



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

Wydział Mechaniczny



Imię i nazwisko autora rozprawy: Daniel Chuchała
Dyscyplina naukowa: Budowa i eksploatacja maszyn

ROZPRAWA DOKTORSKA

Tytuł rozprawy w języku polskim: Metoda prognozowania mocy skrawania przy przecinaniu piłami polskiego drewna sosnowego z uwzględnieniem wiązkości materiału obrabianego

Tytuł rozprawy w języku angielskim: The method of forecasting of cutting power of sawing process of Polish Scots pine wood in which fracture toughness of the raw material has been taken into account

Promotor	Drugi promotor
<i>podpis</i>	<i>podpis</i>
prof. dr hab. inż. Kazimierz Antoni Orłowski	
Promotor pomocniczy	Kopromotor
<i>podpis</i>	<i>podpis</i>

Gdańsk, rok 2016



The author of the PhD dissertation: Daniel Chuchala
Scientific discipline: Construction and operation of machinery

DOCTORAL DISSERTATION

Title of PhD dissertation: The method of forecasting of cutting power of sawing process of Polish Scots pine wood in which fracture toughness of the raw material has been taken into account

Title of PhD dissertation (in Polish): Metoda prognozowania mocy skrawania przy przecinaniu piłami polskiego drewna sosnowego z uwzględnieniem wiązkości materiału obrabianego

Supervisor	Second supervisor
<i>signature</i>	<i>signature</i>
Prof. PhD. Eng. Kazimierz Antoni Orlowski	
Auxiliary supervisor	Cosupervisor
<i>signature</i>	<i>signature</i>



OŚWIADCZENIE

Autor rozprawy doktorskiej: Daniel Chuchała

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/~~nie wyrażam zgody~~* na bezpłatne korzystanie z mojej rozprawy doktorskiej zatytułowanej:

„Metoda prognozowania mocy skrawania przy przecinaniu piłami polskiego drewna sosnowego z uwzględnieniem wiążkości materiału obrabianego” do celów naukowych lub dydaktycznych.¹

Gdańsk, dnia

.....
podpis doktoranta

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz. U. z 2006 r., nr 90, poz. 631) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2012 r., poz. 572 z późn. zm.),² a także odpowiedzialności cywilno-prawnej oświadczam, że przedkładana rozprawa doktorska została napisana przeze mnie samodzielnie.

Oświadczam, że treść rozprawy opracowana została na podstawie wyników badań prowadzonych pod kierunkiem i w ścisłej współpracy z promotorem prof. dr hab. inż. Kazimierzem Antonim Orłowskim, ~~drugim promotorem~~ <drugi promotor>, ~~promotorem pomocniczym~~ <promotor pomocniczy>, ~~kopromotorem~~ <kopromotor>.*.

Niniejsza rozprawa doktorska nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadaniem stopnia doktora.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. rozprawie uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

Potwierdzam zgodność niniejszej wersji pracy doktorskiej z załączoną wersją elektroniczną.

Gdańsk, dnia

.....
podpis doktoranta

Ja, niżej podpisany(a), wyrażam zgodę/~~nie wyrażam zgody~~* na umieszczenie ww. rozprawy doktorskiej w wersji elektronicznej w otwartym, cyfrowym repozytorium instytucjonalnym Politechniki Gdańskiej, Pomorskiej Bibliotece Cyfrowej oraz poddawania jej procesom weryfikacji i ochrony przed przywłaszczaniem jej autorstwa.

Gdańsk, dnia

.....
podpis doktoranta

*) niepotrzebne skreślić

¹ Zarządzenie Rektora Politechniki Gdańskiej nr 34/2009 z 9 listopada 2009 r., załącznik nr 8 do instrukcji archiwalnej PG.

² Ustawa z dnia 27 lipca 2005 r. Prawo o szkolnictwie wyższym: Rozdział 7 Odpowiedzialność dyscyplinarna doktorantów, Art. 226.



STATEMENT

The author of the PhD dissertation: Daniel Chuchala

I, the undersigned, agree/~~do not agree~~* that my PhD dissertation entitled:
"The method of forecasting of cutting power of sawing process of Polish Scots pine wood in which fracture toughness of the raw material has been taken into account"
may be used for scientific or didactic purposes.¹

Gdańsk,.....

.....
signature of the PhD student

Aware of criminal liability for violations of the Act of 4th February 1994 on Copyright and Related Rights (Journal of Laws 2006, No. 90, item 631) and disciplinary actions set out in the Law on Higher Education (Journal of Laws 2012, item 572 with later amendments),² as well as civil liability, I declare, that the submitted PhD dissertation is my own work.

I declare, that the submitted PhD dissertation is my own work performed under and in cooperation with the supervision of Prof. PhD. Eng. Kazimierz Antoni Orlowski, ~~the second supervision of <name of the second supervisor>, the auxiliary supervision of <name of the auxiliary supervisor>, the cosupervision of <name of the cosupervisor>*~~.

This submitted PhD dissertation has never before been the basis of an official procedure associated with the awarding of a PhD degree.

All the information contained in the above thesis which is derived from written and electronic sources is documented in a list of relevant literature in accordance with art. 34 of the Copyright and Related Rights Act.

I confirm that this PhD dissertation is identical to the attached electronic version.

Gdańsk,.....

.....
signature of the PhD student

I, the undersigned, agree/~~do not agree~~* to include an electronic version of the above PhD dissertation in the open, institutional, digital repository of Gdansk University of Technology, Pomeranian Digital Library, and for it to be submitted to the processes of verification and protection against misappropriation of authorship.

Gdansk,.....

.....
signature of the PhD student

*) delete where appropriate.

¹ Decree of Rector of Gdansk University of Technology No. 34/2009 of 9th November 2009, TUG archive instruction addendum No. 8.

² Act of 27th July 2005, Law on Higher Education: Chapter 7, Criminal responsibility of PhD students, Article 226.



OPIS ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Autor rozprawy doktorskiej: Daniel Chuchała

Tytuł rozprawy doktorskiej w języku polskim: Metoda prognozowania mocy skrawania przy przecinaniu piłami polskiego drewna sosnowego z uwzględnieniem wiązkości materiału obrabianego

Tytuł rozprawy w języku angielskim: The method of forecasting of cutting power of sawing process of Polish Scots pine wood in which fracture toughness of the raw material has been taken into account

Język rozprawy doktorskiej: polski

Promotor rozprawy doktorskiej: prof. dr hab. inż. Kazimierz Antoni Orlowski

Drugi promotor rozprawy doktorskiej*: <imię, nazwisko>

Promotor pomocniczy rozprawy doktorskiej*: <imię, nazwisko>

Kopromotor rozprawy doktorskiej*: <imię, nazwisko>

Data obrony:

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku polski: moc skrawania, przecinanie piłami, drewno sosnowe, wiązkość, naprężenia tnące w strefie skrawania, region pochodzenia drewna

Słowa kluczowe rozprawy doktorskiej w języku angielskim: cutting power, sawing process, Scots pine, fracture toughness, the yield strength, the origin of wood

Streszczenie rozprawy w języku polskim: W pracy zostały przedstawione wartości właściwości materiałowych tj.: wiązkość R oraz naprężenia tnące w strefie skrawania τ_y , dla drewna sosnowego (*Pinus sylvestris* L.). Badane próbki drewna pochodziły z czterech Krain Przyrodniczo - Leśnych Polski: Bałtyckiej Krainy Przyrodniczo - Leśnej (kraina A), Karpackiej Krainy Przyrodniczo - Leśnej (kraina B), Małopolskiej Krainy Przyrodniczo - Leśnej (kraina C) oraz Wielkopolsko - Pomorskiej Krainy Przyrodniczo - Leśnej (kraina D). Właściwości te zostały wyznaczone z wartości mocy skrawania uzyskanych podczas prób skrawalnościowych na pilarsce ramowej PRW15M. Wartości wiązkości R i naprężeń tnących w strefie skrawania τ_y zostały określone w oparciu o model Atkinsa dla mocy skrawania. Zobrazowano zróżnicowanie wartości mocy skrawania oraz analizowanych właściwości materiałowych w zależności od regionu pochodzenia drewna.

Przedstawiono również, prognozowane wartości mocy skrawania dla trzech rodzajów pilarek (pilarka tarczowa wielosiłowa, pilarka ramowa, pilarka taśmowa), będących na wyposażeniu tartaku firmy Complex w Dziemianach. Wartości te wyznaczono przy zastosowaniu nowatorskiej metody prognozowania mocy skrawania uwzględniającej elementy mechaniki pękania. Otrzymane prognozy zestawiono z wartościami mocy skrawania pochodzącymi z prognoz przy zastosowaniu metody klasycznej, bazującej na właściwym oporze skrawania.

Streszczenie rozprawy w języku angielskim: In this thesis values of properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood such as fracture toughness R and shear yield stresses in the shear zone τ_y are presented. Samples of wood of provenance from four Polish natural – forest regions:



Baltic Natural – Forest Region (region A), Carpatian Natural – Forest Region (region B), Little Poland Natural – Forest Region (region C), Great Poland – Pomeranian Natural – Forest Region (region D) were tested. These properties were determined from the values of cutting power obtained experimentally on the saw frame PRW-15M. The values of fracture toughness and shear yield stresses based on the Atkins's model for cutting power were determined. The diversity characteristic properties of Scots pine and values cutting power depending on the origin of wood were described.

Furthermore, the forecasted values of cutting power for three types of saw machines (multi rip saw, frame sawing machine, bandsawing machine), which were located at the sawmill company Complex in Dziemiany, were presented. These values were determined using an innovative method of predicting the cutting power, which has taken elements fracture mechanics into account. The obtained predicted values were compared with the values of cutting power derived from predictions with the use of the classical method, which is based on the specific cutting resistance.

*) niepotrzebne skreślić.



DESCRIPTION OF DOCTORAL DISSERTATION

The Author of the PhD dissertation: Daniel Chuchala

Title of PhD dissertation: The method of forecasting of cutting power of sawing process of Polish Scots pine wood in which fracture toughness of the raw material has been taken into account

Title of PhD dissertation in Polish: Metoda prognozowania mocy skrawania przy przecinaniu piłami polskiego drewna sosnowego z uwzględnieniem wiązkości materiału obrabianego

Language of PhD dissertation: Polish

Supervision: Prof. PhD. Eng. Kazimierz Antoni Orlowski

Second supervision*: <first name, surname>

Auxiliary supervision*: <first name, surname>

Cosupervision*: <first name, surname>

Date of doctoral defense:

Keywords of PhD dissertation in Polish: moc skrawania, przecinanie piłami, drewno sosnowe, wiązkość, naprężenia tnące w strefie skrawania, region pochodzenia drewna

Keywords of PhD dissertation in English: cutting power, sawing process, Scots pine, fracture toughness, the yield strength, the origin of wood

Summary of PhD dissertation in Polish: W pracy zostały przedstawione wartości właściwości materiałowych tj.: wiązkość R oraz naprężenia tnące w strefie skrawania τ_y , dla drewna sosnowego (*Pinus sylvestris* L.). Badane próbki drewna pochodziły z czterech Krain Przyrodniczo - Leśnych Polski: Bałtyckiej Krainy Przyrodniczo - Leśnej (kraina A), Karpackiej Krainy Przyrodniczo - Leśnej (kraina B), Małopolskiej Krainy Przyrodniczo - Leśnej (kraina C) oraz Wielkopolsko - Pomorskiej Krainy Przyrodniczo - Leśnej (kraina D). Właściwości te zostały wyznaczone z wartości mocy skrawania uzyskanych podczas prób skrawalnościowych na pilarsce ramowej PRW15M. Wartości wiązkości R i naprężeń tnących w strefie skrawania τ_y zostały określone w oparciu o model Atkinsa dla mocy skrawania. Zobrazowano zróżnicowanie wartości mocy skrawania oraz analizowanych właściwości materiałowych w zależności od regionu pochodzenia drewna.

Przedstawiono również, prognozowane wartości mocy skrawania dla trzech rodzajów pilarek (pilarka tarczowa wielosiłowa, pilarka ramowa, pilarka taśmowa), będących na wyposażeniu tartaku firmy Complex w Dziemianach. Wartości te wyznaczono przy zastosowaniu nowatorskiej metody prognozowania mocy skrawania uwzględniającej elementy mechaniki pękania. Otrzymane prognozy zestawiono z wartościami mocy skrawania pochodzącymi z prognoz przy zastosowaniu metody klasycznej, bazującej na właściwym oporze skrawania.

Summary of PhD dissertation in English: In this thesis values of properties of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) wood such as fracture toughness R and shear yield stresses in the shear zone τ_y are presented. Samples of wood of provenance from four Polish natural – forest regions: Baltic Natural – Forest Region (region A), Carpatian Natural – Forest Region (region B), Little Poland Natural – Forest Region (region C), Great Poland – Pomeranian Natural – Forest Region



(region D) were tested. These properties were determined from the values of cutting power obtained experimentally on the saw frame PRW-15M. The values of fracture toughness and shear yield stresses based on the Atkins's model for cutting power were determined. The diversity characteristic properties of Scots pine and values cutting power depending on the origin of wood were described.

Furthermore, the forecasted values of cutting power for three types of saw machines (multi rip saw, frame sawing machine, bandsawing machine), which were located at the sawmill company Complex in Dziemiany, were presented. These values were determined using an innovative method of predicting the cutting power, which has taken elements fracture mechanics into account. The obtained predicted values were compared with the values of cutting power derived from predictions with the use of the classical method, which is based on the specific cutting resistance.

*) delete where appropriate.

*Pragnę podziękować wszystkim osobom,
bez których ta praca nie mogła by powstać.*

*Szczególnie chciałbym serdecznie podziękować mojemu promotorowi i mentorowi
Profesorowi dr. hab. inż. Kazimierzowi Antoniemu Orłowskiemu,
za wszelką pomoc jaką mi udzielił w całym okresie współpracy,
zwłaszcza za cenne uwagi merytoryczne.*

*Pragnę podziękować również dr. inż. Jakubowi Sandakowi,
za ostre słowa motywujące do tworzenia tej pracy,
które otrzymywane od takiego autorytetu dodawały werwy do działania.*

*Wyjątkowe podziękowania składam mojej narzeczonej Lucy
za cierpliwość, wyrozumiałość i wsparcie w chwilach zwątpienia.*

SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ	12
1. WPROWADZENIE	15
2. KINEMATYCZNE I GEOMETRYCZNE PARAMETRY PRZECINANIA PIŁAMI	17
2.1. <i>Przecinanie na pilarkach ramowych</i>	17
2.2. <i>Przecinanie na pilarkach taśmowych</i>	20
2.3. <i>Przecinanie na pilarkach tarczowych</i>	21
3. MECHANIKA PROCESU SKRAWANIA	25
3.1. <i>Składowe całkowitej siły skrawania</i>	25
3.2. <i>Rodzaje wiórów i warunki ich powstawania</i>	28
4. METODY PROGNOZOWANIA EFEKTÓW ENERGETYCZNYCH PROCESU PRZECINANIA DREWNA	41
4.1. <i>Metody teoretyczno – doświadczalne wyznaczania składowych całkowitej siły skrawania</i>	41
4.1.1. <i>Właściwy opór skrawania</i>	41
4.1.2. <i>Właściwy powierzchniowo-tarciowy opór skrawania</i>	43
4.1.3. <i>Statystyczny model wieloczynnikowy</i>	43
4.2. <i>Metoda uwzględniająca naprężenia poślizgu</i>	44
4.3. <i>Metoda uwzględniająca naprężenia poślizgu i elementy mechaniki</i>	45
4.4. <i>Metody przybliżone</i>	48
5. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY	49
6. METODYKA BADAŃ EFEKTÓW ENERGETYCZNYCH PROCESU PRZECINANIA	50
6.1. <i>Ogólna charakterystyka materiału badawczego</i>	50
6.2. <i>Stanowisko badawcze, aparatura i oprogramowanie</i>	51
6.3. <i>Metodyka badań empirycznych pomiaru efektów energetycznych procesu przecinania</i>	55
6.4. <i>Metodyka wyznaczania R oraz τ_v na podstawie testów skrawalnościowych</i> ..	59
6.5. <i>Metodyka prognozowania mocy skrawania według nowatorskiej metody uwzględniającej wiązkość materiału dla pił o odmiennej szerokości rzazu piły</i>	60
7. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA	61
7.1. <i>Wyniki badań efektów energetycznych</i>	61
7.1.1. <i>Drewno sosnowe pochodzące z Bałtyckiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (Kraina A)</i>	61
7.1.2. <i>Drewno sosnowe pochodzące z Karpackiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (Kraina B)</i>	62

7.1.3. Drewno sosnowe pochodzące z Małopolskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (Kraina C)	63
7.1.4. Drewno sosnowe pochodzące z Wielkopolsko-Pomorskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (Kraina D)	64
7.2. Wiążkość i naprężenia tnące w strefie skrawania dla badanego drewna.....	65
7.3. Podsumowanie i analiza.....	67
8. OKREŚLENIE KĄTA ŚCINANIA ϕ_c ORAZ ODKSZTAŁCENIA POSTACIOWEGO γ	69
9. PROGNOZOWANIE MOCY SKRAWANIA DLA OPERACJI PRZECINANIA NA WYBRANYCH PILARKACH STOSOWANYCH W POLSKIM PRZEMYŚLE TARTACZNYM	75
9.1. Pilarka ramowa DTRB-63 (firmy FOD, PL)	76
9.2. Pilarka tarczowa PRW 422 (firmy TOS Svitavy, CZ)	79
9.3. Pilarka taśmowa ST100R (firmy Stenner, UK)	83
10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI	86
10.1. Wnioski poznawcze.....	87
10.2. Wnioski użyteczne	87
10.3. Kierunki dalszych badań	88
WYKAZ LITERATURY	89
WYKAZ RYSUNKÓW	95
WYKAZ TABEL.....	97
Dodatek A: Rozwiązywanie równań nieliniowych	98
Dodatek B: Wykresy prognozowanych wartości kąta ścinania, odkształcenia postaciowego wzdłuż płaszczyzny ścinania oraz współczynnika korekcyjnego tarcia	106

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ

A_D	przekrój warstwy skrawanej [mm ²],
D_{cs}	średnica piły tarczowej [mm],
D_k	średnica koła taśmowego [mm],
F_a	siła czynna [N],
F_c	siła skrawania [N],
F_{cS}	składowa siły skrawania wywierana na główną krawędź skrawającą [N],
$F_{cS'}$	składowa siły skrawania wywierana na pomocniczą krawędź skrawającą [N],
F_{cT}	siła skrawania działająca na kierunku ruchu głównego [N],
$F_{c\mu}$	siła tarcia pomiędzy boczną powierzchnią zęba a materiałem obrabianym [N],
$F_{c\mu b}$	siły tarcia pomiędzy piłą a materiałem obrabianym [N],
F_f	siła posuwu [N],
F_{fT}	siła posuwowa działająca na kierunku ruchu posuwowego [N],
F_{f1}	siła posuwowa działająca na jeden ząb piły [N],
F_N	siła normalna do powierzchni natarcia [N],
$F_{N\Phi}$	siła normalna do płaszczyzny ścinania [N],
F_{pT}	siła odporowa prostopadła do płaszczyzny roboczej [N],
$F_{T\Phi}$	siła tnąca w płaszczyźnie ścinania [N],
F_{zT}	całkowita siła tnąca [N],
F_μ	siła tarcia na powierzchni natarcia [N],
H_P	wysokość materiału obrabianego, głębokość cięcia [mm],
H_{RP}	skok ramy piłowej [mm],
K_F	współczynnik wyznaczany empirycznie,
$K_F R_m$	iloczyn interpretowany jako ekwiwalent właściwego oporu skrawania (współczynnik skrawania) [MPa],
MC	wilgotność drewna [%],
MOR	wytrzymałość na zginanie statyczne (ang. modulus of rupture in bending) [MPa],
P	podziałka zębów piły [mm],
P_{ac}	moc potrzebna na przyspieszenie wiórów [W],
$\overline{P}_c$	wartość średnia mocy skrawania w cyklu pracy ramy piłowej (suw roboczy wraz z suwem jałowym) [kW],
P_{cA}	dostępna moc skrawania w strefie skrawania [kW],
P_{cA}^1	dostępna moc skrawania w strefie skrawania przypadająca na jedną piłę [kW],
$\overline{P}_{cw}$	wartość średnia mocy skrawania w suwie roboczym ramy piłowej [kW],
$\overline{P}_{cw}^{1p}$	wartość średnia mocy skrawania w suwie roboczym przypadająca na jedną piłę ze sprzęgu [W],
$\overline{P}_{cT}$	wartość średnia całkowitej mocy napędu głównego [kW],
P_{EM}	moc silnika elektrycznego [kW],

