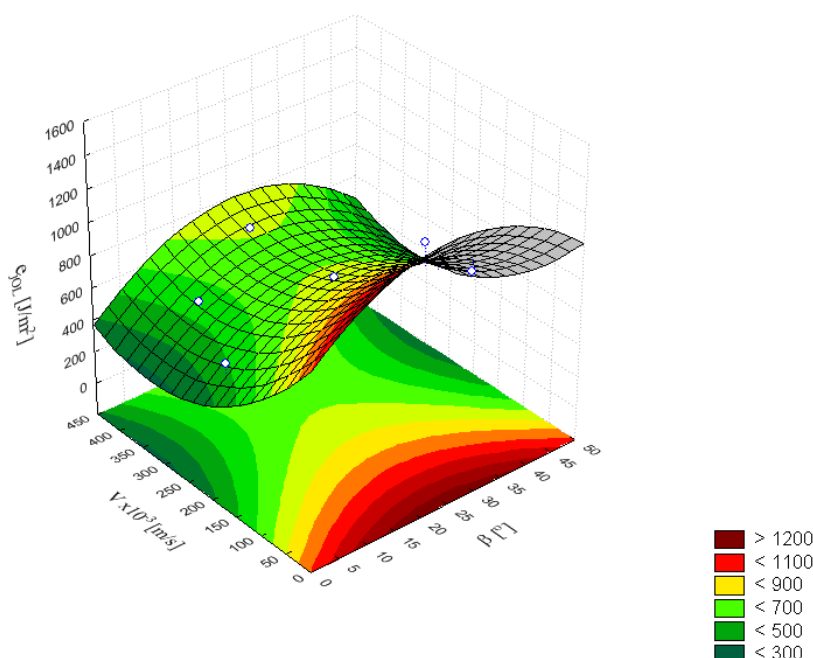
6.2.4. Cięcie marchwi z zastosowaniem smarowania noża

Następną technologią cięcia, prowadzoną w celu weryfikacji postawionych tez, było nanoszenie środka smarnego na narzędzie. Rezultaty badań wykorzystujących tę technologię przedstawiono w tabeli 6.15.

Tab. 6.15. Macierz planu badań wraz z odpowiadającymi jej wynikami jednostkowej energochłonności procesu cięcia marchwi nożem z nanoszonym środkiem smarnym

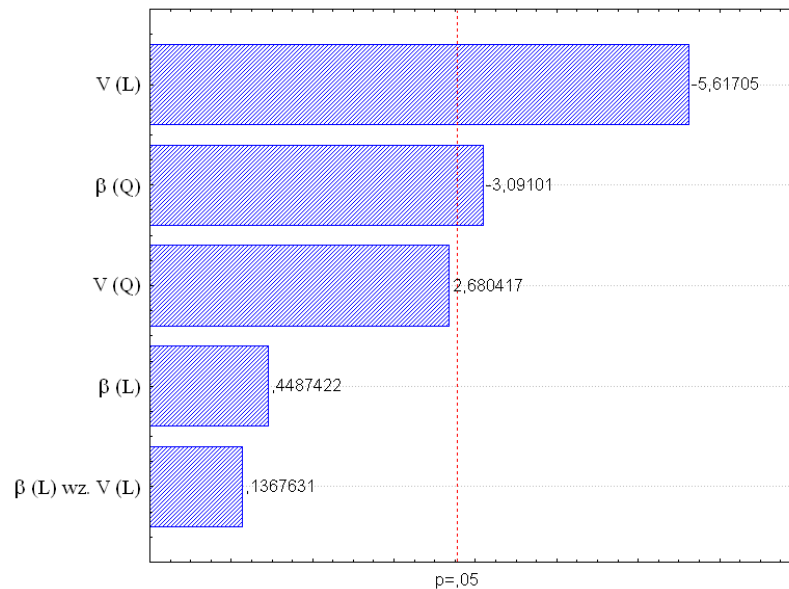
β [°]	$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jOL} [J/m ²]	σ e_{jOL} [J/m ²]
10,9	101,3	814,9	58,37
25,0	50,0	1287,4	74,15
25,0	400,0	704,9	71,09
10,9	348,7	552,1	46,82
5,0	225,0	512,2	60,24
39,1	348,7	569,6	75,50
45,0	225,0	578,5	66,55
25,0	225,0	744,7	67,62
39,1	101,3	809,6	67,89
25,0	225,0	784,7	67,62

Powierzchnię odpowiedzi wygenerowaną na podstawie powyższej tabeli przedstawiono na rysunku 6.32.



Rys. 6.32. Wpływ kąta ostrza β oraz prędkości cięcia V na jednostkową energochłonność procesu cięcia sera, nożem z nanoszonym środkiem smarnym

Wykres Pareto wpływu standaryzowanych wielkości wejściowych na jednostkową energochłonność procesu dla zastosowanej technologii cięcia przedstawia rysunek 6.33.

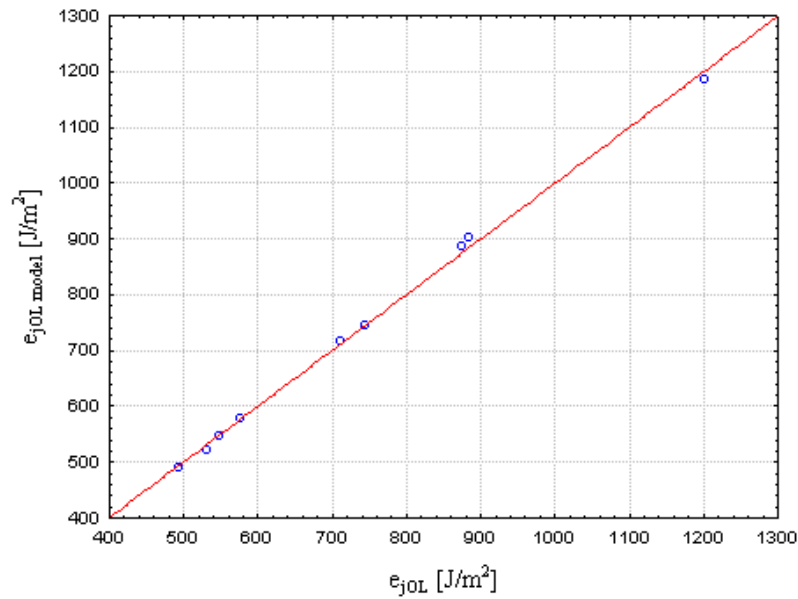


Rys. 6.33. Wykres Pareto istotności wpływu efektów standaryzowanych wielkości wejściowych na e_{jOL}

Wykres Pareto pokazuje istotny na poziomie $\alpha=0,05$ wpływ prędkości cięcia oraz kąta ostrza noża. Równanie regresji przyjmuje postać:

$$e_{jOL} = 1009,98329 + 30,38163 \cdot \beta - 0,60358 \cdot \beta^2 - 4497,977149 \cdot V + 6836,285258 \cdot V^2 + 3,26276 \cdot \beta V; \quad R^2 = 0,93844 \quad (6.9)$$

Adekwatność modelu sprawdzona została testem Fishera. Wykres korelacji wartości pomiarów z wartościami modelu matematycznego przedstawia rysunek 6.34.



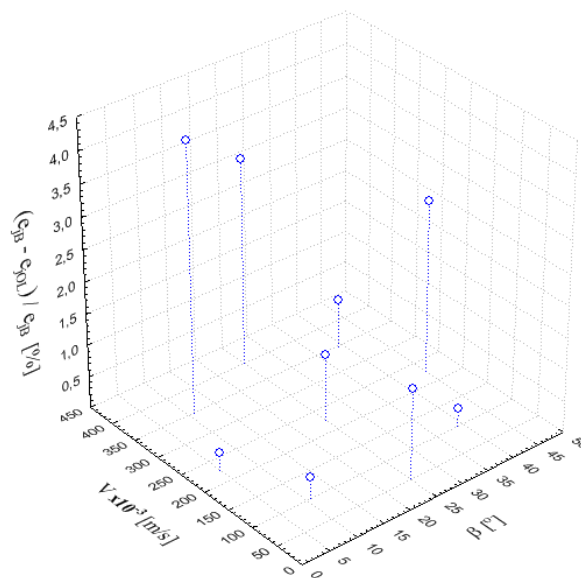
Rys. 6.34. Korelacja pomiędzy przyjętym modelem a wartościami pomiarów e_{jOL}

W przypadku zastosowanie technologii cięcia polegającej na pokrywaniu narzędzia środkiem smarnym uzyskano odpowiedź układu o charakterze zbliżonym do innych przedstawionych wcześniej technologii. Najbardziej istotny wpływ na energochłonność procesu ma także w tym przypadku prędkość cięcia. Jest ona największa dla cięcia najmniejszej prędkości cięcia występującej w planie badań.

Tabela 6.16 przedstawia różnice $e_{jB} - e_{jOL}$ uzyskane w poszczególnych punktach zastosowanego planu badań, odniesione do technologii cięcia nożem bez powłoki. Różnice te zaprezentowano także na rysunku 6.35. Przypadki, dla których obliczone różnice są statystycznie istotne, przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$, zaznaczono kolorem czerwonym.

Tab. 6.16. Wartości różnic energochłonności jednostkowej procesu dla technologii podstawowej i cięcia nożem smarowanym olejem rzepakowym

β [°]	$V \times 10^3$ [m/s]	e_{jB} [J/m ²]	e_{jOL} [J/m ²]	$\frac{e_{jB} - e_{jOL}}{e_{jB}}$ [%]
10,9	101,3	817,7	814,9	0,3
25,0	50,0	1306,0	1287,4	1,4
25,0	400,0	728,6	704,9	3,2
10,9	348,7	576,6	552,1	4,2
5,0	225,0	513,6	512,2	0,3
39,1	348,7	574,0	569,6	0,8
45,0	225,0	594,7	578,5	2,7
25,0	225,0	752,6	744,7	1,1
39,1	101,3	811,9	809,6	0,3
25,0	225,0	752,6	744,7	1,1



Rys. 6.35. Wartości uzyskanych różnic jednostkowej energochłonności procesu cięcia technologią podstawową oraz nożem smarowanym olejem rzepakowym

Analiza wyników badań energochłonności procesu w przypadku nanoszenia środka smarnego na nóż pokazuje korzystny wpływ zastosowania tej technologii w stosunku do technologii podstawowej. Wartość uzyskanych różnic energochłonności są nieistotne statystycznie i wynoszą maksymalnie 4,2%.

6.2.5. Cięcie marchwi drutem

Ostatnią zastosowaną metodą cięcia marchwi było cięcie drutem. Jediną zmienną, której wpływ oceniano, była prędkość cięcia. Wyniki procesu cięcia przedstawiono w tabeli 6.17.

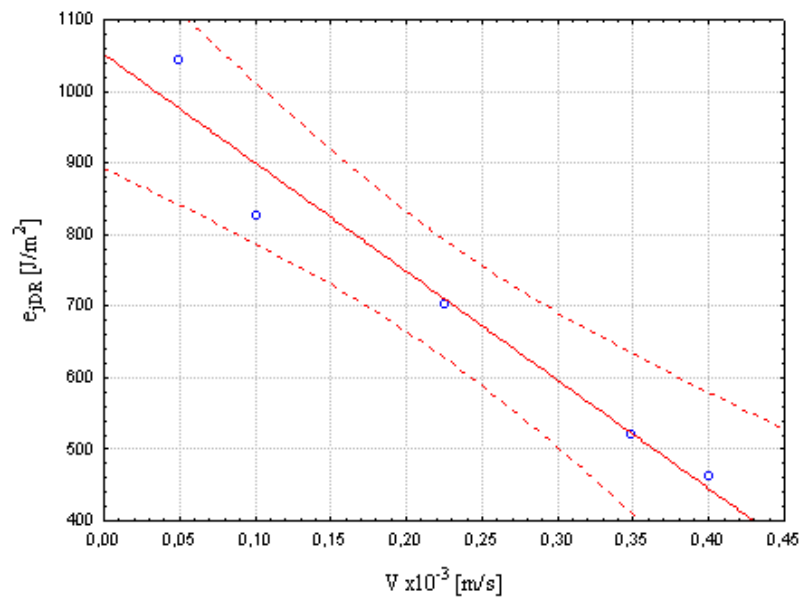
Tab. 6.17. Wyniki badań procesu cięcia marchwi drutem

$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jDR} [J/m ²]	σ e_{jDR} [J/m ²]
50,0	1042,3	80,35
101,3	825,5	25,86
225,0	701,2	79,80
348,7	519,6	71,34
400,0	462,1	45,59

Wyniki prowadzonych badań poddano analizie regresji. Sporządzono krzywą regresji wpływu prędkości cięcia na jednostkową energochłonność procesu., którą przedstawiono na rysunku 6.36.

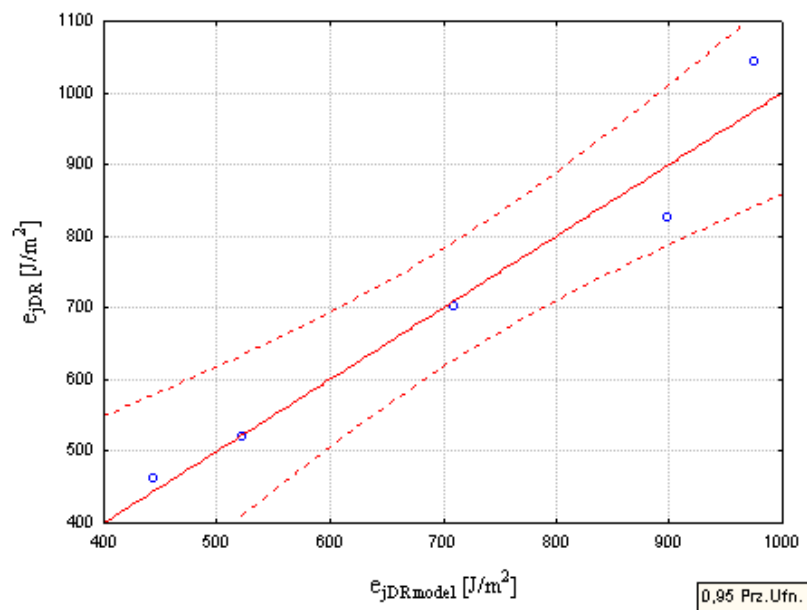
Równanie regresji dla zmiennej niezależnej przyjmuje postać:

$$e_{jDR} = 1051,5029 - 1517,1515 \cdot V; \quad R = -0,9770; \quad (6.10)$$



Rys. 6.36. Wykres przedstawiający wpływ prędkości cięcia marchwi drutem na jednostkową energochłonność procesu

Wykres 6.37 przedstawia korelację wartości otrzymanych z pomiarów z wartościami modelu matematycznego.