P_{fe}	płaszczyzna boczna robocza,
$\bar{P}_i$	wartość średnia mocy biegu luzem napędu głównego [kW],
$R_{\perp}$	właściwa praca tworzenia nowej powierzchni (wiązkosć) [J/m ²],
SG	właściwa gęstość drewna [kg/m ³],
S_t	rozwarcie całkowite (rzaz teoretyczny) [mm],
T	temperatura drewna [°],
TC	współczynnik stożka kłody [cm/m],
Q_{shear}	współczynnik korekcyjny tarcia,
Y, Z, Y_M, Z_M	osie układu współrzędnych pilarki i osie ustawienia narzędzia,
a	położenie pryzmy obrabianej względem osi obrotu wrzeciona piły tarczowej [mm],
b	szerokość brzeszczotu piły [mm],
d	średnica kłody w środku jej długości [cm],
d_g	średnica kłody w cieńszym końcu [cm],
f	liczba stopni swobody dla wartości testu t-Studenta,
f_z	posuw na ząb [mm],
g_p	grubość przekładek mocujących piłę w sprzęgu [mm],
h	grubość warstwy skrawanej [mm],
h_z	wysokość zęba [mm],
k	współczynnik korekcyjny właściwego oporu skrawania,
k_{CE}	współczynnik właściwego oporu skrawania uwzględniający kształt i wymiary ostrza,
k_c	właściwy opór skrawania [MPa],
k_{cS}	właściwy powierzchniowy opór skrawania na głównej krawędzi skrawającej [MPa],
$k'_{cS'}$	właściwy powierzchniowy opór skrawania na pomocniczych krawędziach skrawających [MPa],
$k''_{cS'}$	właściwy powierzchniowy opór skrawania przypadający na jednostkę czynnej długości pomocniczej krawędzi skrawającej [N/m ³],
$k_{c\mu}$	właściwy powierzchniowo-tarciowy opór skrawania [MPa],
k_d	współczynnik właściwego oporu skrawania uwzględniający zużycie ostrza,
k_h	współczynnik właściwego oporu skrawania uwzględniający grubość wióra,
k_{MC}	współczynnik właściwego oporu skrawania uwzględniający wilgotność drewna,
k_{vc}	współczynnik właściwego oporu skrawania uwzględniający prędkość skrawania,
k_{ws}	współczynnik właściwego oporu skrawania uwzględniający rodzaj drewna,
k_{wT}	współczynnik właściwego oporu skrawania uwzględniający temperaturę drewna,
k_{δ}	współczynnik właściwego oporu skrawania uwzględniający kąt skrawania,
k_{μ}	współczynnik właściwego oporu skrawania uwzględniający tarcie pomiędzy drewnem a ostrzem,
k_{Φ}	podstawowy właściwy opór skrawania [MPa],
$k_{ }, k_{\#}, k_{\perp}$	współczynniki właściwego oporu skrawania uwzględniające kierunki podstawowe,
$k_{ \#}, k_{ \perp}, k_{\#\perp}$	współczynniki właściwego oporu skrawania uwzględniające kierunki pośrednie,

$\dot{m}$	strumień masy drewna (wiórów) ze skrawanego [kg/s],
n	prędkość obrotowa piły [1/min],
n_1, n_2	liczebność przeprowadzonych prób,
n_k	prędkość obrotowa koła taśmowego [1/min],
n_{RP}	liczba skoków ramy piłowej [1/min],
n_{sb}	liczba pił w sprzęgu [szt.],
r	współczynnik korelacji Pearsona,
r^2	współczynnik determinacji,
r_o	promień zaokrąglenia głównej krawędzi skrawającej (reprezentuje zużycie ostrza) [μm],
s	grubość brzeszczotu piły [mm],
s_1 i s_2	odchylenia standardowe z populacji,
t	wartość testu t-Studenta,
v_c	prędkość skrawania [m/s],
v_f	prędkość posuwowa [m/min],
w	liczba zębów będąca w kontakcie z materiałem obrabianym [szt.],
$\bar{x}_1$ i $\bar{x}_2$	wartości średnie z przeprowadzonych prób,
z	liczba zębów piły [szt.],
z_a	średnia liczbę zębów będących w kontakcie z dnem rzazu [szt.],
β_f	kąt ostrza [$^\circ$],
β_μ	kąt tarcia [$^\circ$],
Φ_c	kąt ścinania [$^\circ$],
Φ_{G-vc}	kąt pomiędzy włóknami a kierunkiem prędkości skrawania [$^\circ$],
α	poziom istotności,
α_f	kąt przyłożenia ostrza [$^\circ$],
δ_f	kąt skrawania [$^\circ$],
γ_f	kąt natarcia ostrza [$^\circ$],
γ	odkształcenie przy ścinaniu wzdłuż płaszczyzny ścinania,
κ_r	kąt przystawienia krawędzi skrawającej roboczy [$^\circ$],
λ_s	kąt pochylenia głównej krawędzi skrawającej [$^\circ$],
μ	współczynnik tarcia,
ξ	kąt kierunkowy ruchu roboczego [$^\circ$],
ρ	gęstość przecinanego drewna [kg/m^3],
ρ_8	gęstość drewna przy wilgotności drewna 8% [kg/m^3],
σ_N	wartość naprężeń napinających piłę [MPa],
φ	położenie katowe zęba [rad],
τ_y	naprężenia tnące w strefie skrawania [MPa],

1. WPROWADZENIE

Drewno, pomimo szybkiego rozwoju technologicznego w ostatnich dwóch stuleciach, jest nadal bardzo ważnym materiałem dla człowieka. Popularność, trwającą od stuleci, materiał ten zawdzięcza głównie łatwości pozyskania oraz możliwości odnowienia jego bazy. Dzięki wielu zaletom drewna oraz pomimo wad jakie posiada, jest ono surowcem, z którego człowiek nie jest w stanie zrezygnować.

W ostatnim dziesięcioleciu wraz z dynamicznym wzrostem gospodarczym w Polsce oraz na świecie, nastąpił agresywny rozwój przemysłu drzewnego. W Polsce spowodowany jest on głównie znacznym wzrostem aktywności w sektorze budownictwa, który bezpośrednio za sobą pociąga przemysł meblarski. Gałęzie przemysłu oraz dziedziny działalności człowieka używają drewna nieprzerwanie jako: surowiec, materiał pomocniczy lub gotowy produkt. W Polsce, w przemyśle drzewno – papierniczym najczęściej drewno przerabiane jest na tarcicę, sklejkę, okleinę, a także na płyty drewnopodobne i masy celulozowe [86, 87].

W wyniku nastąpienia kryzysu finansowego w Europie i na świecie w znaczący sposób zintensyfikowano poszukiwania redukcji kosztów produkcji we wszystkich gałęziach przemysłu. Optymalizacja kosztów w przemyśle drzewnym wiąże się z dążeniem do uzyskania coraz mniejszych odpadów materiałowych [53, 79, 80] oraz z projektowaniem precyzyjnych procesów technologicznych obróbki drewna. Procesy takie, poprzez właściwy dobór mocy maszyn technologicznych pozwalają na zmniejszenie strat energetycznych. Należy więc dążyć do optymalnego doboru: maszyny (mocy skrawania) do obróbki drewna, parametrów obróbki, jak również narzędzi skrawających (optymalna geometria ostrza), co pozwoli na uzyskiwanie produktów o wyższej jakości oraz zapewni redukcję strat energii w procesach obróbki, to zaś bezpośrednio przyczyni się do zwiększenia konkurencyjności na rynku. Straty energii bardzo często występują w wyniku złego oszacowania zapotrzebowania mocy skrawania pilarki do aktualnego zadania produkcyjnego (niewykorzystanie zbyt dużej mocy zainstalowanych silników) lub złego doboru geometrii ostrza narzędzia, co niepotrzebnie zwiększa energię potrzebną na obróbkę materiału. Ponadto, nieznamość efektów energetycznych procesu obróbkowego, może niekiedy doprowadzić do zatrzymania linii produkcyjnej poprzez przeciążenie narzędzi zbyt wysokimi siłami skrawania, na skutek którego nastąpi ich uszkodzenie.

Dla projektowania i optymalizacji przebiegu procesu obróbkowego oraz właściwości elementów technologicznego systemu obróbki istotne znaczenie ma ocena efektów energetycznych, związana ściśle z mechaniką procesu skrawania. Mechanikę skrawania uważa się za fundamentalny dział teorii skrawania [34, 51], nie tylko w obszarze obróbki metali ale również drewna. Dane o wartościach sił (mocy skrawania) są wykorzystywane w procesach projektowania obrabiarek, a także dla potrzeb automatycznego sterowania procesem technologicznym, ze sterowaniem adaptacyjnym włącznie. Sterowanie automatyczne przebiegiem procesu technologicznego jest często spotykane w zakładach przerobu drewna w liniach produkcyjnych opartych głównie na pilarkach tarczowych bądź taśmowych.

Dokładne prognozowanie zapotrzebowania mocy skrawania, umożliwi wyeliminowanie strat energetycznych w procesie obróbki. Znane do tej pory metody określania efektów energetycznych procesów przecinania drewna piłami wykorzystują równość, co do wartości, właściwej energii skrawania i właściwego oporu skrawania [45, 51]. W literaturze z zakresu tematu spotyka się wartości właściwych oporów skrawania głównie dla sosny, przy różnych sposobach przecinania. Dane te, są następnie mnożone przez szereg współczynników korekcyjnych w celu określenia wartości niezbędnych dla analizowanych warunków skrawania. Dodatkowo nie są publikowane warunki w jakich wyznaczano te współczynniki.

Metoda prognozowania mocy skrawania proponowana w pracy, opiera się na modelu obliczeniowym zaproponowanym przez Orłowskiego i Atkinsa [56], bazującym na idei Atkinsa [5, 7], który z powodzeniem był przez niego zastosowany do wyjaśniania zjawisk występujących między innymi przy skrawaniu metali, drewna (skrawanie płaskie) i materiałów kompozytowych [7]. Model ten stwarza możliwość znacznie dokładniejszego prognozowania mocy skrawania z uwzględnieniem geometrii ostrza narzędzia obrabiającego (kąt natarcia), warunków kształtowania wióra (kąt ścinania) oraz własności materiałowych przecinanego surowca, takich jak: wiązkość (energia właściwa niezbędna na rozdzielenie materiału) [1] i naprężenia tnące w strefie skrawania.

Krzosek w swoich pracach [38, 39] wykazał, że właściwości wytrzymałościowe drewna zależą od regionu jego pochodzenia. Także wstępne badania przecinania sosny pochodzącej z różnych obszarów Polski wykazały, że właściwości materiału obrabianego zależą nie tylko od gatunku drewna lecz również silnie od jego pochodzenia [16, 17, 18, 62, 63, 64]. Co więcej, właściwości te mogą być wyznaczone na podstawie wyników badań skrawalnościowych, których metodykę opracowano w Katedrze Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji Politechniki Gdańskiej [56, 57, 58]. Wyznaczone dane materiałowe mogą być wykorzystywane do prognozowania mocy skrawania dla pił o odmiennych wartościach rozwarcia całkowitego (rzaz teoretyczny) oraz dla pilarek z innymi układami kinematycznymi.

Postanowiono przeprowadzić prognozowanie efektów energetycznych w oparciu o opracowaną metodykę, dla badanego drewna pochodzącego z czterech regionów Polski, na przykładzie pilarek zainstalowanych w jednym z tartaków województwa pomorskiego. Analizy te były efektem otrzymanego stypendium w ramach projektu „Innodoktorant – stypendia dla doktorantów, V edycja”, które było realizowane przez Departament Rozwoju Gospodarczego Urzędu Marszałkowskiego Województwa Pomorskiego, gdzie jednym z warunków była przydatność opracowań naukowych dla przemysłu w województwie pomorskim.

2. KINEMATYCZNE I GEOMETRYCZNE PARAMETRY PRZECINANIA PIŁAMI

Proces przecinania piłami, jest najbardziej rozpowszechnionym procesem obróbki drewna. Znajduje on zastosowanie w pierwszej fazie obróbki drewna oraz w kolejnych etapach. Maszyny, które realizują proces przecinania drewna, nazywane są *pilarkami*. Służą one do przepiłowywania drewna w różnej postaci: drewna okrągłego, tarcicy i tworzyw drzewnych. Najpopularniejszymi pilarkami stosowanymi w przemyśle drzewnym są:

- pilarki ramowe (traki),
- pilarki tarczowe,
- pilarki taśmowe.

Pilarki posiadają zróżnicowane układy kinematyczne, które wykonują ruchy robocze charakterystyczne dla danego rodzaju maszyny (prostoliniowy ciągły, prostoliniowy cykliczny lub obrotowy) [10, 52, 69, 70].

2.1. *Przecinanie na pilarkach ramowych*

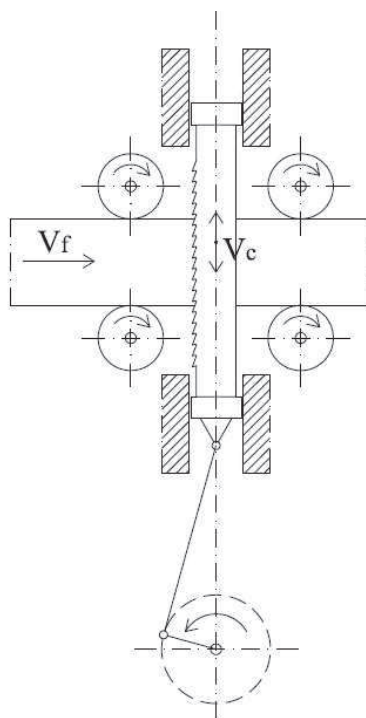
Pilarki ramowe (rys. 2.1), inaczej znane jako *traki pionowe* (znacznie bardziej powszechne, aniżeli traki poziome) są bardzo popularnymi obrabiarkami w polskim przemyśle tartacznym. Przeznaczeniem tych maszyn jest głównie dzielenia kłód i dłużyć na deski, bale, krawędziaki i przyzmy. Najczęściej obrabianym drewnem przez traki pionowe jest drewno iglaste, tylko niekiedy przecina się cienkie kłody drewna liściastego.



Rysunek 2.1. Trak ramowy DTRB-63 (firmy FOD, PL) w Tartaku "Complex" w Dziemianach [zdjęcie własne]

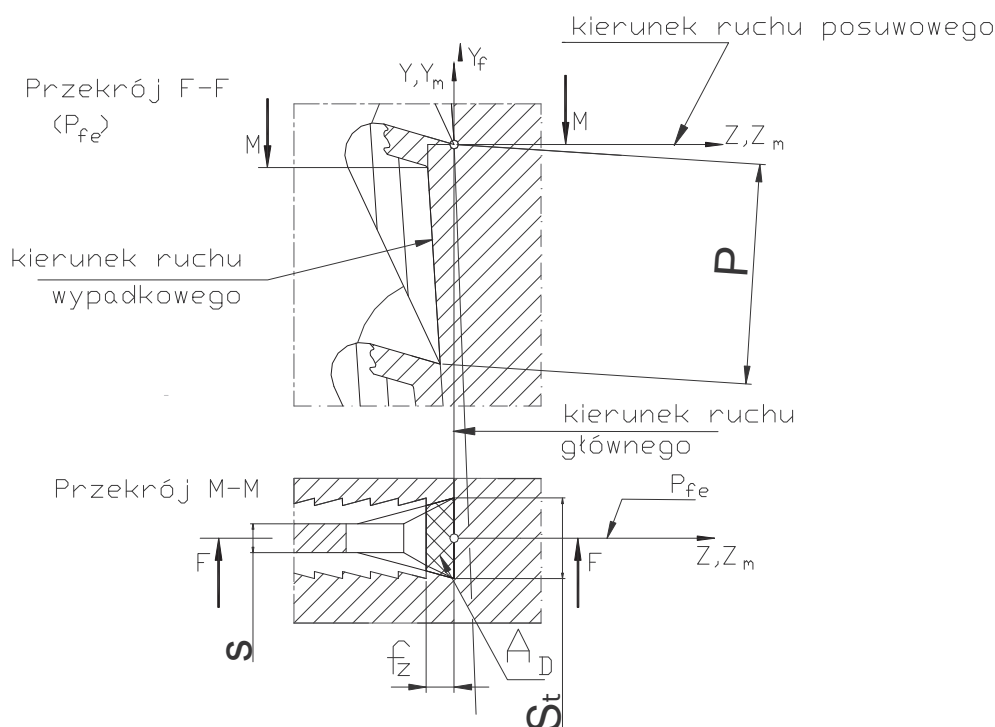
Obróbka na pilarkach ramowych odbywa się przy zastosowaniu sprzęgu pił, czyli zestawu składającego się od kilku lub kilkudziesięciu pił. Wspomniane piły, to tzw. *piły proste* [10, 48],

które zamocowane są równoległe do siebie w ramie trakowej. Rama trakowa wykonuje ruch prostoliniowo – zwrotny (rys. 2.2). Ruch główny (roboczy) odbywa się podczas ruchu ramy trakowej w dół, wówczas następuje skrawanie (rys. 2.3). Dopełnieniem cyklu pracy ramy trakowej jest ruch powrotny, podczas którego skrawanie się nie odbywa. W zależności od rozwiązań kinematycznych pilarki, rama trakowa może być prowadzona ruchem prostoliniowym, eliptycznym oraz zróżnicowanym, co szerzej opisuje Orłowski [53, 58]. Zaletą kinematyki z eliptycznym i zróżnicowanym ruchem ramy trakowej, jest to, że podczas ruchu powrotnego ramy, powierzchnie przyłożenia nie mają kontaktu z dnem rzazu. Takie rozwiązania pozwalają wydłużyć żywotność ostrzy pił, obniżyć energochłonność procesu skrawania, a także zredukować wartość szerokości rzazu [53, 76, 77].



Rysunek 2.2. Schemat działania tradycyjnego traka pionowego, v_f – prędkość posuwowa (mm/s), v_c – prędkość skrawania [10, 48, 52, 69, 70]

Materiał obrabiany (drewno) jest prowadzony, zarówno przed, jak i za ramą traka, przez walce posuwowe z prędkością posuwową v_f . Liczba walców prowadzących jest zróżnicowana w zależności od rodzaju konstrukcji i producenta maszyny [10, 48, 52, 69, 70].



Rysunek 2.3. Kinematyka przecinania na pilarce ramowej: s – grubość brzeszczotu piły, A_D – przekrój warstwy skrawanej, Y, Z oraz Y_m, Z_m – osie układu współrzędnych pilarki i osie ustawienia narzędzia, Y_f – oś współrzędnych układu f , P_{fe} – płaszczyzna boczna robocza [53]

Piły proste do traków pionowych (trakowe), charakteryzują się uzębieniem jednostajnym, jednokierunkowym. Piły trakowe są wykonywane zazwyczaj ze stali stopowej z dodatkiem chromu i wanadu, walcowanej na zimno, utwardzanej i odpuszczanej, o twardości HRC 45 ÷ 49, w zależności od producenta. Oferowane piły różnią się głównie sposobem wykonania uzębienia: piły stellite, piły chromowane, piły zgrubiane, piły rozwierane [35, 98 – 103]. Główne parametry kinematyczne są obliczane za pomocą zależności 2.1 i 2.2 przedstawionych poniżej, które uwzględniają rodzaj realizowanego ruchu roboczego [10, 48, 52, 69, 70].

Średnią prędkość skrawania obliczana jest z zależności:

$$v_c = \frac{2 \cdot H_{RP} \cdot n_{RP}}{60 \cdot 1000} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.1)$$

gdzie:

H_{RP} – skok ramy piłowej, mm ,

n_{RP} – liczba skoków ramy piłowej, $1/min$.

Pilarki ramowe pracują zazwyczaj ze średnią prędkością skrawania $v_c = 2 \div 8 \text{ m/s}$, a posuw na ostrze oscyluje w zakresie wartości $f_z = 0.3 \div 1.4 \text{ mm}$ w zależności od panujących warunków [48]. Prędkość posuwu do $v_f = 18 \text{ m/min}$ [104 – 106].

Posuw na ostrze (zęb):

$$f_z = \frac{1000 \cdot v_f \cdot P}{H_{RP} \cdot n_{RP}} [mm] \quad (2.2)$$

gdzie:

v_f – prędkość posuwu, m/s ,
 P – podziałka zębów piły, mm .