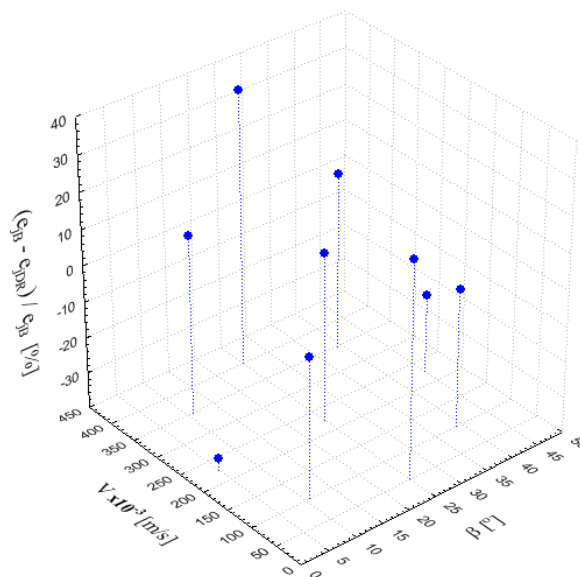
Rys. 6.37. Korelacja pomiędzy przyjętym modelem a wartościami pomiarów ϵ_{jDR}

Równanie regresji opisujące proces cięcia marchwi drutem miało charakter liniowy. Wraz ze wzrostem prędkości cięcia energochłonność procesu malała.

Wyniki badań cięcia drutem odniesiono do wyników cięcia podstawową technologią. Tabela 6.18 przedstawia różnice $e_{jB} - e_{jDR}$ uzyskane w poszczególnych punktach zastosowanego planu badań. Różnice te zaprezentowano także na rysunku 6.38. Przypadki, dla których obliczone różnice są statystycznie istotne, przy założonym poziomie istotności $\alpha=0,05$, zaznaczono kolorem czerwonym.

Tab. 6.18. Wartości różnic energochłonności jednostkowej procesu dla technologii podstawowej i technologii cięcia marchwi drutem

β [°]	$V \times 10^{-3}$ [m/s]	e_{jB} [J/m ²]	e_{jDR} [J/m ²]	$\frac{e_{jB} - e_{jDR}}{e_{jB}}$ [%]
10,9	101,3	817,7	825,5	-0,9
25,0	50,0	1306,0	1042,3	20,2
25,0	400,0	728,6	462,1	36,6
10,9	348,7	576,6	519,6	9,9
5,0	225,0	513,6	701,2	-36,5
39,1	348,7	574,0	519,6	9,5
45,0	225,0	594,7	701,2	-17,9
25,0	225,0	752,6	701,2	6,8
39,1	101,3	811,9	825,5	-1,7
25,0	225,0	752,6	701,2	6,8



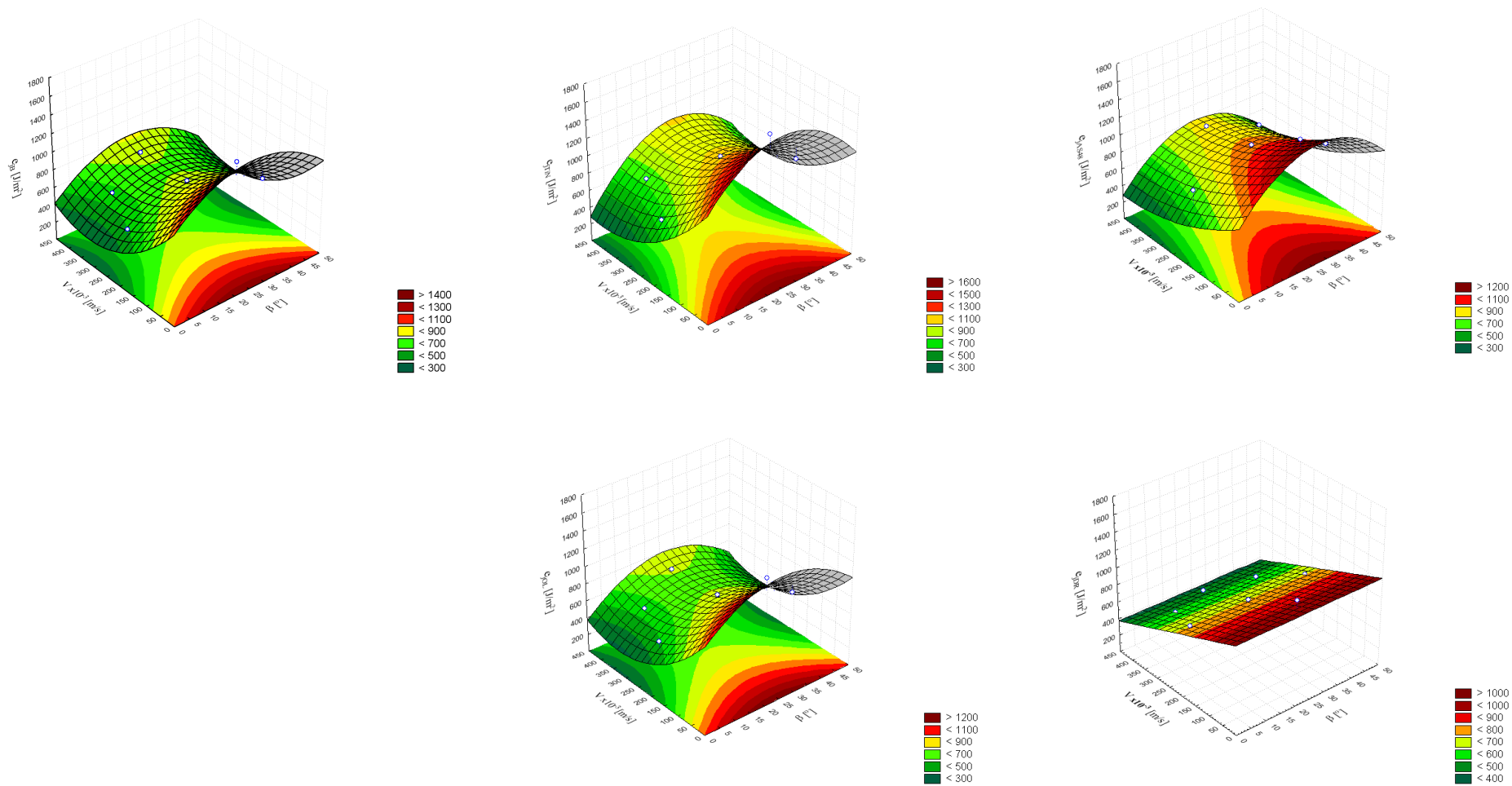
Rys. 6.38. Wartości uzyskanych różnic jednostkowej energochłonności procesu cięcia marchwi technologią podstawową oraz technologią cięcia drutem

Wyniki różnic wynikających z zastosowania cięcia marchwi drutem ujawniły punktu korzystne i niekorzystne z punktu widzenia zmniejszenia energochłonności procesu.