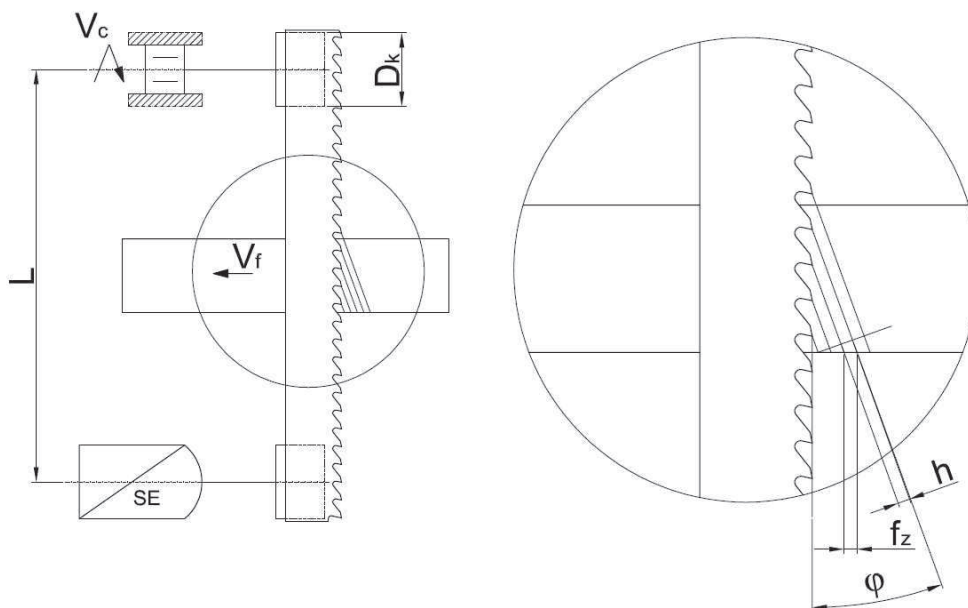
2.2. **Przecinanie na pilarkach taśmowych**

Pilarki taśmowe, które znane są również pod nazwą *taśmówki* (rys. 2.4), w zależności od celu i przeznaczenia obróbki, służą do piłowania surowca okrągłego i tarcicy. Spotyka się pilarki z pionowym i poziomy usytuowaniem pił. Te ostatnie często w żargonie warsztatowym zwane są również trakami, co może być niekiedy mylące. Charakterystyczną cechą dla pilarek taśmowych jest stała prędkość skrawania oraz posuw. Ruch roboczy narzędzia jest prostoliniowy, odbywający się w jednym kierunku. Wykonywany jest on, jak wspomniano powyżej, ze stałą prędkością (rys. 2.5). Prędkość robocza zazwyczaj mieści się w zakresie $v_c = 20 \div 75 \text{ m/s}$ [48, 107, 108].



Rysunek 2.4. Pilarka taśmowa ST100R firmy Stenner w Tartaku "Complex" w Dziemianach [zdjęcie własne]

Ruch posuwowy materiału obrabianego jest najczęściej prostoliniowy, niemniej w pracach stolarskich i przy użyciu bardzo wąskich pił ruch ten może być krzywoliniowy [48]. Prędkość posuwu pilarek taśmowych wynosi $v_f = 20 \div 120 \text{ m/min}$ [107, 108, 109]. Kierunek ruchu roboczego względem ruchu posuwowego jest prostopadły.



Rysunek 2.5. Schemat skrawania na pilarce taśmowej [10, 52, 69]

Zależność na prędkość skrawania prezentuje się następująco:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_k \cdot n_k}{60 \cdot 1000} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.3)$$

gdzie:

D_k – średnica koła taśmowego, mm ,

n_k – prędkość obrotowa koła taśmowego, $1/min$.

Posuw na ząb można określić przy pomocy zależności:

$$f_z = \frac{v_f \cdot P}{v_c} = \frac{1000 \cdot v_f}{n_k \cdot z} [mm] \quad (2.4)$$

gdzie:

v_f – prędkość posuwu, m/min ,

P – podziałka zębów pił, mm ,

v_c – prędkość skrawania, m/s ,

n_k – prędkość obrotowa koła taśmowego, $1/min$,

z – liczba zębów w taśmie.

2.3. Przecinananie na pilarkach tarczowych

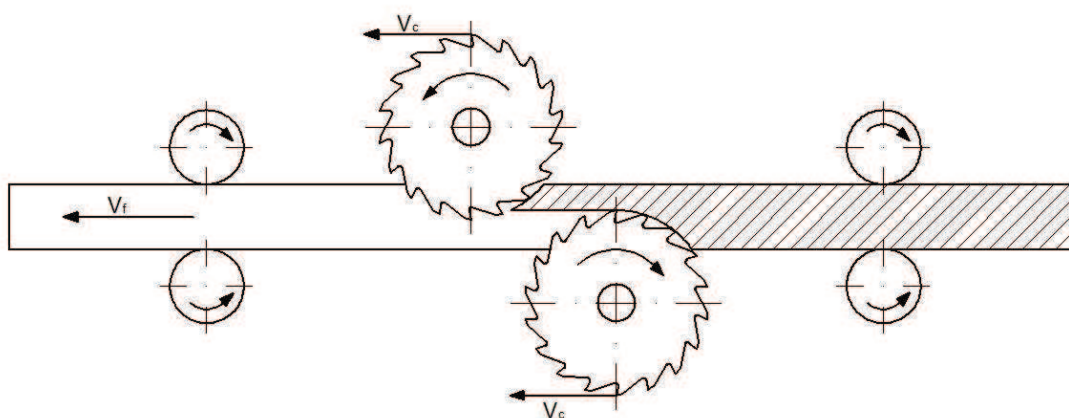
Pilarki tarczowe, zwane *tarczówkami*, to jedno z najbardziej popularnych pilarek w polskim przemyśle drzewnym i meblarskim. Proces przecinania piłami tarczowymi swoją popularność zawdzięcza zastosowaniu, w tym rodzaju przecinania, prostych i tanich narzędzi jakimi są piły tarczowe [80]. Przecinananie piłami tarczowymi jest również bardzo wydajne, głównie dzięki możliwości zastosowania wielu pił jednocześnie (rys. 2.6) oraz możliwości

stosowania wysokich prędkości skrawania ($v_c = 50 \div 100 \text{ m/s}$, w zależności od rodzaju drewna) i posuwu ($f_z = 0.03 \div 0.35 \text{ mm}$) [110, 111].



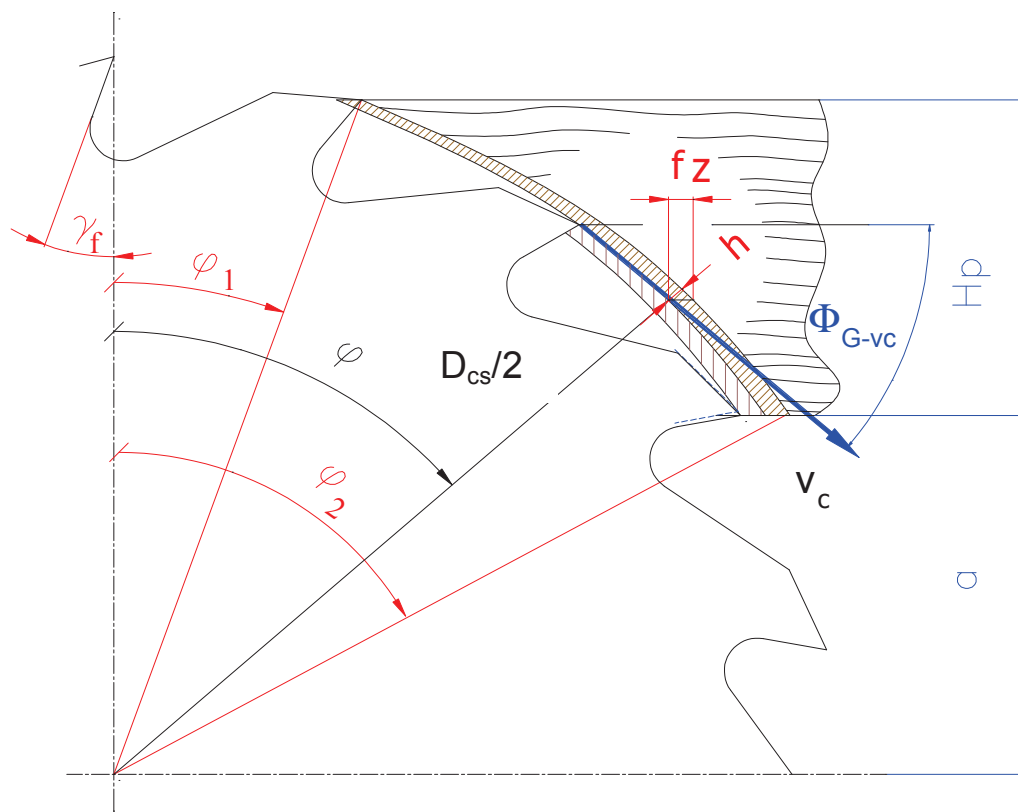
Rysunek 2.6. Pilarka tarczowa PRW 422 (f. TOS Svitavy) w Tartaku "Complex" w Dziemianach. Dwuwrzecionowa, z zamontowanymi dziewięcioma pilami na każdym wrzecionie [zdjęcie własne]

Narzędzie w pilarkach tarczowych wykonuje ruch obrotowy jako ruch roboczy (rys. 2.7 i rys. 2.8). Obroty są stałej ilości i w jednym kierunku. Ruch posuwowy, wykonywany jest przez narzędzie lub przedmiot obrabiany, w zależności o rodzaju konstrukcji pilarki. Zwykle jest on prostoliniowy i równoległy do płaszczyzny pracy piły. Prędkość posuwu jest stała. Pilarki te stosuje się do przecinania wzdłużnego, poprzecznego i skośnego [48, 75, 80].



Rysunek 2.7. Schemat działania pilarki tarczowej dwuwrzecionowej [10, 52, 69, 70]

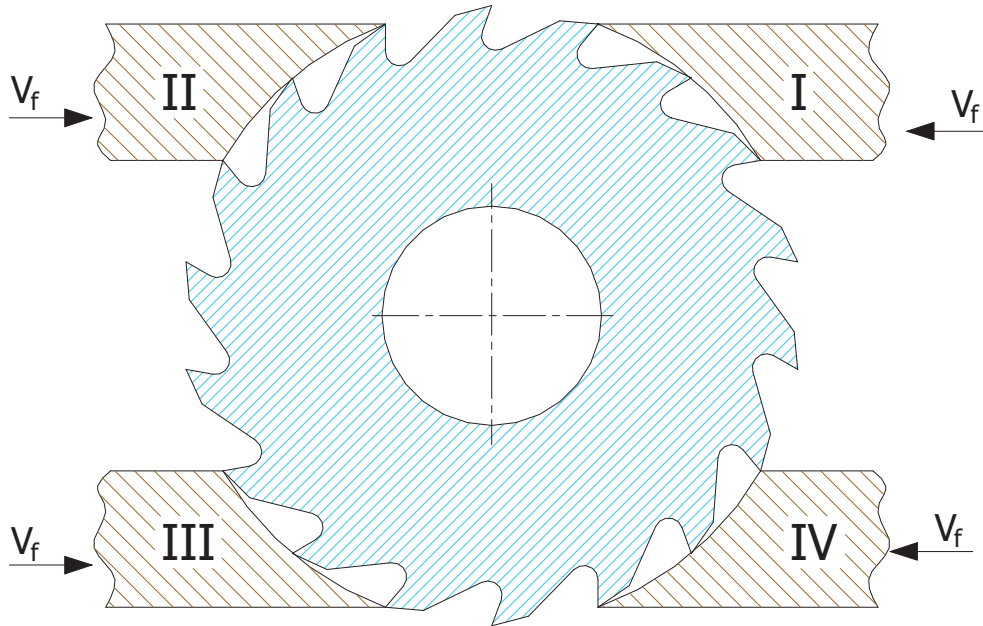
Ostrza pił tarczowych przeznaczonych do przecinania drewna i materiałów drewnopochodnych są najczęściej wykonywane z węgliku spiekanego, ale również ze stali [35, 112] czy tzw. ostrza diamentowe, czyli zęby z węgliku spiekanego, pokrytego warstwą diamentu polikrystalicznego [35, 113, 114].



Rysunek 2.8. Kinematyka przecinania na pilarsce tarczowej: f_z – posuw na ostrze, D_{cs} – średnica piły tarczowej, h – grubość warstwy skrawanej, H_p – wysokość próbki (głębokość cięcia), a – położenie pryzmy obrabianej, ϕ – położenie katowe zęba, Φ_{G-vc} – kąt pomiędzy włóknami a kierunkiem prędkości skrawania [64]

W zależności od położenia materiału obrabianego i kierunku jego ruchu względem piły (rys. 2.9), przecinanie piłą tarczową może odbywać się w czterech wariantach kinematycznych [46, 79, 80]:

- I – przecinanie dolnowrzecionowe przeciwbieżne,
- II – przecinanie dolnowrzecionowe współbieżne,
- III – przecinania górnoprzecionowe przeciwbieżne,
- IV – przecinanie górnoprzecionowe współbieżne.



Rysunek 2.9. Warianty kinematyczne przecinania piły tarczową [75, 78]

Prędkość skrawania w piłach tarczowych oblicza się ze wzoru:

$$v_c = \frac{\pi \cdot D_{cs} \cdot n}{60 \cdot 1000} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (2.5)$$

gdzie:

D_{cs} – średnica piły tarczowej, mm ,

n – prędkość obrotowa piły, $1/min$.

Posuw na ostrze (zęb) można określić z zależności:

$$f_z = \frac{1000 \cdot v_f}{n \cdot z} [mm] \quad (2.6)$$

gdzie:

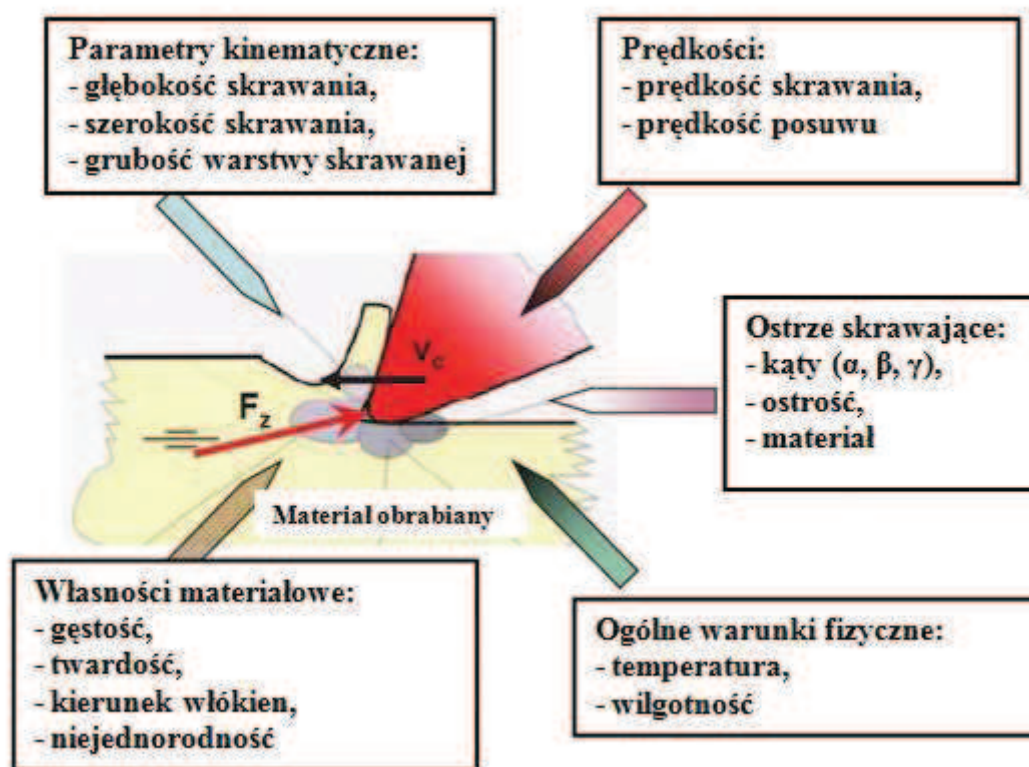
v_f – prędkość posuwu, m/min ,

z – liczba zębów w pile.

3. MECHANIKA PROCESU SKRAWANIA

3.1. Składowe całkowitej siły skrawania

Znajomość sił występujących w procesie skrawania, jak również znajomość parametrów mających wpływ na wartości tych sił, jest ważna z wielu powodów, między innymi tj.: możliwość zaprojektowania konstrukcji mechanicznej urządzenia, tak aby skutecznie wytrzymywała obciążenie siłami występującymi w procesie przecinania; pomaga w wyborze odpowiedniego napędu silnikowego na etapie projektowania (dobór parametrów obróbki); pozwala na precyzyjne określenie zużycia energii podczas procesu obróbki, oraz dobranie liczby narzędzi dla danego procesu; pozwala na przewidywanie trwałości narzędzi; monitorowanie i zwiększanie wydajności procesu obróbki.



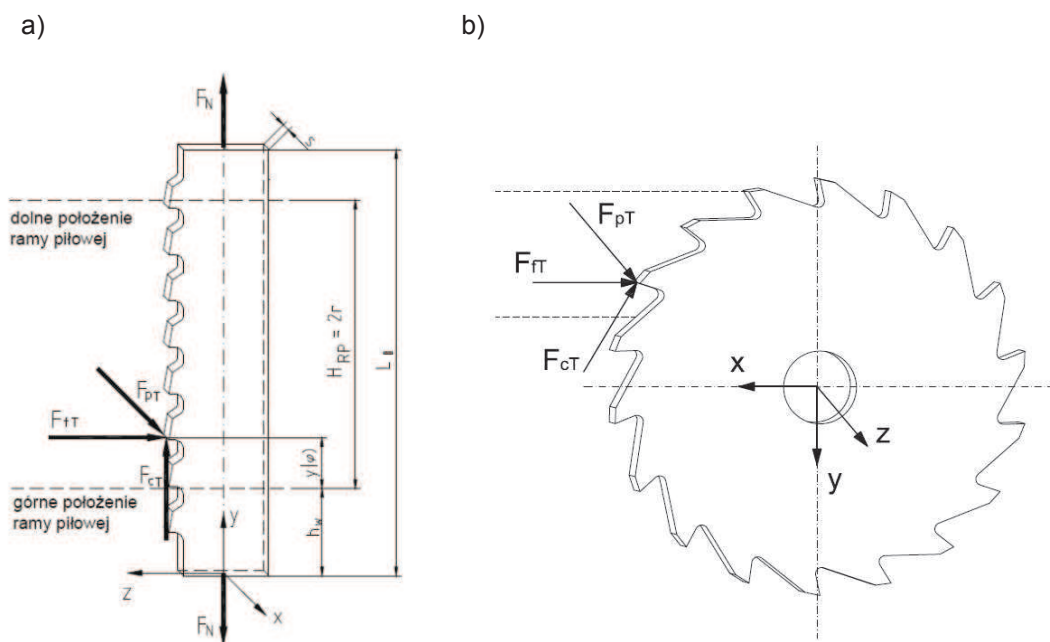
Rysunek 3.1. Parametry wpływające na wartości sił skrawania [68]

Siły skrawania powstają w wyniku wzajemnego oddziaływania krawędzi skrawającej i przedmiotu obrabianego. Wartości tych sił są uwarunkowane licznymi parametrami, których przykładowy podział przedstawia rysunek 3.1. Większość parametrów mających wpływ na wartości siły skrawania jest wyznaczana empirycznie [34, 68].