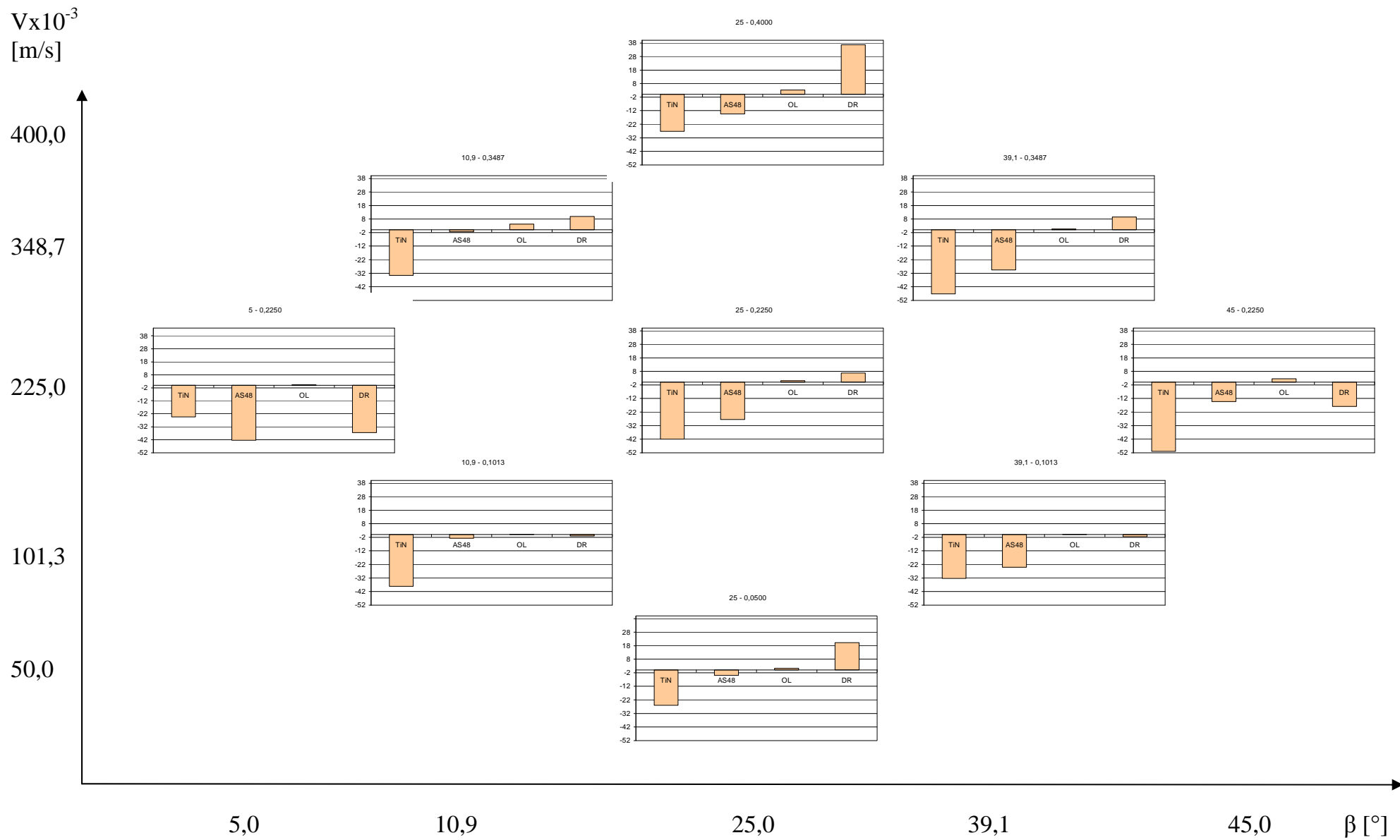
Cięcie marchwi drutem z prędkością 0,225 m/s spowodowało znaczne (od 17% do 36%) zwiększenie energochłonności procesu ale tylko w porównaniu do cięcia nożami o kątach ostrza 5° i 45°. Również cięcie z prędkością 0,101 m/s zwiększyło lecz tylko nieznacznie energochłonność procesu.

Proces cięcia drutem prowadzony z prędkościami 0,05 m/s, 0,348 m/s oraz 0,400 m/s spowodował zmniejszenie energochłonności od 9,5% do 36%.

Rysunek 6.39 prezentuje wszystkie wygenerowane powierzchnie odpowiedzi uzyskane podczas cięcia sera różnymi technologiami. Natomiast na rysunku 6.40 zaprezentowano wartości osiągniętych różnic jednostkowej energochłonności procesu cięcia sera we wszystkich punktach planu badań.



Rys. 6.39. Wykres przedstawiający wszystkie powierzchnie odpowiedzi dla prowadzonych technologii cięcia marchwi



Rys. 6.40. Wykres przedstawiający różnice procentowe energochłonności procesu cięcia marchwi we wszystkich punktach planu badań w odniesieniu do podstawowej technologii

Podczas cięcia marchwi nożami pokrytymi powłokami TiN oraz AS48 nie uzyskano korzyści polegających na zmniejszeniu jednostkowej energochłonności procesu w odniesieniu do technologii podstawowej. Maksymalna wartość uzyskiwanych różnic wynosiła dla noża z powłoką TiN -51,1%, dla noża z powłoką AS48 -42,5%.

Największe korzystne z punktu widzenia zmniejszania energochłonności procesu różnice otrzymano dla technologii cięcia drutem. Ich wartość osiągał nawet 3,6% ale tylko dla największej i najmniejszej wartości prędkości cięcia.

Smarowanie narzędzia, w przypadku cięcia marchwi spowodowało nieznaczne zmiany energochłonności procesu w zakresie od 0,3% do 4,2%.

7. ZALECENIA DO KONSTRUKCJI I EKSPLOATACJI MASZYN I URZĄDZEŃ TNĄCYCH

Na podstawie analizy wyników przeprowadzonych badań doświadczalnych opracowano zalecenia do konstrukcji i eksploatacji maszyn i urządzeń realizujących proces cięcia serów twardych oraz marchwi.

Kryterium, którym kierowano się podczas formułowania poniższych zaleceń, była najmniejsza uzyskiwana jednostkowa energochłonność procesu cięcia.

Wytyczne dotyczące zastosowanej technologii oraz kąta ostrza narzędzia i prędkości cięcia opracowano niezależnie dla każdego z ciętych materiałów.

Cięcie serów twardych

- Zalecaną technologią cięcia serów twardych jest cięcie drutem. Proces ten charakteryzuje się najmniejszą jednostkową energochłonnością i w porównaniu z technologią cięcia nożem płaskim przynosi korzyści od 54,1% do 80,3%. Proces cięcia drutem powinien być prowadzony z prędkością $V=0,1013$ m/s, dla której uzyskano najmniejszą jednostkową energochłonność wynoszącą $183,5$ J/m².
- W przypadku konieczności prowadzenia procesu nożem płaskim zaleca się użycie narzędzia pokrytego powłoką TiN. W tym przypadku proces powinien być realizowany nożem o kącie ostrza $\beta=25^\circ$ z prędkością $V=0,05$ m/s. Jednostkowa energochłonność procesu wynosiła wtedy $390,5$ J/m² i była mniejsza o 19,5% od wartości jednostkowej energochłonności procesu dla tych samych wartości β i V podczas cięcia sera technologią podstawową.
- W przypadku zastosowania technologii podstawowej, proces powinien być realizowany dla takich samych wartości parametrów β i V jak podczas cięcia narzędziem z powłoką TiN.
- Nie zaleca się prowadzenia procesu cięcia serów twardych nożem z powłoką AS48.

- Nie zaleca się również prowadzenia procesu cięcia sera nożem smarowanym olejem rzepakowym. Minimalna jednostkowa energochłonność procesu różniła się tylko o 2,7% od odpowiadającej jej jednostkowej energochłonności procesu dla technologii podstawowej.

Cięcie marchwi

- Zalecaną technologią cięcia marchwi jest cięcie drutem. Powinno być ono realizowane z prędkością $V=0,4$ m/s. Taka wartość prędkości cięcia odpowiadała najmniejszej jednostkowej energochłonności procesu wynoszącej $462,1$ J/m², mniejszej o 36,6% od wartości tej energochłonności uzyskanej podczas cięcia technologią podstawową.
- Najmniejsza wartość jednostkowej energochłonności procesu cięcia marchwi technologią podstawową uzyskano dla kąta ostrza $\beta=5^\circ$ i prędkości cięcia $V=0,225$ m/s. Są to więc wartości parametrów zalecane dla stosowania tej technologii.
- Nie zaleca się prowadzenia procesu cięcia marchwi narzędziami pokrytymi powłokami TiN oraz AS48 ze względu na wzrost jednostkowej energochłonności procesu.
- Nie zaleca się również prowadzenia procesu cięcia marchwi nożem smarowanym olejem rzepakowym ponieważ minimalna wartość jednostkowej energochłonności procesu różniła się tylko o 0,3% od wartości jednostkowej energochłonności procesu realizowanego technologią podstawową dla tych samych wartości β oraz V .

Dla obydwu materiałów poddawanych procesowi cięcia najkorzystniejszą, a przez to najbardziej zalecaną, okazała się technologia, dla której zmniejsza się opory cięcia poprzez zmniejszenie powierzchni kontaktu narzędzia z obrabianym materiałem.

8. WNIOSKI

Analiza wyników przeprowadzonych badań pozwoliła na sformułowanie następujących wniosków:

Wnioski poznawcze:

1. Badania doświadczalne potwierdziły częściowo tezę o istnieniu istotnych statystycznie różnic energochłonności procesu, pomiędzy technologią podstawową a technologią wykorzystującą noże pokrywane 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. Podczas ciecienia marchwi energochłonność procesu różniła się istotnie we wszystkich punktach planu badań lecz zmiany te wynikały ze zwiększania energochłonności procesu.

Uzyskane różnice energochłonności procesu cięcia sera nożem z powłoką AS48 okazały się być statystycznie istotne, natomiast podczas ciecienia marchwi w 3 punktach przyjętego planu badań różnice energochłonności nie były istotne statystycznie. Uzyskane różnice wynikały ze zwiększenia energochłonności procesu.

2. Stwierdzono, że technologia polegająca na cięciu nożem pokrywanym środkiem smarnym nie przyniosła zmian energochłonności procesu na istotnym statystycznie poziomie zarówno dla ciętego sera jak i marchwi. Uzyskane różnice wynikały ze zmniejszenia energochłonności procesu. Podczas cięcia sera uzyskiwano różnice od 1,6% do 9,2%, natomiast podczas cięcia marchwi od 0,3% do 4,2%.

3. Badania pokazały, że energochłonność jednostkowa procesu cięcia sera drutem różniła się istotnie od energochłonności jednostkowej procesu cięcia technologią podstawową i osiągała wartość od 54,1% do 80,3%.
Energochłonność procesu cięcia drutem marchwi różniła się istotnie od energochłonności procesu cięcia tego materiału technologią podstawową tylko w czterech punktach przyjętego planu badań. W dwóch punktach planu różnice te były niekorzystne z punktu widzenia obniżania jednostkowej energochłonności procesu i wynosiły -17,9% oraz -36,5%. W punktach, w których następowało zmniejszenie energochłonności różnice wynosiły 20,2% oraz 36,6%.
4. Stwierdzono istotny statystycznie, na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, wpływ wielkości wejściowych na energochłonność jednostkową procesu cięcia ujętych w badaniach produktów spożywczych.
5. Stwierdzono, że dla wszystkich stosowanych technologii cięcia sera, z wyłączeniem cięcia drutem, prędkość cięcia wpływała liniowo na jednostkową energochłonność procesu. Energochłonność procesu zwiększała się wraz ze wzrostem prędkości cięcia.
Energochłonność jednostkowa procesu cięcia sera drutem również wzrastała wraz ze wzrostem prędkości cięcia. Zależność ta miała charakter wielomianu stopnia drugiego.
6. Przeprowadzone badania wykazały istotny wpływ kąta ostrza noża na jednostkową energochłonność procesu cięcia sera zastosowanymi technologiami. Zmiany energochłonności jednostkowej procesu pod wpływem zmian kąta ostrza miały charakter wielomianu stopnia drugiego z minimum osiąganym dla kąta ostrza 25°.
7. Badania wykazały, również istotny statystycznie wpływ prędkości cięcia marchwi na jednostkową energochłonność procesu. Miał on charakter liniowy dla wszystkich realizowanych technologii cięcia a wzrost prędkości powodował spadek jednostkowej energochłonności procesu.
8. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono również istotny statystycznie wpływ kąta ostrza noża na jednostkową energochłonność

procesu cięcia marchwi realizowanymi technologiami. Wpływ ten miał charakter wielomianu stopnia drugiego z maksimum osiąganym dla kąta ostrza 25° .

Wnioski uytylitarne

1. Wyniki przeprowadzonych badań mogą być podstawą do prowadzenia dalszych badań nad zmniejszaniem energochłonności procesu cięcia surowców i produktów spożywczych polegających na rozszerzaniu zakresów wielkości wejściowych lub modyfikacji zaproponowanych technologii cięcia.
2. 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.
3. Wyniki badań pokazują możliwości stosowania technologii cięcia zmniejszających energochłonność procesu dla różnych grup produktów spożywczych.

9. LITERATURA

1. Ajayi O. A., Clarke B.: High Velocity Shearing of Maize Kernels. *J. agric. Engng Res.* 42/1989, 15-25.
2. Alvarez M.D., Saunders D.E.J., Vincent J.F.: Effect of turgor pressure on the cutting energy of stored potato tissue. *Eur Food Res Technol* 210/2000, s.331-339.
3. Arnold G., Leiteritz L., Zahn S., Rohm H.: Ultrasonic cutting of cheese: Composition affects cutting work reduction and energy demand. *International Dairy Journal* 19/2009, 314-320.
4. Atkins A. G., Xu X., Jeronimidis G.: Cutting, by 'pressing and slicing', of thin floppy slices of materials illustrated by experiments on cheddar cheese and salami. *Journal of Materials Science* 39/2004, 2761-2766.
5. Baran D.: Wpływ wybranych czynników na opory cięcia bulw ziemniak. *Praca Doktorska*, 2002.
6. Baran D., Marks N.: Wpływ kąta zaostrenia i prędkości noża na opory cięcia bulw ziemniaka. *Inżynieria Rolnicza*, 9/2003.
7. Baran D., Marks N.: Wpływ odmiany, frakcji wymiarowej i formy zastosowanego nawozu na opory cięcia bulw ziemniaka. *Inżynieria Rolnicza*, 11/2003.
8. Błasiński H., Boss J., Rzycki E.: Aparatura przemysłu spożywczego. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 1977.
9. Bochat A.: Fazy i model cięcia bębnowym zespołem tnącym. *Inżynieria i Aparatura Chemiczna*, 5/2008.
10. Boss J.: Maszyny i urządzenia przemysłu spożywczego. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Inżynierskiej, Opole 1984.
11. Brach I.: O teoriach rozdrabniania minerałów. *Przegląd Mechaniczny*, 14/1963.
12. Brach I.: Hipoteza wielokrotności pracy kruszenia w procesie rozdrabniania ciał kruchych i jej dalsze rozwinięcie. *Przegląd Mechaniczny*, 3/1965.
13. Brach I.: Praca rozdrabniania ciał kruchych. *Przegląd Mechaniczny*, 15/1968.