Całkowita siła tnąca F_{zT} , jest odpowiednio dużą siłą, którą należy wyrzucić w układzie narzędzie skrawające – przedmiot obrabiany, aby realizować proces skrawania. Siłę tą można podzielić geometrycznie na siły składowe (rów. 3.1): siłę skrawania F_{cT} , działającą na kierunku ruchu

głównego; siłę posuwową F_{fT} , działającą na kierunku ruchu posuwowego oraz siłę odporową F_{pT} , prostopadłą do płaszczyzny roboczej (rys. 3.2) [34, 53, 85].

$$\vec{F}_{zT} = \vec{F}_{cT} + \vec{F}_{fT} + \vec{F}_{pT} \quad (3.1)$$



Rysunek 3.2. Obciążenia zewnętrzne piły podczas skrawania: a) trakowej [53], b) tarczowej [80]

Przyjmując, że opory skrawania i warunki tarcia są takie same po obu stronach zęba, siła skrawania F_c działająca na jeden ząb może być przedstawiona jako suma sił oddziałujących na materiał obrabiany (rys. 3.3) [53, 54, 60, 61], która jest zapisana w postaci:

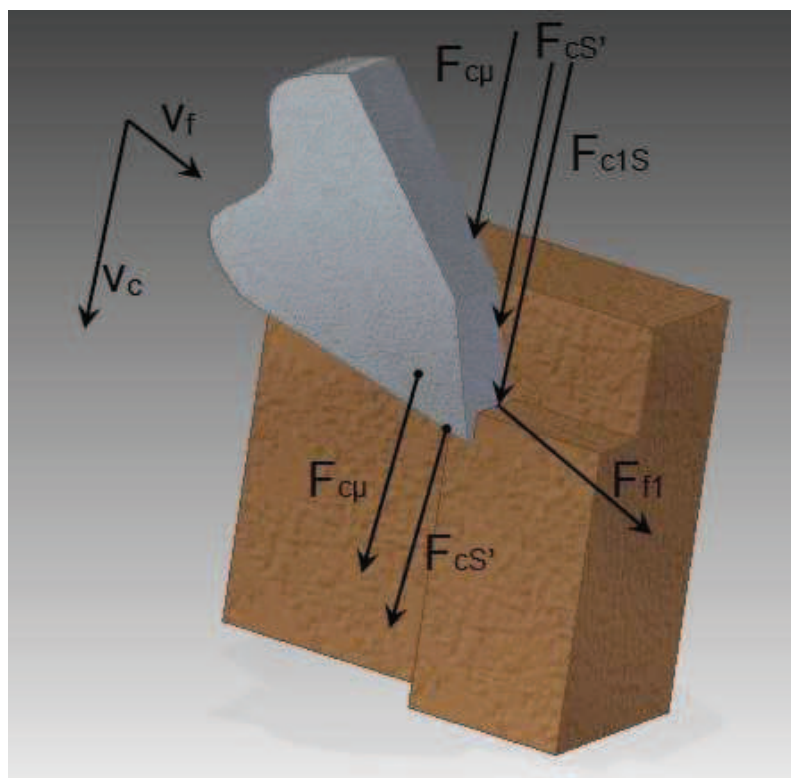
$$F_c = F_{cS} + 2 \cdot F_{cS'} + 2 \cdot F_{c\mu} \quad (3.2)$$

gdzie: F_{cS} – składowa siły skrawania wywierana na główną krawędź skrawającą wyrażoną w N , $F_{cS'}$ – składowa siły skrawania wywierana na pomocniczą krawędź skrawającą, N , $F_{c\mu}$ – siła tarcia pomiędzy boczną powierzchnią zęba a materiałem obrabianym, N .

Do określenia całkowitej siły skrawania F_{cT} działającej w kierunku ruchu głównego należy uwzględnić wszystkie siły skrawania działające na zęby piły będące w kontakcie z materiałem obrabianym F_{ci} oraz siły tarcia pomiędzy piłą a materiałem obrabianym $F_{c\mu b}$. Wówczas całkowitą siłę skrawania można zapisać jako:

$$F_{cT} = 2 \cdot F_{c\mu b} + \sum_{i=1}^{i=w} F_{ci} \quad (3.3)$$

gdzie: w – liczba zębów będąca w kontakcie z materiałem obrabianym.



Rysunek 3.3. Siły skrawania związane z kierunkiem ruchu głównego przypadające na jeden ząb piły, gdzie v_c - prędkość skrawania, v_f - prędkość posuwu, F_{f1} - siła posuwowa działająca na jeden ząb piły

Mechaniczny proces przepiłowywania materiału obrabianego (proces tworzenia wióra), można opisać opierając się na procesie ortogonalnym (dwu wymiarowa deformacja), przy założeniu, że siły związane z kierunkiem ruchu głównego dla jednego ostrza piły równoważą się z siłą skrawania F_c działającą w środku krawędzi skrawającej. Siły oddziaływujące w strefie skrawania, czyli w obszarze styku narzędzia skrawającego i materiału obrabianego, można przedstawić, w uproszczeniu za pomocą klasycznego modelu Ernsta – Merchanta (tzw. koło sił Ernsta – Merchanta) (rys. 3.4) [3, 4, 34, 45, 60, 64].

Przedstawiony na rysunku 3.4 kąt ścinania Φ_c , określa położenie płaszczyzny ścinania względem powierzchni skrawania (linii działania narzędzia). Wartość tego kąta można określić z równania Merchanta (rów. 3.4), jednakże tylko dla dużych wartości posuwu na ostrze f_z . Uwarunkowanie to wynika, ze stałej wartości kąta ścinania ($\Phi_c = \text{const.}$) właśnie dla większych wartości posuwu na ostrze, co wykazał m.in. Atkins [5, 6].

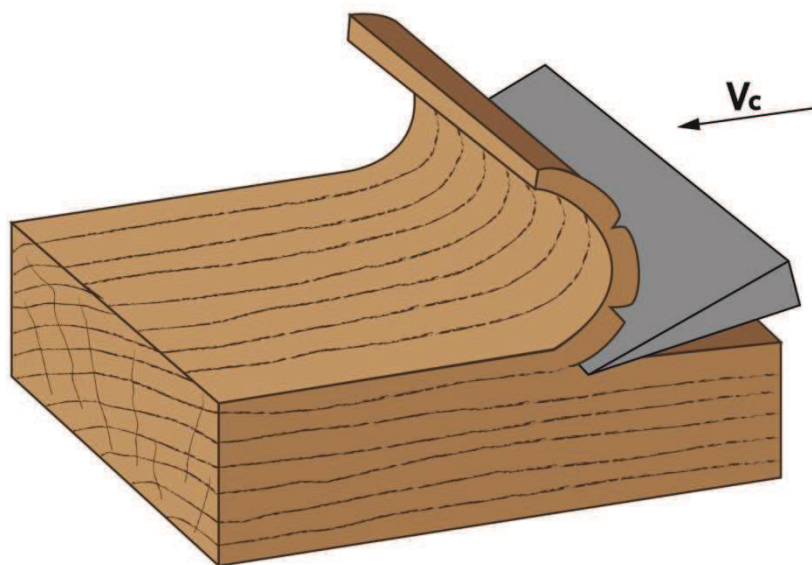
$$\Phi_c = (\pi/4) - (1/2)(\beta_\mu - \gamma_f) \quad (3.4)$$

gdzie: β_μ - kąt tarcia, γ_f - kąt natarcia.

otrzymamy różne zachowania obrabianego materiału. Dlatego klasyfikacje rodzajów wiórów powstają w oparciu o kąt pomiędzy kierunkiem obróbki, a kierunkiem włókien drewna.

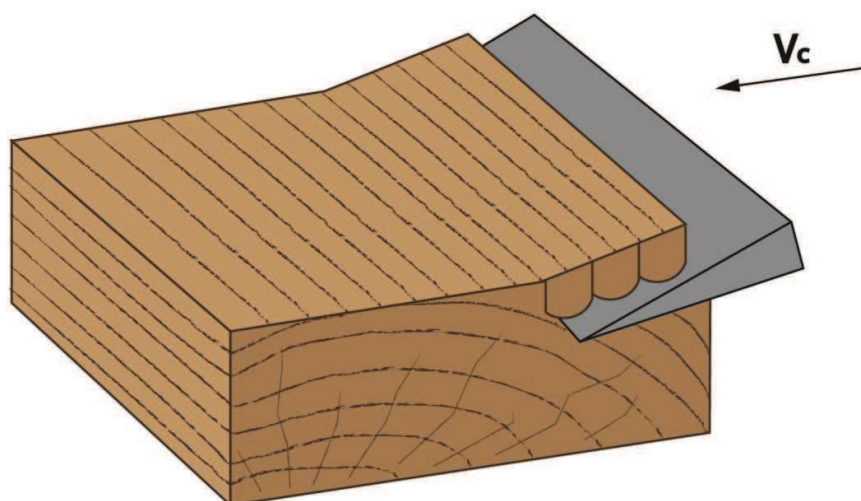
Jednym z pierwszych, którzy badali zależność struktury wióra od kierunku skrawania drewna był Time [74], na którego powołuje się Staniszevska z Zakrzewskim [69]. Time zaobserwował, że przy skrawaniu drewna w trzech położeniach zasadniczych (wzdłuż włókien $\parallel$, stycznie do włókien $\#$, prostopadle do włókien $\perp$), występują zróżnicowania w strukturze wióra.

Dla kierunku obróbki wzdłuż włókien $\parallel$ (rys. 3.5), Time zaobserwował trzy postaci wióra w zależności od grubości warstwy skrawanej. Przy zastosowaniu kąta skrawania $\phi_c = 90^\circ$ i grubości warstwy skrawania $h = 1\text{ mm}$, powstaje wiór w postaci pojedynczych, prostych elementów o znacznej długości, $l = (6\div 12)h$. Zmniejszając nieco wartości grubości warstwy skrawania oraz kąta skrawania, wiór prezentuje się w postaci bardziej jednolitej, gładkiej taśmy. Dla wartości grubości warstwy skrawania $h = 0,1\div 0,2\text{ mm}$, wiór przyjmuje postać taśmy spiralnej, jednolitej.



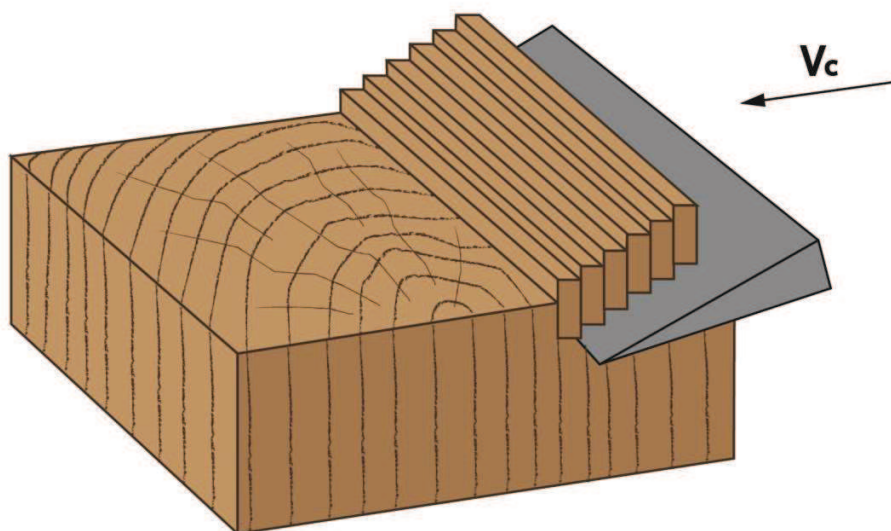
Rysunek 3.5. Struktura wióra podczas skrawania wzdłuż włókien (według Time) [69]

Skrawając drewno stycznie do włókien $\#$ (rys. 3.6), przy małych wartościach grubości skrawanej, można zaobserwować wiór w postaci jednolitej taśmy, lecz o małej wytrzymałości na rozciąganie w poprzek włókien. Zwiększając wartość grubości skrawania, postać wiórów jest mniej jednolita, popękana. Staniszevska i Zakrzewski [69] zauważają, że skrawając drewno stycznie do włókien, można otrzymać jednolity, wytrzymały wiór, bez wewnętrznych pęknięć. Chcąc otrzymać taki wiór przy tym rodzaju obróbki, należy zastosować silny nacisk na drewno, uprzednio uplastycznione obróbką hydrotermiczną, bezpośrednio przed krawędzią skrawającą [13, 69, 74].



Rysunek 3.6. Struktura wióra podczas skrawania stycznie do włókien (według Time) [69]

Podczas skrawania prostopadłego do włókien $\perp$ (rys. 3.7), można zaobserwować wiór rozpadający się na drobne elementy. Dodatkowo, w pracy [69] zwraca się uwagę na powstawanie pęknięć w głąb drewna, prostopadłych do krawędzi tnącej. Zjawisko to przypisuje się niejednorodności budowy anatomicznej przyrostów rocznych [69, 74].



Rysunek 3.7. Struktura wióra podczas skrawania prostopadłego do włókien (według Time) [69]

Temat wpływu kierunku skrawania drewna względem kierunku włókien, na siły skrawania, rodzaje wiórów i warunki ich formowania, stał się bardzo popularny w latach pięćdziesiątych XX wieku. Wówczas pojawiły się prace Kivimaa (1952) [37], Franza (1958) [27], McKenzie (1961) [47]. W tym okresie powstały dwie klasyfikacje rodzajów wiórów, uwzględniające kierunek włókien obrabianego drewna.

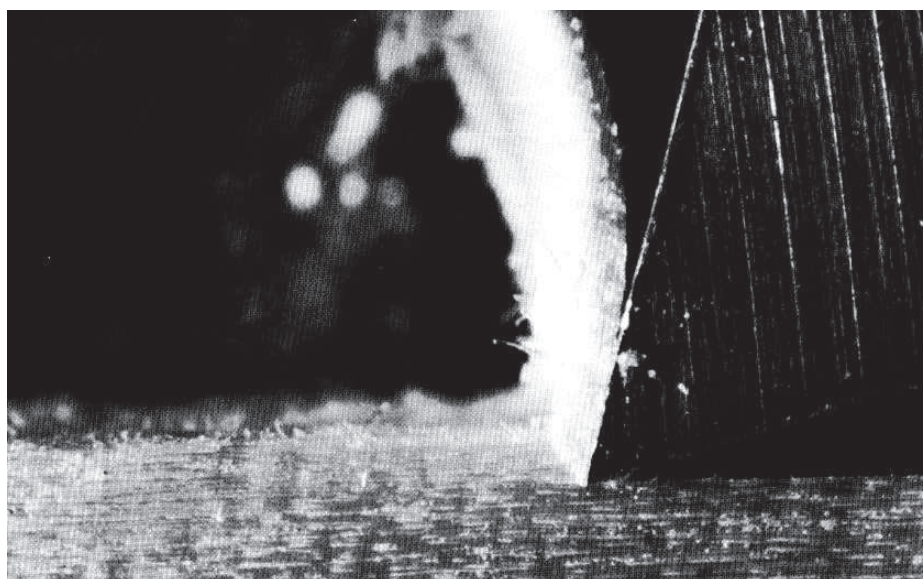
Pierwsza klasyfikacja rodzajów wiórów, powstała w oparciu o badania skrawania drewna wzdłuż włókien II ($\Phi_{G-vc} = 0^\circ$) i opracował ją Franz [27]. Klasyfikacja ta obejmowała trzy typy wiórów:

- Typ I, wiór powstaje poprzez rozdzielenie się materiału przed krawędzią skrawającą, tworzy proste segmenty o znacznej długości, które następnie łamią się w wyniku zginania przez powierzchnię natarci ostrza (rys. 3.8).

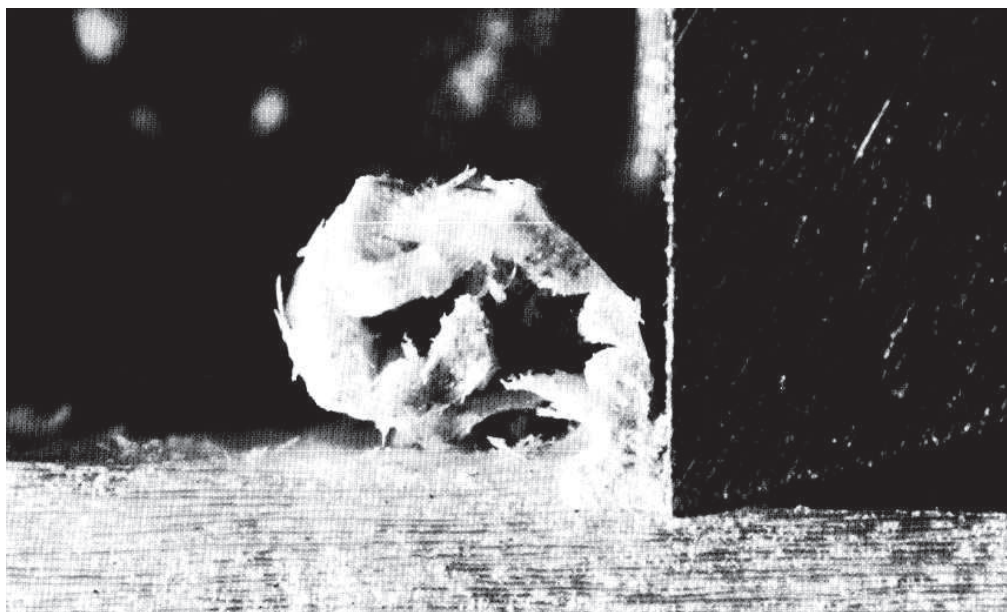


Rysunek 3.8. Wiór typu I według klasyfikacji Franz'a [27]

- Typ II, rozdzielenie materiału następuje na przecięciu się płaszczyzny krawędzi ostrza tnącego i płaszczyzny powierzchni powstałej po obróbce (rys. 3.9).
- Typ III, występuje, gdy narzędzie dodatkowo ściska drewno, w wyniku czego rozdzielenie materiału odbywa się na krawędzi skrawającej (rys. 3.10).



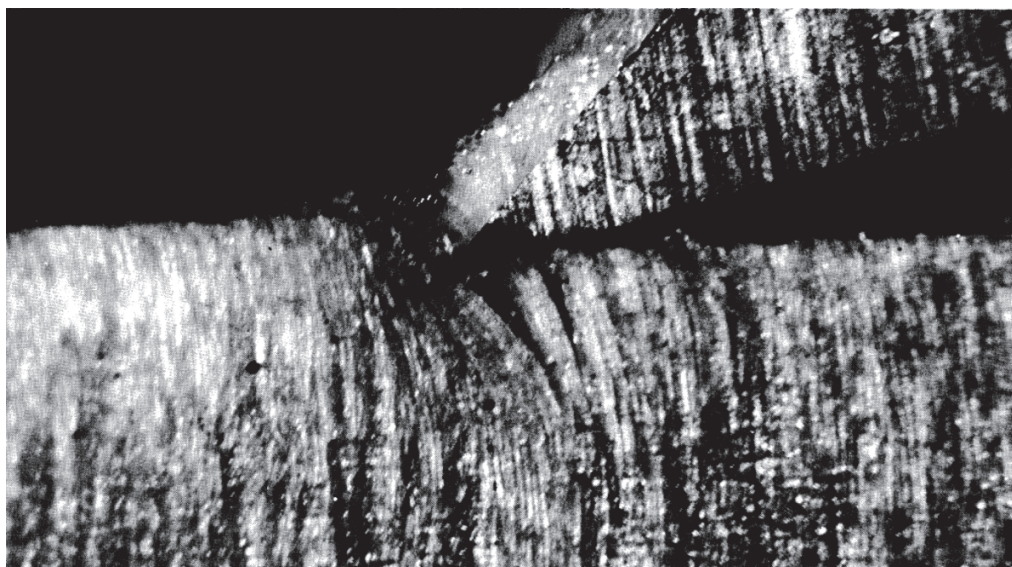
Rysunek 3.9. Wiór typu II według klasyfikacji Franz'a [27]



Rysunek 3.10. Wiór typu III według klasyfikacji Franz'a [27]

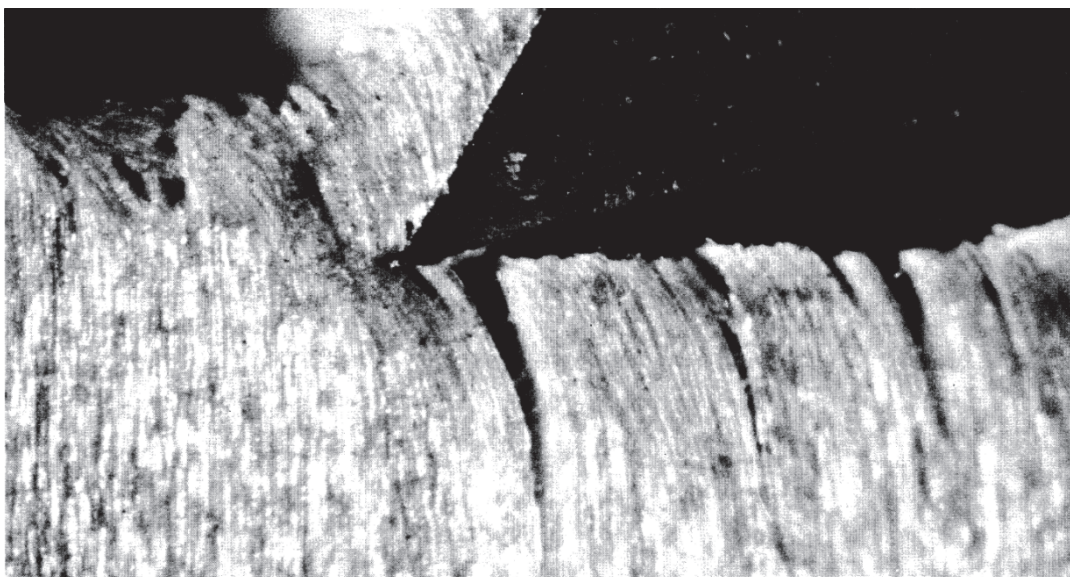
Drugi rodzaj klasyfikacji rodzajów wiórów został opracowany przez McKenzie [47]. Swoje badania przeprowadzał on obrabiając drewno w kierunku prostopadłym do włókien $\perp$ ($\Phi_{G-vc} = 90^\circ$). Klasyfikacja ta obejmuje dwa typy wiórów:

- Typ I, charakteryzuje się tym, że po pierwszym przejściu narzędzia skrawającego, średnie siły skrawania są zasadniczo takie same dla kolejnych przejść. Występują pęknięcia wzdłuż włókien poniżej płaszczyzny cięcia.
- Typ I-a, krótki, regularny wiór, związany z małymi długościami fal i małej amplitudzie sił tnących, charakteryzuje się stosunkowo wysoką jakością powierzchni obrabianej (rys. 3.11).