14. Brown T., James S. J., Purnell G. L.: Cutting forces in foods: experimental measurements. *Journal of Food Engineering* 70/2005, 165-170.
15. Brzozowska-Bakalarz M.: Właściwości mechaniczne buraków cukrowych – porównawcze badania ogólnej pracy cięcia korzeni. *Gazeta cukrownicza* 2/1987.
16. Chwiej M.: Aparatura przemysłu spożywcze. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1979.
17. Czyżyk E., Porankiewicz B., Staniszewski J., Wojtal R.: Podstawy mechanicznej obróbki surowców i produktów spożywczych cięciem. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu, Poznań 1982.
18. Dauriski A., Maczichin J.A.: Rezanije puszczewych materiałów. Teoria processa, maszyny, intensyfikacja. *Puszczewaja Promyszlennost*. Moskwa 1980.
19. Diakun J.: Eksploatacja w praktyce inżynierskiej przemysłu spożywczego. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin 2005.
20. Diakun J., Tesmer R., Owczarzak J.: Jednostkowe energie rozdrabniania mięsa mrożonego. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 354, 1989.
21. Diakun J., Tesmer R.: Opory cięcia mięsa mrożonego. *Gospodarka Mięsa*, nr 1/1986, s. 7-8.
22. Dowgiałło A.: Sterowanie cięciem patroszącym w odgławiarko-patroszarkach na przykładzie śledzi. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 2/1994.
23. Dowgiałło A.: Wpływ charakteru ruchu noża na opory cięcia ryb. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1/2/1996.
24. Dowgiałło A.: Wpływ kinematycznych parametrów na opory cięcia odgławiającego szproty nożami wibracyjnym i gilotynowym. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 2/2001.
25. Dowgiałło A.: Doświadczalna weryfikacji teorii mikroostrzy. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 2/2002.
26. Dowgiałło A.: Siły cięcia w obróbce ryb. Morski Instytut Rybacki, Gdynia 2002.

27. Dowgiałło A.: Cutting force of fibrous materials. *Journal of Food Engineering*, 66/2005, 57-61.
28. Dowgiałło A.: Modelowanie operacji cięcia materiałów rolno-spożywczych. *Postępy Techniki Przetwórstwa Spożywczego*, 1/2006.
29. Feller R.: Effects of Knife Angles and Velocities on Cutting of Stalks without a Counter-edge. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 4(4)/1959, s.277.
30. Figiel A., Frontczak J.: Opory cięcia ziarna kukurydzy. *Inżynieria Rolnicza*, 2/2001.
31. Figiel A., Frontczak J.: Opory cięcia nasion soi. *Inżynieria Rolnicza*, 12/2001.
32. Figiel A., Frontczak J.: Wpływ wilgotności na opory i pracę przecinania nasion wybranych roślin. *Acta Agrophisica* 2001.
33. Flizikowski J.: Wpływ rozwiązań konstrukcyjnych układów funkcjonalnych i napędowych na energochłonność rozdrabniania ziaren zbóż. *Prace ATR*, Bydgoszcz 1987.
34. Flizikowski J.: Badania i podstawy konstrukcyjne wielotarczowych rozdrabniaczy nasion. *Rozprawy nr 42*. Wyd. Uczelniane ATR w Bydgoszczy, Bydgoszcz 1990.
35. Flizikowski J., Bieliński K., Bieliński M.: Podwyższanie energetycznej efektywności wielotarczowego rozdrabniania nasion zbóż na paszę. *Wyd. ATR – OPO*, Bydgoszcz 1994.
36. Goh S. M., Charalambides M. N., Williams J. G.: On the mechanics of wire cutting of cheese. *Engineering Fracture Mechanics* 72/2005, 931-946.
37. Goriaczkin W.P.: *Sobranje soczinienij. Tieoria zatwiennych maszin. Sielchozgiz, t.5* 1940.
38. Hebda M.: *Procesy tarcia, smarowania i zużywania maszyn*. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji, Warszawa – Radom 2007.
39. Ichimura H., Rodrigo A.: The correlation of scratch adhesion with composite hardness for TiN coatings. *Surface and Coatings Technology* 126/2000, 152-158.
40. Iwaszko A.A.: *Woprosy tieorii rezanija organiczeskich materiałow lezwiem. Traktory i selchozmasziny*, 2/1958, s.34.

41. Jakubczyk E., Uziak D.: Charakterystyka instrumentalnych metod badania właściwości mechanicznych wybranych owoców i warzyw. *Inżynieria Rolnicza*, 11/2005.
42. Janus P.: Zużycie energii w procesie krajania korzeni marchwi. *Gospodarka Paliwami i Energią*, 9/2003, s. 22-24.
43. Kamyab I., Chakrabarti S., Williams J. G.: Cutting cheese with wire. *Journal of Materials Science* 33/1998, 2763-2770.
44. Knyszewski J.: *Maszyny i urządzenia przemysłu żywnościowego*. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2003.
45. Kowalik K., Sykut B., Opielak M.: Badanie wpływu prędkości posuwu na opory krojenia produktów spożywczych. *Inżynieria Rolnicza*, 9/2005, str. 181-186.
46. Kowalik K., Sykut B., Opielak M.: Issledowanie udelnoj raboty porezki owoščzej. *Problemy Techniki*, No 3/2005.
47. Kowalski S.: Badanie oporów cięcia wybranych roślin. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 408/1993.
48. Kupczyk M.: *Inżynieria powierzchni. Powłoki przeciwzużyciowe na ostrza skrawające*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2008.
49. Kwiecień S.: Analiza warunków pracy noża tarczowego. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych* z. 408/1993.
50. Legutko S.: *Eksploatacja maszyn*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2007.
51. Lentas K., Witrowa-Rajchert D.: Wpływ warunków blanszowania tkanki selera na właściwości teksturalne suszu. *Żywność. Nauka. Technologia. Jakość*. Nr 4 (59)/2008, str. 207-215.
52. Lewicki P., i in.: *Inżynieria procesowa i aparatura przemysłu spożywczego*. WNT, Warszawa 1982.
53. Lisowski A., Kostyra K.: Redukcja częstotliwości cięcia i zastosowanie dodatkowego rozdrabniania – kierunkiem do zmniejszenia obciążeń energetycznych zespołu rozdrabniającego. *Inżynieria Rolnicza*, Nr 9/2008.
54. *Lista odmian roślin warzywnych COBORU, Słupia Wielka* 2001.

55. Lugscheider E., Bobzin K.: The influence on surface free energy of PVD-coatings. *Surface and Coatings Technology* 142-144, Ż 2001.
56. Majewski J., Drozdowski R.: Optymalizacja ostrza i parametrów pracy noży tarczowych do odgławiania płoci. *Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej, Seria: Mechanika* z. 61, Nr kol. 256/2000.
57. Marks N., Kowalski S.: Opór cięcia jako miernik odporności bulw ziemniaka na mechaniczne uszkodzenia. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 416, 1994.
58. Marks N., Krzysztofik B., Piech T.: Wpływ prędkości i energii uderzenia na mechaniczne uszkodzenia bulw ziemniaka. *Roczniki Nauk Rolniczych t. 76-C-I*, 1985.
59. Matuszek T.: Rozdrabnianie świeżych owoców i warzyw. *Maszyny i opakowania. Magazyn Przemysłu Spożywczego* 1(5)/2000, s. 21.
60. McRandal D. M., McNulty P. B.: Impact Cutting Behaviour of Forage Crops. *J. agric. Engng Res.* (1978) 23, 313-328.
61. Milanowski J. Rheological properties of food materials and models of their cutting resistance. *Agrophysical bases of soils and cultivated plants productivity part II – Plant Materials.* 399/1993, s. 151-154.
62. Młynarczyk A., Jakubowski J.: *Obróbka powierzchniowa i powłoki ochronne.* Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1998.
63. Molendowski F.: Ocena zmienności sił i naprężeń cięcia rdzeni kolb kukurydzy. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 454/1998.
64. Molendowski F.: Ocena zmienności jednostkowego oporu cięcia rdzeni kolb kukurydzy. *Inżynieria Rolnicza*, Nr 12/2001.
65. Myshkin N. K., Petrokovets M. I., Kovalev A. V.: Tribology of polymers: Adhesion, friction, wear, and mass-transfer. *Tribology International* 38 (2005) 910–921.
66. Nadulski R., Guz T.: Wpływ niektórych parametrów konstrukcyjno-eksploatacyjnych na proces cięcia warzyw. *Inżynieria Rolnicza*, Nr 10/2001.
67. Nadulski R., Guz T.: Zastosowanie systemu wizyjnego analizy obrazu w badaniach procesu cięcia warzyw korzeniowych. *Inżynieria Rolnicza*, Nr 11/2001.