Rysunek 3.11. Wiór typu I-a według klasyfikacji McKenzie [47]

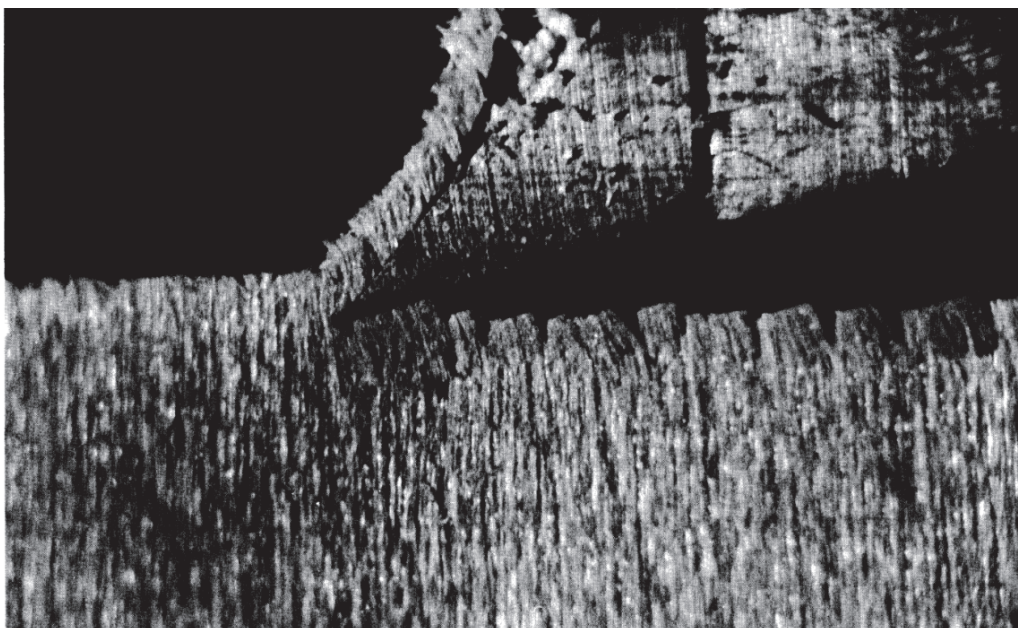
- Typ I-b, występują dwa, trzy lub więcej krótkich segmentów między dość regularnie występujący dłuższymi segmentami, które mają wpływ na pogorszenie jakości powierzchni obrabianej (rys. 3.12).



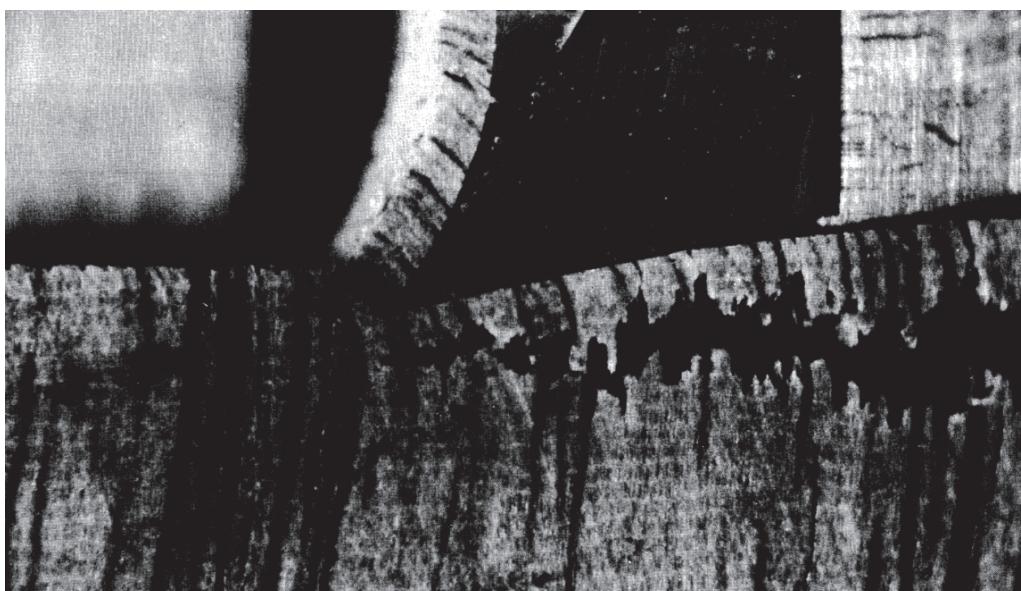
Rysunek 3.12. Wiór typu I-b według klasyfikacji McKenzie [47]

W obu przypadkach, po pierwszym przejściu narzędzia skrawającego, rozstaw i długość powstających segmentów wióra pozostaje zasadniczo takie same, dla kolejnych przejść. Segmenty wióra powstające po odcięciu powyżej płaszczyzny skrawania, tworzą się w wyniku pęknięć wzdłuż włókien występujących poniżej płaszczyzny skrawania. Po odcięciu pierwszej warstwy wióry typu I-a tworzą luźno połączony ciąg segmentów, zaś wióry typu I-b stanowią grupy segmentów, których długość decyduje o częstotliwości występowania dłuższych segmentów wióra.

- Typ II, związany jest z cykliczną zmianą średniej siły skrawania pomiędzy kolejnymi cięciami. Występują pęknięcia w płaszczyźnie prostopadłej do kierunku włókien (równoległej do płaszczyzny skrawania), w zmiennej odległości poniżej płaszczyzny skrawania. Wióry tego typu występują w postaci przerywanej, typ II-a oraz w postaci ciągłej, typ II-b.
- Typ II-a (rys. 3.13), podczas procesu powstawania tego typu wióra, rozdzielanie materiału następuje powyżej płaszczyzny skrawania, formują się segmenty poniżej płaszczyzny skrawania, które będą skrawane przy następnym przejściu ostrza.
- Podczas tworzenia się wióra typu II-b (rys. 3.14), rozdzielanie materiału następuje w płaszczyźnie skrawania. Może nastąpić również równoczesne rozcięcie materiału poniżej płaszczyzny ścinania i tworzyć segmenty materiału poniżej płaszczyzny skrawania, które będą usunięte przy kolejnym przejściu narzędzia skrawającego.



Rysunek 3.13. Wiór typu II-a według klasyfikacji McKenzie [47]

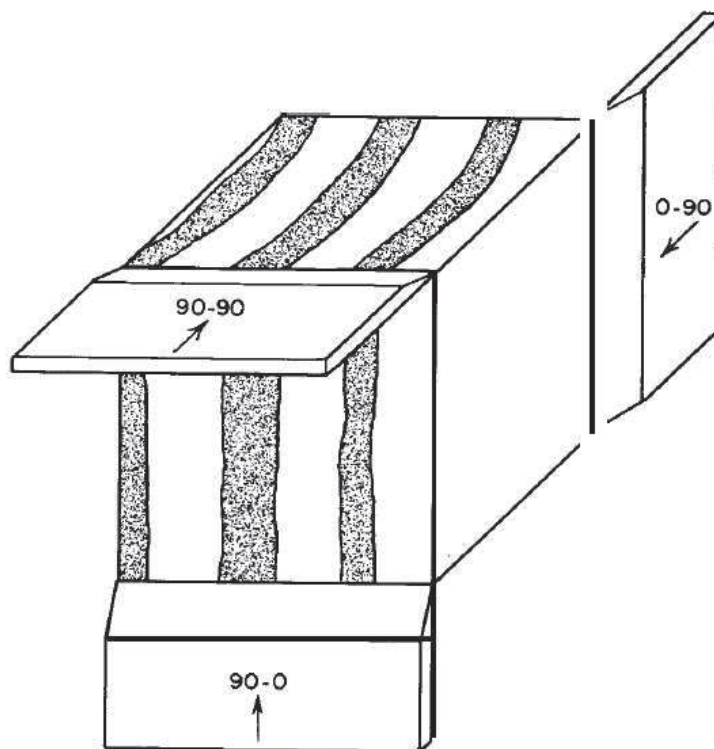


Rysunek 3.14. Wiór typu II-b według klasyfikacji McKenzie [47]

W niektórych warunkach mogą nastąpić płynne zmiany typu powstającego wióra w procesie skrawania, pomiędzy typami II-a i II-b.

W późniejszym okresie proces powstawania wiórów, w zależności od kierunku skrawania względem kierunku włókien drewna, był również przedmiotem wielu badań. Woodson i Koch (1970) [83] badali siły oraz rodzaj powstających wiórów podczas skrawania sosny Loblolly, na specjalnie przygotowanych próbkach, w trzech kierunkach względem włókien drewna: równoległym (90–0), prostopadłym (0–90) oraz prostopadłym (90–90) (rys. 3.15). Skrawania dokonywano dla drewna wczesnego i drewna późnego, przy różnych grubościach warstwy skrawanej (w calach: 0,015; 0,03; 0,045; 0,06), trzech poziomach wilgotności (drewno mokre, 15%, 7%) oraz różnych kątach natarcia w zakresie od 15° do 70°, a stałym kącie

przyłożenia 15° (dla kierunku skrawania $0 - 90$, przy kącie natarcia 70° , kąt przyłożenia wynosił 0°).



Rysunek 3.15. Kierunki skrawania drewna podczas badań Woodson'a i Koch'a [83]. Pierwsza liczba określa kąt pomiędzy krawędzią skrawającą, a kierunkiem włókien. Druga liczba to kąt pomiędzy kierunkiem skrawania, a kierunkiem włókien.

W pracy [83] zaobserwowano, że kierunek skrawania drewna względem włókien ma wpływ na siły skrawania, rodzaj i proces powstawania wiórów. Dla kierunku równoległego ($90-0$) zaobserwowano występowanie trzech typów wiórów według klasyfikacji Franza [27], w zależności od różnych konfiguracji pozostałych uwzględnianych w badaniach parametrów skrawania (tabela 3.1). Zauważono również, że przy skrawaniu takiego samego materiału (drewno późne sosny Loblolly), o takim samym poziomie wilgotności (7%), z tą samą grubością warstwy skrawanej ($0,045$ cala), jedynie przy zastosowaniu narzędzi o różnych kątach natarcia, powstają dwa różne typy wiórów według klasyfikacji Franza. W tym przypadku rodzaj wióra zależał wyłącznie od kąta natarcia, co świadczy o tym, że kąt ten ma także znaczący wpływ na rodzaj powstających wiórów. Dodatkowo zarejestrowano dwa rodzaje wiórów w przypadku procesu skrawania drewna wczesnego i drewna późnego sosny Loblolly, dla którego zmierzono wilgotność 7% , z grubością warstwy skrawanej $0,045$ cala, a kąt natarcia narzędzia skrawającego wynosił 5° . Parametry obu procesów skrawania były takie same, inny był jedynie materiał.

Tabela 3.1. Rodzaje wiórów według klasyfikacji Franza zaobserwowane w badaniach Woodsona i Kocha [83], podczas skrawania sosny Loblolly¹⁾ równolegle względem włókien drewna, w kierunku 90-0 (rys. 3.15)

Wilgotność drewna i kąt natarcia	Rodzaje wiórów według klasyfikacji Franz ²⁾	
	Drewno wczesne	Drewno późne
Drewno mokre		
5°	II (III)	II
15°	II (III)	I (II)
25°	I (II)	I
35°	I	I
15,5 %		
5°	III (II)	II (III)
15°	II (III)	II
25°	I (II)	I (II)
35°	I	I
7 %		
5°	III (I)	II (I)
15°	I (III)	I
25°	I	I
35°	I	I
¹⁾ Skrawanie odbywało się z prędkością posuwu 2 cale/min, w zakresie grubości warstwy skrawaniem od 0,015 do 0,06 cala, oraz z kątem przyłożenia 15°; ²⁾ Pierwsza liczba opisuje zaobserwowany typ wióra wg Franz, zaś druga liczba w nawiasie wskazuje, że zaobserwowano połączenie dwóch typów wiórów.		

Podczas badań [83], przy skrawaniu prostopadle do włókien drewna w kierunku 90–90, zaobserwowano rodzaje wiórów, które spełniały warunki sformułowane przez McKenzie [47] dla jego klasyfikacji typów wiórów. W trakcie procesu skrawania, w którym powstawały wióry typu I według McKenziego, średnie siły skrawania były stosunkowo stałe. Występowały szczeliny równoległe do włókien poniżej płaszczyzny skrawania. Powstające szczeliny przyjmowały różne formy: pęknięcia rzadko występujące i praktycznie niewidoczne, wówczas powierzchnia obrobiona była bardzo dobrej jakości, oraz szczeliny występujące z dość dużą częstotliwością i głębokie, wówczas powierzchnia obrobiona była złej jakości.

W badaniach [83] zaobserwowano cykliczną zmianę średnich wartości sił skrawania, charakterystyczną dla procesów skrawania, podczas których powstają wióry typu II według McKenziego. Zauważono także, pęknięcia prostopadle do włókien, na zmiennych odległościach, poniżej płaszczyzny skrawania, które według [47] są typowe dla procesy powstawania tego typu wiórów. Rodzaje wiórów, uzyskane podczas procesu skrawania sosny Loblolly prostopadle do włókien drewna w kierunku 90–90, przeprowadzanego przez Woodsona i Kocha [83], sklasyfikowane według wytycznych McKenziego [47] przedstawiono w tabeli 3.2.

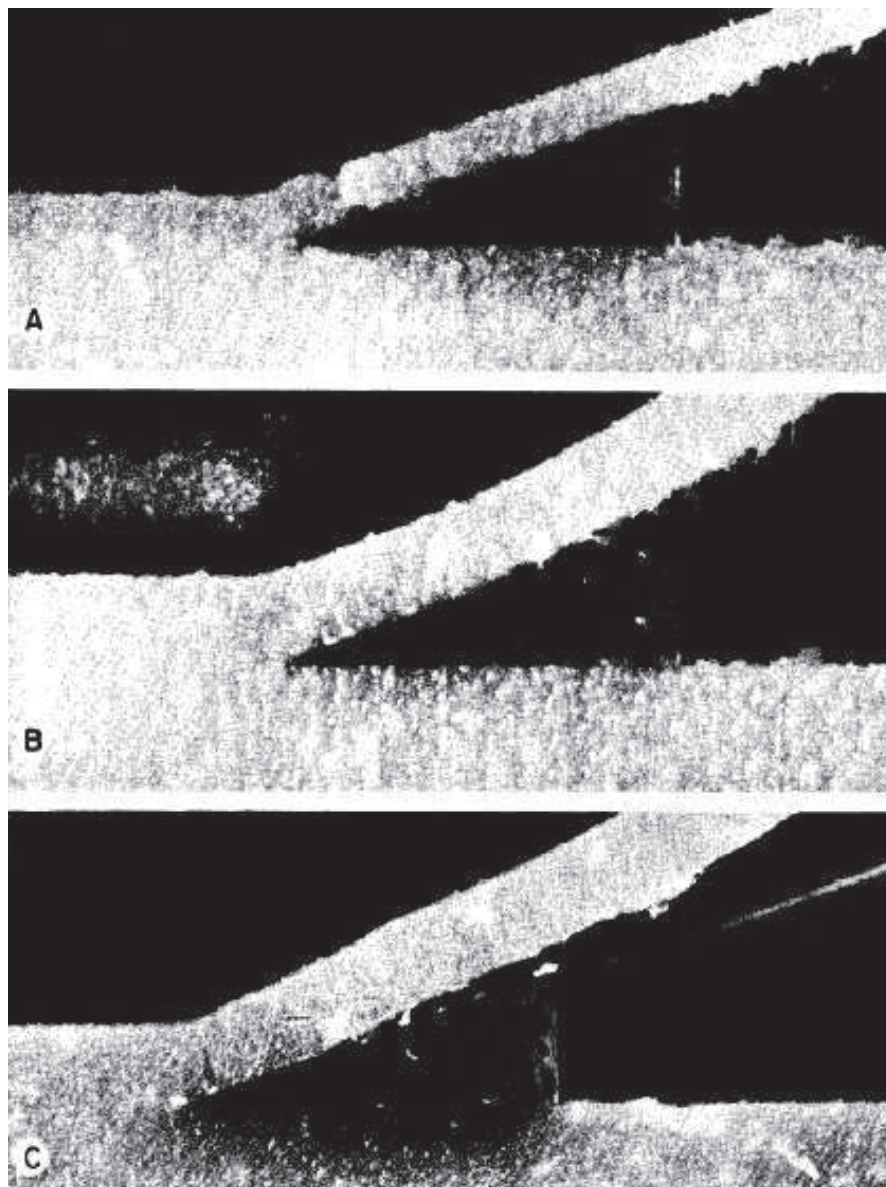
Tabela 3.2. Rodzaje wiórów według klasyfikacji McKenziego zaobserwowane w badaniach Woodsona i Kocha [83], podczas skrawania sosny Loblolly¹⁾ prostopadle względem włókien drewna, w kierunku 90-90 (rys. 3.15)

Wilgotność drewna i kąt natarcia	Rodzaje wiórów według klasyfikacji McKenzie ²⁾	
	Drewno wczesne	Drewno późne
Drewno mokre		
25°	I	I
35°	I	I
45°	I	I
15,5 %		
25°	II (I)	I
35°	II	I
45°	II (I)	I
7 %		
25°	II	II (I)
35°	II	II (I)
45°	II	II (i)
¹⁾ Skrawanie odbywało się z prędkością posuwu 2 cale/min, w zakresie grubości warstwy skrawaniem od 0,015 do 0,06 cala, oraz z kątem przyłożenia 15°; ²⁾ Pierwsza liczba opisuje zaobserwowany typ wióra wg McKenzie, zaś druga liczba w nawiasie wskazuje, że zaobserwowano połączenie dwóch typów wiórów.		

W oparciu o zestawienie wyników badań [83] w tabeli 3.2 można wywnioskować, że największy wpływ na powstający rodzaj wiórów według klasyfikacji McKenziego [47], miał poziom wilgotności drewna. Skrawanie drewna w stanie mokrym, zarówno wczesnego i późnego, prostopadle do włókien drewna w kierunku 90–90, przy różnych kątach natarcia, skutkowało powstawaniem wiórów typu I wg McKenziego. Im badane drewno było bardziej suche, tym częściej powstające wióry były klasyfikowane jako typ II według McKenziego.

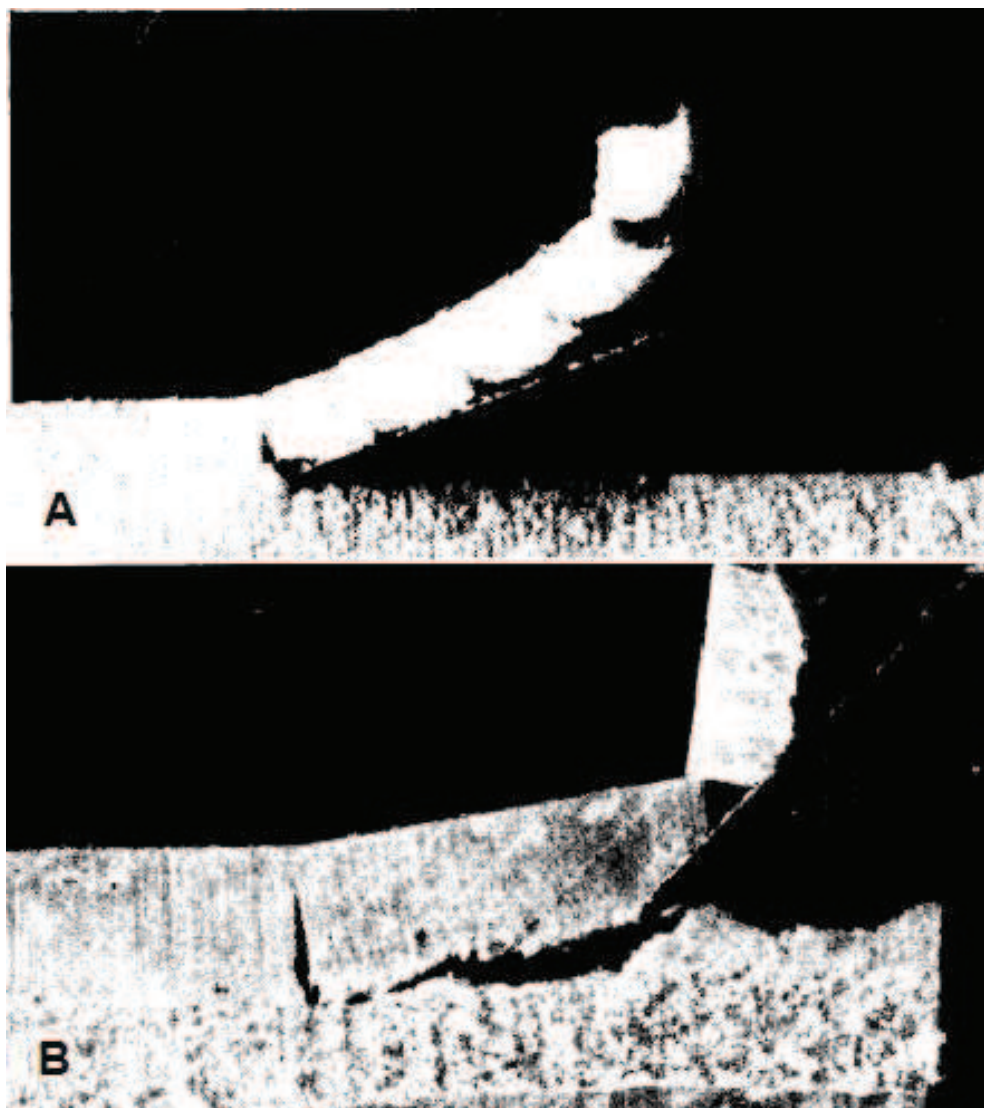
Woodson i Koch [83] w swoich badaniach skrawali sosnę Loblolly, także prostopadle do włókien w kierunku 0–90. Ten kierunek skrawania jest standardowym kierunkiem obróbki drewna w celu uzyskania fornirów. Stosowane w praktyce ostrza skrawające posiadają kąt natarcia 70°, a kąt przyłożenia 0°. Ostrze skrawające działa wspólnie z dociskiem, który ściska materiał obrabiany tuż przed krawędzią skrawającą. W badaniach [83] skrawano drewno bez zastosowania docisku bezpośrednio przed krawędzią skrawającą.