68. Nadulski R., Wawryniuk P.: Wpływ wybranych parametrów konstrukcyjnych zespołu tnącego na proces cięcia warzyw. *Inżynieria Rolnicza*, Nr 8/2003.
69. Niedziółka I., Szymanek M., Rybczyński R.: Energochłonność procesu cięcia ziarna kukurydzy cukrowej. *Inżynieria Rolnicza*, Nr 6/2002.
70. Niedziółka I., Szymanek M., Rybczyński R.: Metodyczne aspekty procesu cięcia ziarna kukurydzy cukrowej. *Acta Agrophisica* nr 83/2003.
71. Oh N. H., Seib P. A., Deyoe C. W., Ward A. B.: Noodles. I. Measuring the Textural Characteristics of Cooked Noodles. *Cereal Chem.* 1983, 60(6):433-438.
72. Opielak M.: Badanie wpływu kształtu elementu rozdrabniającego na jakość i energochłonność procesu rozdrabniania. V Konferencja Naukowo-Techniczna „Budowa i eksploatacja maszyn w przemyśle spożywczym”, Poznań-Błajejewko, s.198-199, 1990.
73. Opielak M.: Rozdrabnianie materiałów w przemyśle rolnospożywczym. Monografia. Wydano nakładem własnym autora, Lublin 1995.
74. Opielak M.: Rozdrabnianie materiałów w przemyśle rolno-spożywczym. Badanie wpływu konstrukcji rozdrabniacza i cech materiału rozdrabnianego na jakość i energochłonność procesu. Monografia. Wyd. Politechniki Lubelskiej, Lublin 1996.
75. Pełczyński T.: Obróbka cieplno-chemiczna stali. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej. Lublin 1985.
76. Polański Z.: Planowanie doświadczeń w technice. PWN, Warszawa 1984.
77. Popko H., i in.: Maszyny przemysłu spożywczego. Ćwiczenia laboratoryjne. Wyd. uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 1986.
78. Popko H., Miszczuk M.: Badania oporów krajania niektórych produktów spożywczych. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 354, 1989.
79. Rogoś E., Grądkowski M., Urbański A.: Właściwości smarne wybranych olejów roślinnych. *Tribologia*, Nr 3/2001, str. 381-393.
80. Romański L., Stopa R.: Energochłonność dynamicznego procesu ścinania ziarna pszenicy. *Acta Scientiarum Polonorum, Technica Agraria* 2(1)2003, 33-41.

81. Santner E., Klaffke D., Meier zu Kijcker G.: Comprehensive tribological characterization of thin TiN-based coatings. *Wear* 190 (1995) 204-211.
82. Schneider Y., Zahn S., Rohm H.: Power requirements of the high-frequency generator in ultrasonic cutting of foods. *Journal of Food Engineering*, 86 (2008) 61-67.
83. Schneider Y., Zahn S., Schindler C., Rohm H.: Ultrasonic excitation affect friction interactions between food materials and cutting tools. *Ultrasonic* 49 (2009) 588-593.
84. Stallard J., Poulat S., Teer D. G.: The study of the adhesion of a TiN coating on steel and titanium alloy substrates using a multi-mode scratch tester. *Tribology International* 39 (2006) 159–166.
85. Staśkiewicz J.: Warstwy azotku tytanu – TiN – początek ery twardych pokryć. Seminarium Koszalin 10.02.2010.
86. Su Y. L., Yao S. H., Wu C. T.: Comparisons of characterizations and tribological performance of TiN and CrN deposited by cathodic arc plasma deposition process. *Wear* 199 (1996) 132-141.
87. Sykut B., Kowalik K., Opielak M.: Badanie wpływu kątów ostrza i przystawienia na opory krojenia produktów spożywczych. *Inżynieria Rolnicza*, Nr 9/2005.
88. 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*, Nr 4/2006.
89. Szot B., Gołacki K.: Ocena właściwości mechanicznych korzeni marchwi na podstawie pomiarów podstawowych parametrów wytrzymałościowych. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 321, 1987.
90. Szot B., Kęsik T., Gołacki K.: Badanie zmienności właściwości mechanicznych korzeni marchwi w zależności od cech odmianowych, czynników agrotechnicznych i okresu przechowywania. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 316, 1987.
91. Szymanek M.: Analysis of cutting process of plant material. *TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. – OL PAN*, 20077A, 103-113.
92. Ślaska-Grzywna B.: Wpływ obróbki termicznej na siłę cięcia i siłę ściskania ziemniaków. *Inżynieria Rolnicza*, Nr 6/2006.

93. Ślaska-Grzywna B.: Wpływ obróbki termicznej na siłę cięcia kalafiora. *Inżynieria Rolnicza*, Nr 5/2007.
94. Ślaska-Grzywna B.: Wpływ parametrów obróbki cieplnej selera na siłę cięcia. *Inżynieria Rolnicza*, Nr 6/2008.
95. Visvanathan R., Screenarayanan V. V., Swaminathan K. R.: Effect of Knife Angle and Velocity on the Energy Required to Cut Cassava Tubers. *J. agric. Engne Res.* (1996) 64, 99-102.
96. Wiercioch M., Niemiec A., Romański L.: Wpływ wielkości ziarniaków pszenicy na energochłonność ich rozdrabniania. *Inżynieria Rolnicza*, Nr 5/2008.
97. Woropay M., Landowski B., Jaskulski Z.: Wybrane problemy eksploatacji i zarządzania systemami technicznymi. Wydawnictwo Uczelniane Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy. Bydgoszcz 2004.
98. Zahn S., Schneider Y., Rohm H.: Ultrasonic cutting of foods: Effect of excitation magnitude and cutting velocity on the reduction of cutting work. *Innovative Food Science and Emerging Technologies* 7 (2006) 288-293.
99. Żeligowski W.A.: Eksperymentalna teoria rezania lezwiem. *Trudz MIMESCh* 1940.
100. Żuk D.: Badanie procesu cięcia źdźbeł zbóż. *Zeszyty problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, z. 415, str. 161-166, 1994.
101. Żuk D.: Wpływ prędkości noża na proces cięcia źdźbeł pszenicy. *Inżynieria Rolnicza*, Nr 5/1998.
102. Podstawy techniki smarowniczej. Rozdział II. Materiały firmy Total.
103. PN-91/M-04301. Tribologia. Terminologia podstawowa.
104. PN-76/C-04147. Przetwory naftowe. Badanie właściwości smarnych olejów i smarów.
105. PN-EN 1974:2000 – Maszyny dla przemysłu spożywczego. Krajalnice. Wymagania z zakresu bezpieczeństwa i higieny.
106. PN-EN 1672-2:1999 - Maszyny dla Przemysłu Spożywczego. Pojęcia podstawowe, Wymagania z zakresu higieny.