Zaobserwowano, że najlepsze, ciągłe forniry powstawały podczas skrawania drewna późnego w stanie mokrym, przy zastosowaniu ostrza z kątem natarcia 70°. Dla drewna wczesnego w stanie mokrym były widoczne uszkodzenia wióra, przy skrawaniu z zastosowaniem ostrzy z kątem natarcia od 25° do 70°. Jednakże przy wartości kąta natarcia 70° występowały w znacznie mniejszym stopniu (rys. 3.16).



Rysunek 3.16. Fornir ciągły powstający podczas skrawania w kierunku 0 – 90 sosny Loblolly w stanie mokrym, ostrzem z kątem natarcia 70° i kątem przyłożenia 0° [83]. A – drewno wczesne, grubość warstwy skrawanej 0,03 cala. B – drewno wczesne, grubość warstwy skrawanej 0,06 cala. C – drewno późne, grubość warstwy skrawanej 0,06 cala.

Przy zastosowaniu ostrzy o kącie natarcia 45° i mniejszym, dla wszystkich poziomów wilgotności drewna, występowały uszkodzenia forniru, zarówno dla drewna wczesnego jak i późnego. Przerwanie ciągłości wióra następowało najczęściej przy skrawaniu drewna wysuszonego, o poziomie wilgotności 15.5% i 7%, zarówno dla drewna wczesnego jak i późnego oraz dla wszystkich rodzajów stosowanych ostrzy (kąt natarcia od 25° do 70°) (rys. 3.17).



Rysunek 3.17. Uszkodzenia ciągłości forniru podczas skrawania w kierunku 0 – 90 sosny Loblolly o poziomie wilgotności 7% [83]. A – drewno wczesne, grubość warstwy skrawanej 0,06 cala, kąt natarcia 70°, kąt przyłożenia 0°. B – drewno późne, grubość warstwy skrawanej 0,045 cala, kąt natarcia 45°, kąt przyłożenia 15°.

Stewart w swojej pracy [72] rozszerzył temat możliwości prognozowania rodzaju powstającego wióra, zapoczątkowany przez Franza [27], w oparciu o właściwości mechaniczne drewna oraz o składowe siły działającej na narzędzie skrawające podczas ortogonalnego skrawania z uwzględnieniem kierunku włókien drewna. Eksperymentalny test przeprowadzony przez Stewarta [72] polegał na skrawaniu drewna jesionowego (*Fraxinus americana* L.), o poziomie wilgotności 7 %, z krawędzią ostrza prostopadłą do włókien drewna, a kierunek prędkości skrawania względem włókien drewna był zmienny w zakresie od 0° do 30°. Podczas procesów skrawania, obserwowano powstające wióry z dziesięciokrotnym powiększeniem i klasyfikowane je według charakterystyki Franza [27]. W kolejnych swoich badaniach Stewart [73] empirycznie udowodnił, że w zależności od kierunku skrawania względem włókien drewna zmienia się współczynnik tarcia, który może służyć do prognozowania rodzajów wiórów. Stewart w swoich badaniach skrawał trzy gatunki drewna: jesion, klon i lipę. Parametry skrawania były stałe, kąta natarcia 40°, grubość warstwy skrawanej 0,01 cala oraz prędkość

posuwu 6,5 *cal/min*. Zmieniał się kąt pomiędzy kierunkiem skrawania a włóknami drewna w zakresie od 0° do 90°.

Goli i inni [30] skrawali drewno daglezi o poziomie wilgotności 12%, narzędziem o kącie natarcia 20° i kącie przyłożenia 15°, w różnych kierunkach względem włókien drewna (od -60° do 90°). Skrawanie odbywało na specjalnie przygotowanym stanowisku z zastosowaniem dwóch poziomów prędkości skrawania: niskiej (0,005 *m/s*) oraz wysokiej (8 *m/s*), oraz różnych wartości grubości skrawania. Proces skrawania był filmowany kamerą o wysokiej prędkości rejestrowania (13 000 klatek na sekundę). W pracy [30] zaobserwowano, że skrawając wzdłuż włókien drewna, zarówno przy wysokich jak i niskich prędkościach skrawania, powstają pęknięcia poniżej płaszczyzny skrawania. Pęknięcia te są znacząco mniejsze przy skrawaniu z wysokimi prędkościami. Również jakość powierzchni jest lepsza przy obróbce wysokimi prędkościami skrawania. Jednakże przy niskich prędkościach skrawania, powstający wiór jest skupiony i nie rozprasza się w okolicach odbywania się procesu skrawania. Wysokie prędkości skrawania mają znaczny wpływ na rozdrobnienie wióra i rozpylenie go w przestrzeni otaczającej odbywający się proces skrawania, co stanowi zagrożenie dla zdrowia.

Analiza przedstawiona w pracy [30] została rozszerzona przez Wyetha i innych [84], w celu szerszego poznania zagadnienia warunków powstawania i rodzajów wiórów. W pracy [84] potwierdzono to, że drewno jest bardzo trudnym materiałem do modelowania procesu skrawania. Anizotropowość drewna sprawia, że przy procesie skrawania w różnym kierunku względem włókien drewna otrzymujemy różne rodzaje wiórów, nawet przy skrawaniu drewna w określonym kierunku względem włókien, rodzaj wióra jest zróżnicowany w zależności od zmiany kąta natarcia, warunków tarcia, grubości warstwy skrawanej, czy prędkości skrawania.

4. METODY PROGNOZOWANIA EFEKTÓW ENERGETYCZNYCH PROCESU PRZECINANIA DREWNA

4.1. Metody teoretyczno – doświadczalne wyznaczania składowych całkowitej siły skrawania

4.1.1. Właściwy opór skrawania

Metoda, która w oparciu o właściwy powierzchniowy opór skrawania k_c [46, 52], umożliwia określenie efektów energetycznych procesu przecinania (moc i siła skrawania) uważana jest za metodę klasyczną [14, 31, 49, 58, 59, 67]. Podejście to opiera się na doświadczalnie wyznaczonych współczynnikach korekcyjnych, które mają na celu określać zmiany czynników mających wpływ na proces przecinania w odniesieniu do przyjętych warunków podstawowych [46, 52, 69].

$$k_c = k_\Phi \cdot k \quad (4.1)$$

gdzie: k_Φ – podstawowy właściwy opór skrawania w $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$, którego wartość zależy od kierunku wektora prędkości skrawania względem kierunku włókien drewna; k – współczynnik korekcyjny właściwego oporu skrawania [31, 46, 52, 69].

U Manžosa [46] współczynnik korekcyjny k składa się z pięciu czynników uwzględniających warunki odmienne od podstawowych (przyjętych jako wyjściowe) (rów. 4.2).

$$k = k_{ws} \cdot k_{MC} \cdot k_{vc} \cdot k_\delta \cdot k_d \quad (4.2)$$

gdzie: k_{ws} – współczynnik uwzględniający rodzaj drewna, dla drewna sosnowego $k_{ws} = 1$;

k_{MC} – współczynnik uwzględniający wilgotność drewna;

k_{vc} – współczynnik uwzględniający prędkość skrawania;

k_δ – współczynnik uwzględniający kąt skrawania; współczynnik kąta δ_r , często nazywany kątem skrawania [46], który zdefiniowany jest jako suma kąta przyłożenia α_f i kąta rozwarcia ostrza β_f ;

k_d – współczynnik uwzględniający zużycie ostrza.

Orlicz [52] właściwy opór skrawania przedstawił w postaci równania składającego się z iloczynu szeregu współczynników podobnie jak Manžos [46], lecz liczba ich znacznie wzrosła:

$$k = k_{ws} \cdot k_{MC} \cdot k_{vc} \cdot k_\delta \cdot k_d \cdot k_{wT} \cdot k_h \cdot k_\mu \cdot k_{CE} \quad (4.3)$$

gdzie: k_{wT} – współczynnik uwzględniający temperaturę drewna;

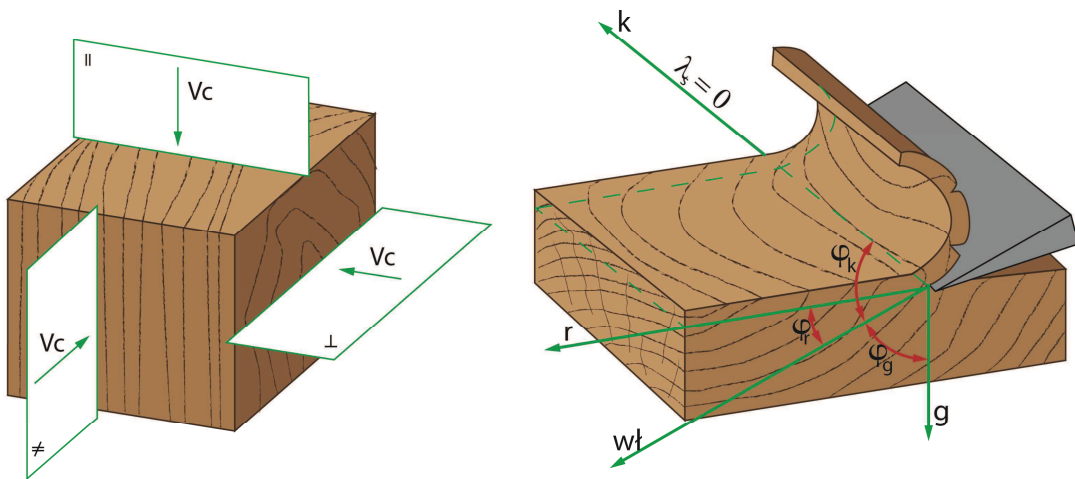
k_h – współczynnik uwzględniający grubość wióra;

k_μ – współczynnik uwzględniający tarcie pomiędzy drewnem a ostrzem;

k_{CE} – współczynnik uwzględniający kształt i wymiary ostrza.

Przy procesie skrawania odbywającym się w warunkach podstawowych [46, 52, 69] współczynnik korekcyjny $k = 1$, gdyż wszystkie współczynniki opisujące poszczególne właściwości, przyjmują także taką wartość. Wówczas właściwy powierzchniowy opór skrawania k_c przyjmują postać podstawowego właściwego oporu skrawania k_Φ :

$$k_c = k_\Phi \cdot k = k_\Phi \cdot 1 = k_\Phi \quad (4.4)$$



Rysunek 4.1. Zasadnicze położenia krawędzi skrawającej (a) i kąty kierunkowe definiującej jej położenie (b) [37, 52]

Wartości k_ϕ są ściśle zależne od wzajemnego położenia kierunku krawędzi ostrza i kierunku położenia włókien drewna obrabianego, uwzględniają kierunki podstawowe $k_{||}$, $k_{\#}$, $k_{\perp}$ oraz pośrednie $k_{||\#}$, $k_{||\perp}$, $k_{\#\perp}$, $k_{||\#\perp}$ (rys. 4.1). Wpływ położenia kierunku obróbki względem włókien drewna obrabianego szeroko analizowali Kivimaa [37] i McKenzie [47]. Do określenia wartości właściwego oporu skrawania dla dowolnej orientacji krawędzi skrawającej stosuje się następującą zależność [31, 46, 52]:

$$k_\phi = k_{||} \cdot \cos^2 \varphi_r + k_{\#} \cdot \cos^2 \varphi_k + k_{\perp} \cdot \cos^2 \varphi_g \quad (4.5)$$

W metodzie Manżosa [46, 52] moc skrawania P_c w watach W , obliczana jest z zależności:

$$P_c = \frac{v_f \cdot S_t \cdot H_p}{60} k_c \quad (4.6)$$

gdzie:

v_f – prędkość posuwu, m/min ,

S_t – szerokość rzazu, mm ,

H_p – wysokość przedmiotu obrabianego (głębokość skrawania), mm .

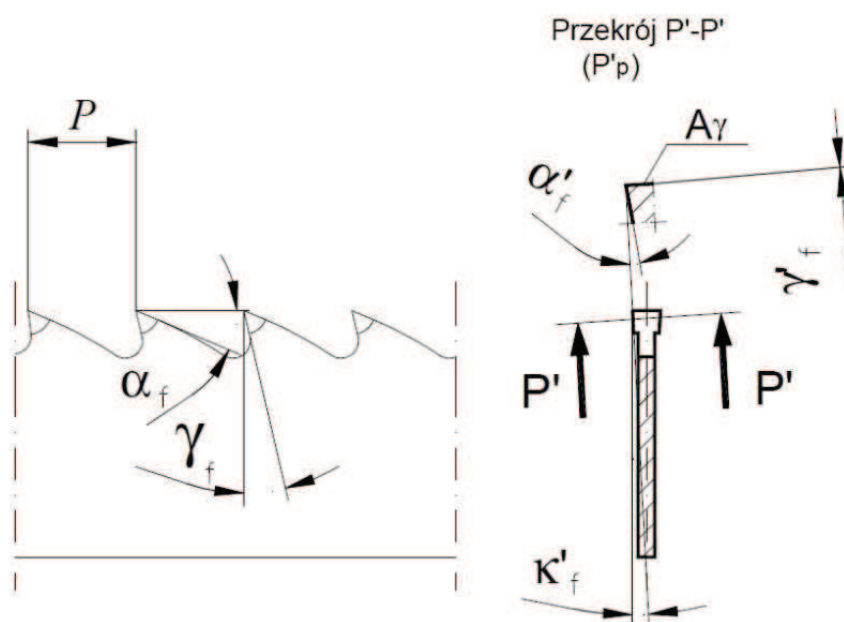
Zależność powyższa (rów. 4.6) ma zastosowanie zarówno dla pilarek ramowych, taśmowych czy tarczowych. Jednakże, kinematyka przecinania na pilarence tarczowej (rys. 2.8) jest zdecydowanie odmienna od kinematyki przecinania na pilarkach ramowych i taśmowych (rys. 2.3). Różnicę tą sprawia zmienność położenia kierunku prędkości skrawania w odniesieniu do kierunku włókien drewna. Podstawowy właściwy opór skrawania k_ϕ można obliczać za pomocą równania 4.7, które zostało opracowane [63] na podstawie graficznego przedstawienia relacji empirycznych opublikowanych przez Manżosa [46].

$$k_\phi = 29.562 \left(\frac{h}{\sin \varphi} \right)^{-0.4052} \quad (4.7)$$

Równanie 4.7 uwzględnia zmianę położenia kierunku wektora prędkości skrawania względem kierunku włókien, poprzez wartość kąta położenia zęba φ .

4.1.2. Właściwy powierzchniowo-tarciowy opór skrawania

Metoda określania zapotrzebowania energetycznego procesu skrawania proponowana przez Manžosa i następnie rozwinięta przez Orlicza [46, 52] uwzględnia zjawiska zachodzące na głównej krawędzi skrawającej (skrawanie swobodne). Podczas procesu przecinania udział w obróbce biorą również pomocnicze krawędzie skrawające (rys. 4.2), których udział wzrasta szczególnie przy obróbce cienkimi piłami. Wykazał to Orłowski [53], który zasugerował przyjęcie nowego modelu właściwego oporu skrawania, dla rozróżnienia jako *właściwy powierzchniowo-tarciowy opór skrawania* k_{cu} . W jego skład wchodzi: właściwy powierzchniowy opór skrawania na głównej krawędzi skrawającej k_{cs} oraz opory na pomocniczych krawędziach skrawających $2k'_{cs}$.



Rysunek 4.2. Wybrane elementy geometrii ostrzy piły o rozwarciu zgrubiałym [53]

4.1.3. Statystyczny model wieloczynnikowy

Podobnie jak poprzednicy, Axelsson [8], przedstawił model siły skrawania w oparciu o wyniki swoich badań empirycznych. Wieloczynnikowy model został zapisany w postaci równania wielokrotnej regresji i regresji najmniejszych kwadratów (rów. 4.8), które określa wpływ poszczególnych parametrów (osiem współczynników) procesu skrawania na główną siłę skrawania F_c .

$$F_c = -7.37 + h \cdot (0.38 \cdot \rho_8 - 224.50 \cdot \gamma_f) + 15.61 \cdot \Phi_{G-vc} - 2.60 \cdot \Phi_{G-vc}^3 + 1.31 \cdot r_o + 0.20 \cdot v_c + MC \cdot (0.30 \cdot \Phi_{G-vc} - 0.01 \cdot T) \quad (4.8)$$

gdzie:

γ_f – kąt natarcia (boczny), *rad*,

h – średnia grubość warstwy skrawanej, mm ,
 r_o – promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej (reprezentuje zużycie ostrza), μm ,
 ρ_8 – gęstość drewna przy wilgotności drewna 8%, kg/m^3 ,
 v_c – prędkość skrawania, m/s ,
 MC – wilgotność drewna, %,
 T – temperatura drewna, °,
 Φ_{G-vc} – kąt pomiędzy prędkością skrawania a kierunkiem włókien drewna, rad .

Równanie (model) Axelssona [8] zostało rozbudowane przez Cristovao [20], który dodał czynnik umożliwiający prognozowanie głównej siły skrawania F_c procesu przecinania dla pił o innej szerokości rzazu S_t (rów. 4.9). Axelsson w swoich badaniach używał noży o szerokości rzazu $S_t = 4.25 mm$.

$$F_c = -7.37 + h \cdot (0.38 \cdot \rho_8 - 224.50 \cdot \gamma_f) + 15.61 \cdot \Phi_{G-vc} - 2.60 \cdot \Phi_{G-vc}^3 + 1.31 \cdot r_o + 0.20 \cdot v_c + MC \cdot (0.30 \cdot \Phi_{G-vc} - 0.01 \cdot T) \cdot \frac{S_t}{4.25} \quad (4.9)$$

W dalszych pracach Cristovao [21] wykazał również znaczącą rozbieżność pomiędzy wartościami sił prognozowanych przy użyciu modelu Axelssona, a wartościami rzeczywistymi dla procesu przecinania piłami tarczowymi. Podobne odstępstwa potwierdziły wyniki symulacji komputerowych opisane w pracy [65].

4.2. Metoda uwzględniająca naprężenia poślizgu

Do wyznaczenia mocy skrawania dla procesu przecinania drewna może być wykorzystany model, który opiera się na określeniu siły ścinającej $F_{T\Phi}$ [3, 45] (rys. 3.4). Siłę ścinającą $F_{T\Phi}$ można obliczyć z równania 4.10 proponowanego przez Merchanta [3, 4, 34, 45].

$$F_{T\Phi} = \frac{\tau_\gamma \cdot A_D}{\sin \Phi_c} \quad (4.10)$$

gdzie A_D jest przekrojem poprzecznym nieodciętego wióra ($A_D = h \cdot S_t$), a τ_γ to naprężenie tnące (poślizgu) w strefie skrawania dla materiału obrabianego, przy przyjętym modelu umocnienia materiału wywołanego intensywnym odkształceniem plastycznym [3, 34].

Φ_c – kąt ścinania określający położenie płaszczyzny ścinania względem powierzchni cięcia.

Siłę skrawania, w oparciu o model Ernsta-Merchanta (rys. 3.4), można zapisać jako

$$F_c = \frac{F_{T\Phi} \cdot \cos(\beta_\mu - \gamma_f)}{\cos(\beta_\mu + \Phi_c - \gamma_f)} \quad (4.11)$$

Po uwzględnieniu równań 4.10 i 4.11 otrzymuje się:

$$F_c = \frac{\tau_\gamma \cdot A_D \cdot \cos(\beta_\mu - \gamma_f)}{\sin \Phi_c \cdot \cos(\beta_\mu + \Phi_c - \gamma_f)} \quad (4.12)$$

gdzie: β_μ – kąt tarcia, γ_f – kąt natarcia.

Moc potrzebną do przecięcia materiału można wówczas zapisać jako:

$$P_c = F_c \cdot v_c \quad (4.13)$$

Model ten zakłada, że naprężenie tnące w strefie skrawania τ_v jest stałe i nie zależy od geometrii ostrza, przekroju poprzecznego warstwy skrawanej, prędkości skrawania i stanu materiału skrawanego. Jednakże, wiele opublikowanych badań wykazały, że naprężenie tnące w strefie skrawania nie jest stałe i zasadniczo wyższe od granicy plastyczności [3, 4, 34].

Szeroką analizę różnych podejść do wyznaczania naprężeń tnących w strefie skrawania przedstawił Astakhov [2]. Niemniej nadal naprężenia τ_v [2, 3] pozostają istotną cechą materiałową określającą jego odporność na ścinanie.

Opierając się na jednym z głównych założeń jakim jest stałość naprężeń tnących w strefie skrawania τ_v , można skorelować wartość tych naprężeń z podstawowymi mechanicznymi właściwościami materiału (rów. 4.14) np. R_m , czyli doraźna wytrzymałość na rozciąganie.

$$F_c = K_F \cdot R_m \cdot A_c \quad (4.14)$$

gdzie: $K_F R_m$ – iloczyn interpretowany jako ekwiwalent właściwego oporu skrawania (współczynnik skrawania), MPa ; K_F – współczynnik wyznaczany empirycznie [34].

Metoda ta została opracowana na podstawie badań empirycznych dla różnego rodzaju stali konstrukcyjnej i nie uwzględnia anizotropowej budowy drewna. W przypadku wykorzystywania tego modelu do prognozowania mocy skrawania (sił skrawania) dla procesu przecinania drewna, należy uwzględnić wartość naprężenia tnących w strefie skrawania τ_v w zależności od położenia krawędzi skrawającej względem włókien obrabianego drewna.

4.3. **Metoda uwzględniająca naprężenia poślizgu i elementy mechaniki**

Odmienne spojrzenie od wymienionych powyżej sposobów na określanie siły skrawania zaprezentowali w swoich pracach Atkins [5, 7], Laternser i inni [43], Williams [81], Williams i inni [82], którzy oparli się o nowoczesnej mechaniki pęknięcia.

W oparciu o model sił skrawania zaprezentowany przez Atkinsa [5, 7] i dodatkowo biorąc pod uwagę fakt, że wióry muszą być przyspieszone do takiej samej prędkości co narzędzie skrawające v_c [7, 63], moc skrawania dla jednej piły podczas ruchu roboczego ramy piłowej na pilarcie ramowej [7, 56, 57, 58] oraz podczas przecinania na pilarcie taśmowej (kinematyka piłowania na pilarcie ramowej i taśmowej jest podobna) (rys. 2.3), może być opisana równaniem 4.15 [57, 60, 64]:

$$\bar{P}_{cw} = F_c v_c + P_{ac} = \left[z_a \cdot \frac{\tau_\gamma S_t \gamma}{Q_{shear}} v_c f_z + z_a \cdot \frac{R_\perp S_t}{Q_{shear}} v_c \right] + P_{ac} \quad (4.15)$$

Należy jednak pamiętać, że średnia moc całego cyklu ramy piłowej, czyli suw roboczy wraz z suwem jałowym, wynosi $\bar{P}_c = 0,5 \bar{P}_{cw}$ (rys. 4.3) [57, 58].

Dla mniejszych wartości grubości warstwy skrawanej, kąt ścinania Φ_c , można obliczyć za pomocą zależności [5, 57]:

$$\left[1 - \frac{\sin\beta_\mu \sin\Phi_c}{\cos(\beta_\mu - \gamma_f) \cdot \cos(\Phi_c - \gamma_f)}\right] \cdot \left[\frac{1}{\cos^2(\Phi_c - \gamma_f)} - \frac{1}{\sin^2\Phi_c}\right] =$$

$$= -[\cot\Phi_c + \tan(\Phi_c - \gamma_f) + Z] \cdot \left[\frac{\sin\beta_\mu}{\cos(\beta_\mu - \gamma_f)} \left\{ \frac{\cos\Phi_c}{\cos(\Phi_c - \gamma_f)} + \frac{\sin\Phi_c \sin(\Phi_c - \gamma_f)}{\cos^2(\Phi_c - \gamma_f)} \right\}\right] \quad (4.18)$$

gdzie $Z = \frac{R}{\tau_\gamma \cdot h}$ jest parametrem, który uzależnia wartości Φ_c od własności materiałowych

materiału obrabianego. Drewno jest materiałem anizotropowym [26, 41], a jego własności fizyczne i mechaniczne są zróżnicowane w trzech kierunkach w odniesieniu do włókien drewna: wzdłużny (oś L) - równoległy do pnia drzewa; promieniowo (R): prostopadły do kierunku wzdłużnego i równoległy do promienia pnia i promieni drewna; styczny (T): prostopadły do kierunku wzdłużnego i równoległy do słojów [24]. Dlatego też, wartości R i τ_γ powinny być odpowiednio określane w zależności od zorientowania kierunku prędkości skrawania względem kierunku włókien drewna [32, 36, 71], co jest zależne głównie od kinematyki procesu przecinania. Równanie 4.18 jest obliczane numerycznie [19, 64].

Moc potrzebna na przyspieszenie wiórów P_{ac} jako funkcja strumienia masy i prędkości narzędzia oblicza się z zależności:

$$P_{ac} = \dot{m} v_c^2 \quad (4.19)$$

gdzie: $\dot{m}$ w kg/s, reprezentuje strumień masy drewna (wiórów) ewakuowanego w pewnym okresie czasu dla danej prędkości narzędzia v_c (prędkość skrawania), które może być obliczone jako:

$$\dot{m} = H_p S_t v_f \rho \quad (4.20)$$

W równaniu 4.20 v_f to prędkość posuwu a ρ to gęstość przecinanego drewna. Należy podkreślić, że analizowana moc P_{ac} nie jest funkcją liczby zębów pracujących [66].

Dla procesu przecinania piłą tarczową (rys. 2.9), który posiada odmienną kinematykę od procesów przecinania piłą taśmową i ramową, zależność 4.15, powinna być zmodyfikowana poprzez zastąpienie wartości posuwu na ostrze f_z , wartością średniej grubości warstwy skrawanej $\bar{h}$

$$\bar{P}_{cw} = F_c v_c + P_{ac} = \left[z_a \cdot \frac{\tau_\gamma S_t \gamma}{Q_{shear}} v_c \bar{h} + z_a \cdot \frac{R S_t}{Q_{shear}} v_c \right] + P_{ac} \quad (4.21)$$

gdzie: $z_a = \left(\frac{\varphi_2 - \varphi_1}{\varphi_t} \right)$ to średnia liczba zębów będących w kontakcie z rzazem, φ_1 jest to kąt

wejścia zębów w materiał obrabiany, który można obliczyć jako $\varphi_1 = \arccos \frac{2(H_p + a)}{D_{cs}}$, φ_2 to

kąt wyjścia zębów z materiału, wyznaczany jako $\varphi_2 = \arccos \frac{2a}{D_{cs}}$, D_{cs} – średnica piły tarczowej, średnia grubość warstwy skrawanej określa się jako $\bar{h} = f_z \sin \bar{\varphi}$, a średni kąt określający kontakt zębów z materiałem obrabianym $\bar{\varphi}$ oblicza się z zależności $\bar{\varphi} = \frac{\varphi_1 + \varphi_2}{2}$.

Dodatkowo w przypadku przecinania piłą tarczową nie jest prawdziwe założenie, które przyjęto dla procesów dotyczących przecinania na pilarkach taśmowych i ramowych, że kąt pomiędzy włóknami drewna obrabianego a prędkością skrawania wynosi 90° (skrawanie prostopadłe). Uwzględniając położenie krawędzi tnącej względem kierunku włókien obrabianego drewna, przy wykorzystaniu znanych w wytrzymałości materiałów zależności 4.5 [52], można określić wartości R i τ_v dla kierunków pośrednich.

Przykład przecinania piłą tarczową dla przypadku przecinania osiowo-prostopadłego:

$$R_{\parallel\perp} = R_{\parallel} \cos^2 \Phi_{G-vc} + R_{\perp} \sin^2 \Phi_{G-vc} \quad (4.22)$$

$$\tau_{\gamma\parallel\perp} = \tau_{\gamma\parallel} \cos^2 \Phi_{G-vc} + \tau_{\gamma\perp} \sin^2 \Phi_{G-vc} \quad (4.23)$$

gdzie: Φ_{G-vc} – kąt pomiędzy włóknami obrabianego drewna a kierunkiem prędkości przecinania. Według pracy [9] wartość wiązkości drewna sosnowego w kierunku osiowym można wyznaczyć w oparciu o wartość wiązkości w kierunku promieniowego $R_{\parallel} = 0,05R_{\perp}$. Dodatkowo można przyjąć, że naprężenia tnące w strefie skrawania w kierunku osiowym wynoszą $\tau_{\gamma\parallel} = 0,125 \cdot MOR$ [32], MOR to wytrzymałość na zginanie statyczne.

4.4. Metody przybliżone

Kolejnym narzędziem, które umożliwia prognozowanie mocy skrawania dla procesu przecinania drewna na pilarkach jest oprogramowanie on-line “Horsepower calculator” [89, 90]. Aplikacja ta pozwala na obliczenia zarówno w jednostkach metrycznych jak i w jednostkach brytyjskiego systemu miar. Model ten prognozuje moc skrawania P_c w W , opierając się na gęstości właściwej drewna:

$$P_c = \frac{v_f \cdot H_P \cdot S_t \cdot SG}{379.786} \cdot 10^3 \quad (4.24)$$

gdzie: SG – właściwa gęstość drewna, która jest gęstością drewna w odniesieniu do gęstości wody. Pozostałe wartości zostały już opisane we wcześniejszych fragmentach niniejszego rozdziału. W tej zależności także występują w tych samych jednostkach.

Metoda ta, w prognozowaniu mocy skrawania, opiera się jedynie na właściwej gęstości drewna, bez uwzględnienia rodzaju kinematyki procesu przecinania.

Należy tu wspomnieć, że w pracach [63, 64] wykazano, że prognozowanie mocy skrawania przy użyciu omawianej aplikacji on-line, daje wartości znacznie przeszacowane w odniesieniu do wartości rzeczywistych. Badania [17, 18] wykazały zaś, że gęstość, ma wpływ na zapotrzebowanie mocy w procesie przecinania, ale jej wpływ na moc jako pojedynczego czynnika jest mało znaczący.

5. CEL, TEZA I ZAKRES PRACY

Celem naukowym rozprawy doktorskiej było zaprezentowanie nowatorskiej metody prognozowania mocy skrawania przy przecinaniu piłami drewna sosnowego pochodzącego z czterech krain przyrodniczo-leśnych Polski, która uwzględnia właściwości materiałowe wyznaczone w oparciu o próby skrawalnościowe, tj.: wiązkość i naprężenia tnące w strefie skrawania oraz geometrię ostrza narzędzia obrabiającego (kąt natarcia), warunki kształtowania wióra (kąt ścinania). Otrzymane wyniki porównywane z wynikami uzyskanymi przy zastosowaniu klasycznej metody prognozowania mocy skrawania (tj. w oparciu o właściwe powierzchniowe opory skrawania).

Celem utylitarnym pracy jest stworzenie prostego oprogramowania, które umożliwiłoby szybkie prognozowanie mocy skrawania dla operacji przecinania danego materiału obrabianego na wybranych pilarkach stosowanych w polskim przemyśle tartacznym.

Celem poznawczym pracy jest zbadanie jaki wpływ na zapotrzebowanie mocy skrawania w procesie przecinania piłami ma region pochodzenia drewna.

Teza pracy: Zastosowanie modelu sił skrawania wykorzystującego współczesną mechanikę pęknięcia, umożliwia prognozowanie mocy skrawania na pilarkach dla różnych gatunków drewna, których właściwości mechaniczne są wyznaczone w procesie skrawania.

Zakres pracy obejmował:

- ✓ Wyznaczenie średniej wartości mocy skrawania belek z drewna sosnowego w badaniach empirycznych.
- ✓ Wyznaczenie stałych materiałowych na bazie prób skrawalnościowych: wiązkość i naprężenie tnące w strefie skrawania, dla drewna sosnowego z czterech wybranych krain przyrodniczo-leśnych Polski – wykorzystując nowatorską metodę opierającą się na współczesnej mechanice pęknięcia;
- ✓ Prognozowanie mocy skrawania w funkcji grubości warstwy skrawanej dla pił o innych wartościach rozwarcia całkowitego ostrzy niż użyte w badaniach, w tym również dla pilarek o odmiennej kinematyce.

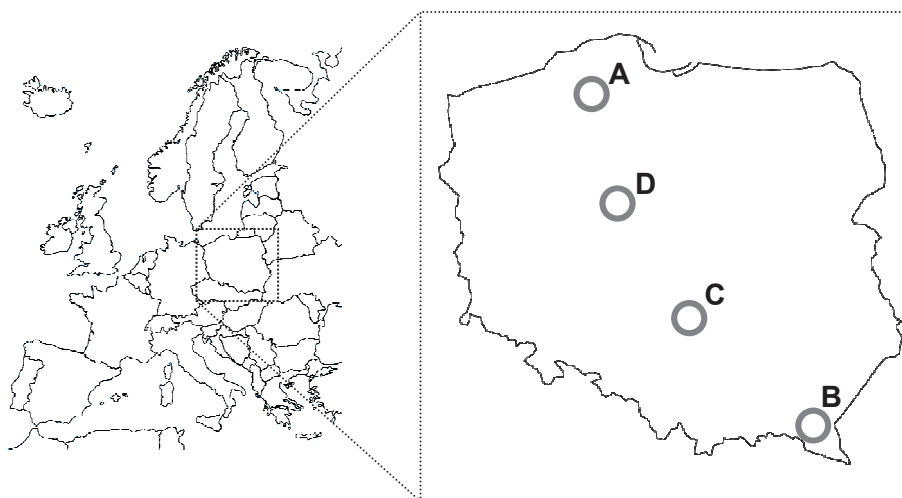
6. METODYKA BADAŃ EFEKTÓW ENERGETYCZNYCH PROCESU PRZECINANIA

6.1. Ogólna charakterystyka materiału badawczego

W drugiej połowie XX wieku w Polsce, Romuald Dziewanowski z Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej przeprowadził szeroką analizę jakości drewna [23], które pochodziło ze wszystkich nadleśnictw Polski. W oparciu o uzyskane wyniki przeprowadzonych badań i uwzględniając częstość występowania regionów o dobrej jakości drewna sosnowego, zaproponowano podział obszaru Polski na cztery pasy:

- I. Pas Sosny Pojezierskiej,
- II. Pas Sosny Nizinnej,
- III. Pas Sosny Wyżynnej,
- IV. Pas Górski.

W oparciu o zaproponowany przez Dziewanowskiego [23] podział Polski, Krzosek [39] dobierał regiony pochodzenia tarcicy do swoich badań związanych z wytrzymałościowym sortowaniem różnymi metodami. Wykorzystał on tarcicę pochodzącą z pięciu krain przyrodniczo-leśnych Polski, leżących we wspomnianych czterech pasach.



Rysunek 6.1. Rozmieszczenie w Polsce krain przyrodniczo-leśnych z których pochodzi badana tarcica sosnowa

Na rzecz badań opisywanych w niniejszej dysertacji, wykorzystano część tarcicy badanej przez Krzoska [39], pochodzącej z czterech krain przyrodniczo – leśnych Polski (rys. 6.1):

- A. Bałtyckiej, surowiec, z którego została wykonana tarcica pochodził z Nadleśnictwa Leśny Dwór. Kraina ta leży w obszarze Pasa Sosny Pojezierskiej.
- B. Karpackiej, surowiec, z którego została wykonana tarcica pochodził z Nadleśnictwa Brzegi Dolne. Kraina ta leży w obszarze Pasa Górskiego.
- C. Małopolskiej, surowiec, z którego została wykonana tarcica pochodził z Nadleśnictwa Smardzewice. Kraina ta leży w obszarze Pasa Sosny Wyżynnej.

D. Wielkopolsko-Pomorskiej, surowiec, z którego została wykonana tarcica pochodził z Nadleśnictwa Brodnica. Kraina ta leży w obszarze Pasa Sosny Nizinnej.

Szczegółowe informacje na temat pochodzenia badanego drewna oraz jego charakterystykę siedliskową, przedstawiono w tabeli 6.1.

Tabela 6.1. Pochodzenie materiału badawczego [39]

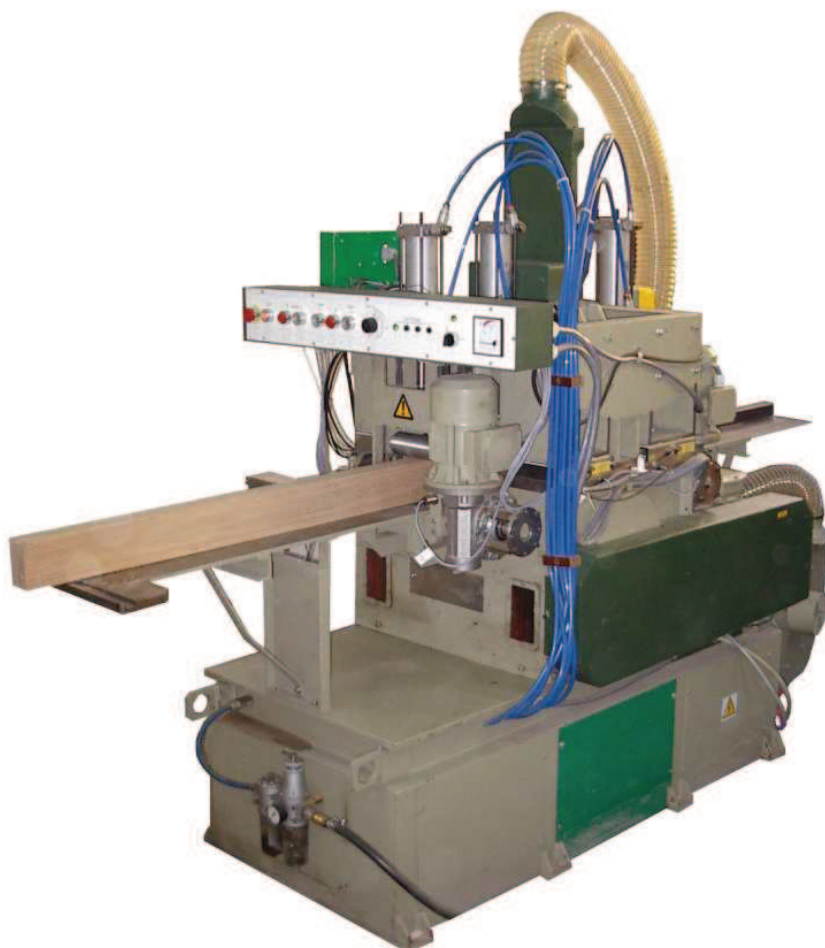
Oznaczenie	Siedlisko	Charakterystyka drzewostanu	Typ gleby	Klasa bonitacji*	Jakość
Kraina A	Bałtycka Kraina Przyrodniczo-Leśna, Nadleśnictwo Leśny Dwór, Leśnictwo Skarszów, oddział 594, powierzchnia 31.64 ha	Bór mieszany świeży, zadrzewienie: 1.0, zwarcie umiarkowane, Przeciętny wiek: 100 lat, Przeciętna pierśnica: 34 cm, przeciętna wysokość: 25 m, ponadto: buk	rdzawa bielkowa, piasek słabo gliniasty na piasku luźnym	II	2
Kraina B	Karpacka Kraina Przyrodniczo-Leśna, Nadleśnictwo Brzegi Dolne, Leśnictwo Krościenko, drzewostan położony w stronie północno-zachodniej, N – W, Wysokość 500 m n.p.m., w dzielnicy Bieszczady	las górski, zadrzewienie: 0.7, zwarcie: przerywane, przeciętny wiek: 85 lat, przeciętna pierśnica: 48 cm, przeciętna wysokość: 25 m, ponadto: jodła, buk	brunatno-kwaśna – gleba żyzna	I	3
Kraina C	Małopolska Kraina Przyrodniczo-Leśna, Nadleśnictwo Smardzewice, Leśnictwo Prócheńsko, oddział 2591, powierzchnia 4.27 ha	las mieszany świeży, zadrzewienie: 1.1, zwarcie: przerywane, przeciętny wiek: 85 lat, przeciętna pierśnica: 28 cm, przeciętna wysokość: 18 m, ponadto: brzoza brodawkowata, świerk, dąb	brunatno-rdzawa	II	2
Kraina D	Wielkopolsko-Pomorska Kraina Przyrodniczo-Leśna, Nadleśnictwo Brodnica, Leśnictwo Buczkowo, oddział 102d, powierzchnia 1.67 ha	las mieszany świeży, zadrzewienie: 0.8, zwarcie: przerywane, przeciętny wiek: 96 lat, przeciętna pierśnica 35 cm, przeciętna wysokość: 27 m, ponadto: świerk, buk	rdzawa właściwa, piasek luźny	I	2
* klasa bonitacji drzewostanu – wskaźnik możliwości produkcyjnej siedliska leśnego i drzewostanu (Ustawa o lasach art. 6 pkt 1 ust. 2) [88]					

6.2. Stanowisko badawcze, aparatura i oprogramowanie

Empiryczne badania mające na celu określenie mocy skrawania procesu przecinania drewna sosnowego, zostały przeprowadzone na małogabarytowej pilarni ramowej PRW15M. Obrabiarka ta została opracowana przez zespół pracowników naukowych Katedry Technologii Maszyn i Automatyzacji Produkcji Wydziału Mechanicznego Politechniki Gdańskiej (rys. 6.2) [76, 77].