STRESZCZENIE

Wpływ technologii cięcia wybranych produktów spożywczych na energochłonność procesu

Cięcie jest procesem polegającym na dzieleniu materiału na części o określonym wymiarze i kształcie. Jest to jeden z najczęściej realizowanych procesów także w przetwórstwie spożywczym. Cięciu poddaje się wędliny, sery warzywa, owoce, mięso, ryby, itd. Uzyskiwany kształt podyktowany jest względami organoleptycznymi, technologicznymi i użytkowymi.

Procesy rozdrabniania, w tym również cięcie, należą do grupy najbardziej energochłonnych procesów.

Na przebieg i energochłonność cięcia mają wpływ właściwości ciętego materiału jak również parametry konstrukcyjno-eksploatacyjne urządzeń, w tym elementu roboczego, którym zazwyczaj jest nóż.

Dość liczna literatura naukowa dotycząca badań procesu cięcia świadczy o jego randze.

Energochłonność procesu cięcia w dużym stopniu związana jest z tarciem występującym pomiędzy narzędziem a obrabianym materiałem. W przemyśle maszynowym czy obróbce skrawaniem tarcie zmniejszane jest między innymi poprzez stosowanie powłok na elementach współpracującej pary ciernej lub wprowadzanie pomiędzy te elementy środka smarnego. Inną stosowaną metodą jest zmniejszanie powierzchni kontaktu pomiędzy współpracującymi powierzchniami.

Brak jest doniesień literatury naukowej na temat możliwości wykorzystania powyższych metod w celu zmniejszenia energochłonności procesu cięcia produktów spożywczych. Stało się to pretekstem do podjęcia tematu i przeprowadzenia badań w tym zakresie.

Na podstawie analizy literatury oraz wyników przeprowadzonych badań wstępnych sformułowano następujące tezy:

- Jednostkowa energochłonność procesu cięcia wybranych produktów spożywczych, nożami pokrytymi powłokami TiN oraz AS48 różni się istotnie od jednostkowej energochłonności procesu cięcia nożem ze stali NC6,
- Smarowanie narzędzia tnącego podczas cięcia wybranych produktów spożywczych, powoduje istotną zmianę jednostkowej energochłonności procesu,
- Jednostkowa energochłonność procesu cięcia drutem wybranych produktów spożywczych, różni się istotnie od jednostkowej energochłonności procesu cięcia nożem ze stali NC6.

Celem pracy była doświadczalna weryfikacja postawionych tez. Celem naukowym był matematyczny opis procesu cięcia dla każdej zaproponowanej technologii.

Badania energochłonności procesu cięcia prowadzono wykorzystując stanowisko badawcze znajdujące się w pracowni laboratoryjnej Katedry Inżynierii Procesowej, Spożywczej i Ekotechniki, Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej. Ciętymi materiałami był ser żółty oraz marchew.

Proces cięcia realizowano następującymi technologiami: cięcie nożem płaskim wykonanym ze stali NC6, cięcie nożem płaskim pokrytym powłoką TiN (azotek tytanu), cięcie nożem płaskim pokrytym powłoką AS48 (powłoka fluoropolimerowa), cięcie ze smarowaniem noża płaskiego olejem rzepakowym, cięcie drutem.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano następujące wnioski:

- wyniki przeprowadzonych badań mogą być podstawą do prowadzenia dalszych badań nad zmniejszaniem energochłonności procesu cięcia surowców i produktów spożywczych polegających na rozszerzaniu zakresów wielkości wejściowych lub modyfikacji zaproponowanych technologii cięcia;
- 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;
- zaobserwowano istotne różnice w jednostkowej energochłonności procesu cięcia sera i marchwi pomiędzy technologią podstawową a innymi stosowanymi technologiami;
 - zalecaną technologią cięcia zarówno sera jak i marchwi jest cięcie drutem. Zastosowanie tej technologii spowodowało zmniejszenie jednostkowej energochłonności procesu cięcia nawet o 80,3% dla sera a o 36,6% dla marchwi;
 - użycie narzędzia pokrytego powłoką TiN było korzystne tylko w przypadku cięcia sera.. Proces powinien być wtedy realizowany nożem o kącie ostrza $\beta=25^\circ$ z prędkością $V=0,05$ m/s;
 - zastosowanie narzędzia z powłoką AS48 nie przyniosło oczekiwanych rezultatów zarówno podczas cięcia sera jak i marchwi;
 - nie zaleca się również stosowania technologii cięcia tych materiałów nożem smarowanym olejem rzepakowym ze względu na niewielkie osiągnięte korzyści jednostkowej energochłonności procesu.

ABSTRACT

Energy Consumption Variations in Different Methods of Food Products Cutting Process

Cutting is a process of dividing solid substances into parts of specific shape and dimensions. It is one of the most frequently performed activities in food processing. Meat, cold meats, cheese, vegetables, fruit, fish and other products are subjected to cutting. The shape of the resulting cuts is dictated by organoleptic, technological and also convenience criteria.

All processes of size reduction, including the cutting process, belong to high energy consumption processes.

The process itself and the energy consumption of any cutting is influenced by the properties of the material being cut as well as the specifics of construction and operation of the cutting device, including the cutting element which is usually a blade.

Quite extensive literature concerning the cutting process research exists and testifies to its high importance.

Energy consumption of the cutting process is closely linked to friction between the blade and the substance being cut. In machining or shearing, friction is often lowered by using coating on the working surface of the given friction pair or by the introduction of a lubricant. Another method relies on minimising the area of contact between the respective surfaces of the friction pair.

The present work is concerned with reasearch into possibilities of employing the above mentioned methods in order to lower the energy consumption of the cutting process of food products as no such approach exists in the scientific literature on this subject.

The following theses have been formulated on the basis of literature analysis and the conducted research:

- Quantified energy consumption of the cutting process of the selected food products using blades coated with TiN and AS48 is significantly different than the quantified energy consumption of the cutting process using the NC6 steel blade,
- Lubrication of the cutting blade during the cutting of selected food products significantly influences the energy consumption of the whole process,
- Quantified energy consumption of the cutting process of selected food products using a wire is significantly different than the quantified energy consumption of the cutting process using the NC6 steel blade,

The aim of the work was the experimental verification of the proposed theses. The scientific goal consisted of a mathematical description of the cutting process for the each proposed cutting method.

The energy consumption reaserch of the cutting process was conducted at a test stand in the laboratory of the Department of Process Engineering, Food Processing Engineering and Ecotechnology of the Faculty of Mechanical Engineering at Lublin University of Technology. Carrots and hard cheese were used as the food products.

Cutting proces was performed employing the following techniques: cutting with an NC6 steel flat blade, cutting with a TiN (Titanium-Nitrogen alloy) coated flat blade, cutting with an AS48 (fluoropolymer coating) flat blade, cutting with a flat blade and canola lubrication, cutting with wire.

On the basis of the conducted research the following conclusions have been formulated:

- the results of the research may be the basis of further research concerning the lowering of energy consumption while cutting different substances and food products in regards to expanding the range of the input variables or modification of the proposed cutting methods.
- the mathematical descriptions of co-relations between the energy consumption of the cutting process and the input variables for the particular

cutting methods might be useful for engineers and technicians in arriving at the optimal energy efficiency of the cutting process.

- significant differences in energy consumption were observed between the basic method and the other methods used.
- the recommended method is the wire cutting method. Its use resulted in the lowering of the quantified energy consumption by 80.3% for cheese and 36.6% for carrots.
- the use of TiN coated blade is beneficial only in the case of cheese and when the cutting edge angle is $\beta=25^\circ$ at the speed of $V=0,05$ m/s.
- the AS48 coated blade did not bring the expected results either when cutting carrots or cheese.
- it is not recommended to use the method of lubricating the blade with canola oil as it provides only minimal benefits in quantified energy consumption.