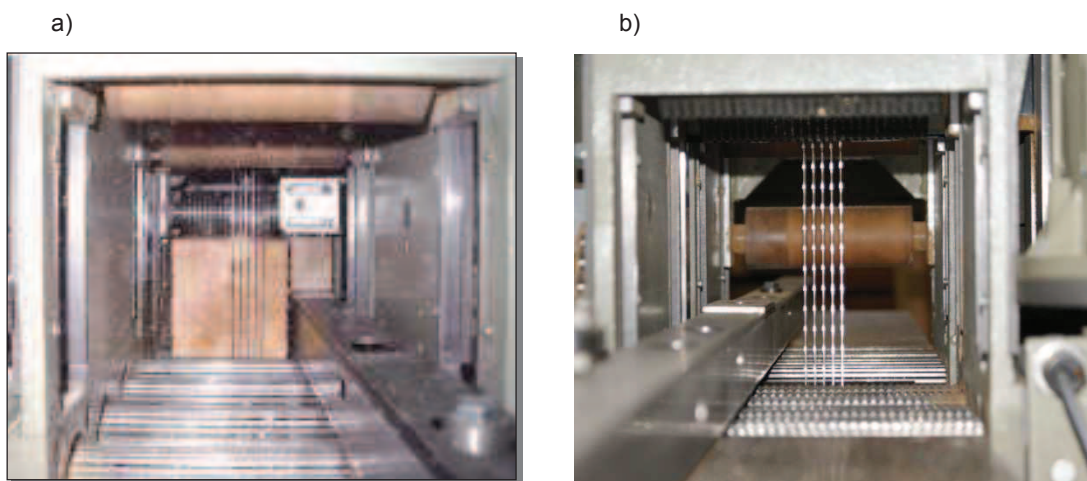
Pilarka ramowa PRW15M, jest obrabiarką cechującą się nowatorskim hybrydowym wyrównoważonym dynamicznie układem napędu ramy piłowej, eliptyczną trajektorią prowadzenia pił oraz grupowym mocowaniem pił, pozwalającym na kompensację wydłużeń termicznych narzędzi jakimi są piły [53, 54, 55, 56, 76].

W pilarce tej występują dwa napędy; napęd ramy piłowej, realizujący eliptyczną trajektorię prowadzenia pił oraz napęd obrabianego materiału, który zapewnia stałą prędkość posuwu v_f . Dzięki zastosowaniu eliptycznej trajektorii pił uzyskuje się brak kontaktu ostrzy pił z dnem szczeliny rzazu podczas suwu jałowego pił. Efekt ten jest spełniony w całym zakresie zmian prędkości posuwu pilarki.



Rysunek 6.2. Pilarka ramowa PRW15M [53, 58]

Dzięki wprowadzeniu do napędu ramy piłowej akumulatora energii kinetycznej oraz przeciwwagi, stworzono hybrydowy wyrównoważony dynamicznie układ napędu [76]. Układ taki zapewnia całkowitą eliminację zmiennego obciążenia układu napędowego ramy piłowej, jak również obciążeń dynamicznych przenoszonych na podłoże maszyny, które powstają w wyniku cyklicznie zmieniającej się siły bezwładności ramy piłowej [53, 76, 77]. Układ napędu posuwowego materiału obrabianego, zapewnia jednocześnie napęd materiału oraz jego prowadzenie. Te dwa zadania napędu posuwowego są realizowane za pomocą walców górnych dociskających materiał do walców dolnych, które przekazują mu napęd (rys. 6.3). Podstawowe parametry obrabiarki, na której przeprowadzano badania empiryczne przedstawiono w tabeli 6.2.



Rysunek 6.3. Zdjęcie przedstawiające widok: a – od strony wyjścia materiału obrabianego; b - widok na piły zamocowane w ramie piłowej pilarki PRW-15M od strony wejścia materiału [zdjęcia własne]

Tabela 6.2. Najważniejsze dane techniczne pilarki PRW15M

Nazwa parametru	Wartość parametru
największa wysokość materiału obrabianego	150 mm
najmniejsza wysokość materiału obrabianego	30 mm
największa szerokość materiału obrabianego	170 mm
najmniejsza długość materiału obrabianego	350 mm
największa liczba pił w sprzęgu	15 szt.
największy rozstaw pił	125 mm
skok ramy piłowej	162 mm
mała oś elipsy	2 mm
liczba skoków ramy piłowej	685 1/min
częstotliwość skoków ramy piłowej	11,39 1/s; Hz
prędkość posuwu	0 do 2,1 m/min
moc napędu głównego	5,5 kW
moc posuwu	2x0,37 kW
moc dmuchawy	1,5 kW
masa	780 kg
wymiary gabarytowe	1650x800x1500 mm

Do pilarki podczas przeprowadzania badań był również podłączony układ odsysający trociny (rys. 6.4). Dzięki niemu pomieszczenie, w którym znajduje się maszyna miało ograniczoną możliwość zapylenia.



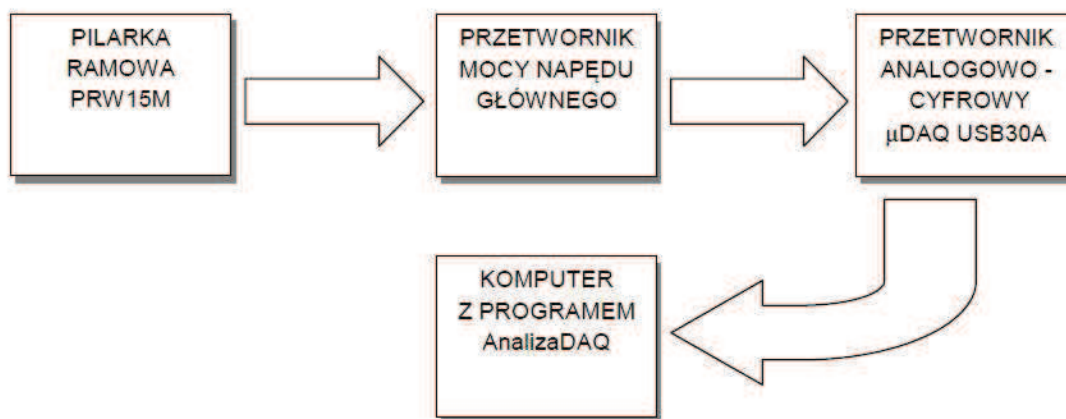
Rysunek 6.4. Układ odsysający trociny [zdjęcie własne]

Umożliwiło to bezpieczną pracę przy pilarence, bez zagrożeń dla zdrowia jakie stwarza pył powstający podczas obróbki mechanicznej drewna [93, 94].

Badania doświadczalne były przeprowadzane na specjalnie przygotowanym stanowisku, którego podstawowym elementem była pilarka PRW15M oraz komputer wyposażony w oprogramowanie do rejestrowania, analizy i archiwizacji badanych parametrów (moc pobierana przez silnik ruchu głównego). Użyte do badań oprogramowanie (AnalizaDAQ), zostało stworzone przez pracowników naukowych Politechniki Gdańskiej na potrzeby badań naukowych prowadzonych na uczelni.

Do pomiaru mocy pobieranej przez silnik ruchu głównego pilarki zastosowano przetwornik mocy, którego wyjścia prądowe zamieniano na napięciowe za pomocą specjalnie dobranego rezystora, dobierając skalę stosownie do mocy silnika. Sygnał pomiarowy był doprowadzany do przetwornika analogowo-cyfrowego μ DAQ USB30A (firmy Eagle Technology, RSA), za pośrednictwem zespołu przyłączania torów pomiarowych, a następnie rejestrowany w pamięci komputera z wykorzystaniem specjalnego oprogramowania (rys. 6.5). Punkty pomiarowe średniej mocy skrawania rejestrowano z częstotliwością 40 Hz.

Bezpośrednio przed rozpoczęciem procesu przecierania, każda próbka badanego materiału została poddana pomiarowi wilgotności za pomocą wilgotnościomierza WRD100 firmy TANEL o zakresie pomiarowym wilgotności bezwzględnej w przedziale od 6 % do 100 % [95].



Rysunek 6.5. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

6.3. Metodyka badań empirycznych pomiaru efektów energetycznych procesu przecinania

Badania empiryczne pomiaru mocy skrawania podczas procesu przecierania drewna sosnowego pochodzącego z czterech polskich krain przyrodniczo-leśnych, były przeprowadzone według indywidualnego planu badań. Zdecydowano się na taki krok, gdyż typowe dostępne plany doświadczalne były zbyt rozbudowane i w rozpatrywanym przypadku mało przydatne [29, 42, 50].

Do badań przygotowano po 8 sztuk pryzm dla trzech krain. Dla czwartej krainy (Kraina Karpacka – B) przygotowano 14 sztuk tarcicy. Powodem większej liczby sztuk tarcicy dla krainy B, był mniejszy przekrój poprzeczny tarcic pochodzących z tego regionu, co zwiększało ryzyko niepowodzenia w próbach skrawalnościowych. Wspomniane ryzyko wynikało z wymiaru szerokości przygotowanych próbek, który był nie wiele większy od wymiaru szerokości sprzęgu pił zainstalowanego w pilarence ramowej. Każde odchylenie pił podczas pracy groziło wyjściem piły poza szerokość próbki.

Liczbę 8. szt. próbek przygotowanych do badań, przyjęto na podstawie wyliczeń optymalnej liczby próbek, która równoważyła ze sobą koszty finansowe przeprowadzanych badań z ich wiarygodnością. Minimalna liczba próbek, potrzebna do uzyskania informacji o mierzonej wielkości, przy poziomie ufności $\alpha = 0,05$, równa się 7 gdyż przy takiej liczbie pomiarów, błąd badań zrównuje się z błędem pojedynczego wyniku [29]. W rzeczywistości z każdej próbki uzyskiwano 6 pomiarów (wyników) mocy skrawania, dzięki dokonaniu podziału przebiegów posuwu wolnego i szybkiego na dodatkowe 3 zakresy. Dzięki temu zabiegowi dla 8 próbek uzyskano 48 wyników pomiaru średniej mocy skrawania.

Przygotowane do badań próbki drewniane zostały poddane pomiarowi ich wymiarów gabarytowych: szerokości W , wysokości H oraz długości L . Pomiaru wymiarów przekroju poprzecznego (szerokość, wysokość) dokonano, przy użyciu suwmiarki z dokładnością do 0.05 mm , w sześciu równomiernie rozłożonych na długości próbki punktach. Pomiar długości próbki wykonano przy użyciu taśmy mierniczej z dokładnością do 0.5 mm . Dokonano dwóch pomiarów na każdym z boków pryzmy, co łącznie dało 8 pomiarów na jedną próbkę.

Uzyskane wymiary zostały poddane analizie statystycznej w celu wyeliminowania błędów nadmiernych. Do analizy wykorzystano test Grubbs-a, który jest dedykowany dla analiz z mniejszą liczbą pomiarów (nie mniejszą niż 3, a nie większą niż 30) [42, 50].

Sprawdzone wyniki pomiarów, posłużyły do obliczenia poszczególnych wymiarów na podstawie średniej arytmetycznej.

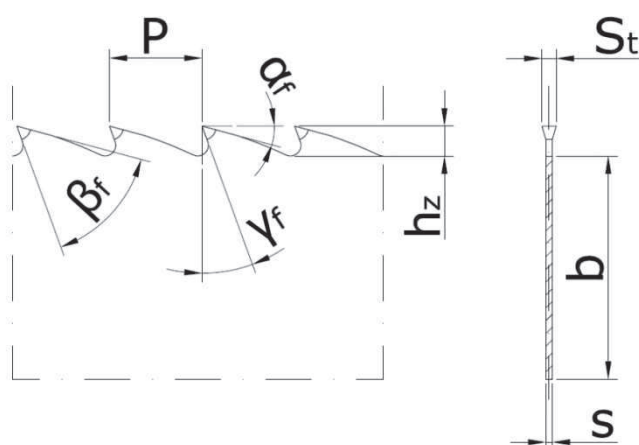
Długość wszystkich pryzm wynosiła około 600 mm, a wysokość około 80 mm. Wymiary szerokości były zróżnicowane między 35 a 70 mm. Wszystkie wymiary przygotowanych próbek zostały przedstawione w tabeli 6.3.

Tabela 6.3. Wymiary przekrojów poprzecznych próbek z drewna sosnowego pochodzącego z czterech krain przyrodniczo-leśnych

Wymiary przekroju poprzecznego <i>mm × mm</i>	Kraina przyrodniczo-leśna				Razem
	A	B	C	D	
	Liczba sztuk tarcicy				
34 × 80		10			10
46 × 80	8	4	7	4	23
60 × 80			1		1
70 × 80				4	4
Ogółem	8	14	8	8	38

Wilgotność badanego drewna sosnowego oscylowała w zakresie MC 8.5 – 12 %.

Do przecierania pryzm drewna sosnowego użyto jednego rodzaju mini pił trakowych z ostrzami stellitowanymi firmy MFLS Forezienne (Francja). W sprzęgu zamontowano $n_{sb} = 5$ szt. pił. Przed rozpoczęciem badań empirycznych zmierzono charakterystyczne wymiary (rys. 6.6) użytych pił oraz każdego z ich ostrzy. Średnie wartości zmierzonych parametrów pił stosowanych w badaniach przedstawiono w tabeli 6.4.



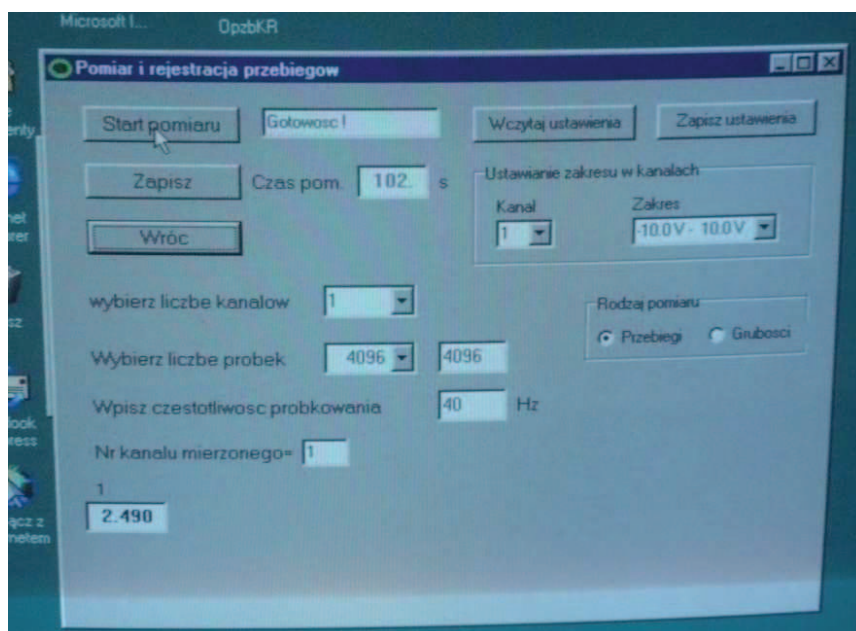
Rysunek 6.6. Charakterystyczne wymiary pił użytych w badaniach przecierania polskiego drewna sosnowego

Pomiędzy zamontowanymi piłami w sprzęgu zastosowano przekładki o grubości $g_p = 5.00 \text{ mm}$. Piły w ramie były napięte przez śruby naciągowe do wartości naprężeń napinających piłę $\sigma_N = 300 \text{ MPa}$. Ciśnienie docisku walców posuwowych wynosiło $0,6 \text{ MPa}$.

Tabela 6.4. Wymiary pił stosowanych w badaniach doświadczalnych

Oznaczenie	Wartość średnia	Jednostka	Opis
b	30	mm	szerokość brzeszczotu
s	0.9	mm	grubość brzeszczotu
P	13	mm	podziałka ostrzy
h_z	5.5	mm	wysokość zęba
S_t	2.0612	mm	rozwarcie całkowite (rzaz)
γ_f	8.7	$^\circ$	kąt natarcia
α_f	12.5	$^\circ$	kąt przyłożenia
β_f	68.8	$^\circ$	kąt ostrza
λ_s	0	$^\circ$	kąt pochylenia głównej krawędzi skrawającej
K_r	90	$^\circ$	kąt przystawienia krawędzi skrawającej roboczy

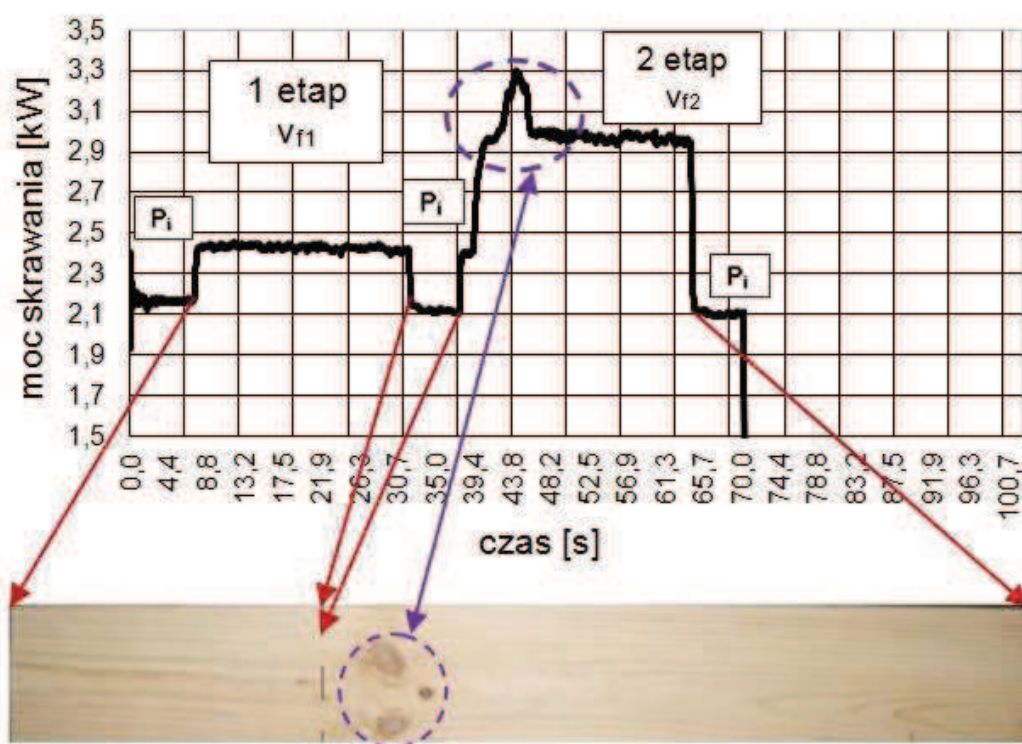
Wszystkie próbki drewna sosnowego były przetarte przy nastawie dwóch orientacyjnych wartości prędkości posuwu wzdłużnego $v_{f1} \approx 0.3 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$ i $v_{f2} \approx 1.1 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, co odpowiednio dawało wartości posuwu na ostrze $f_{z1} \approx 0.04 \text{ mm}$ i $f_{z2} \approx 0.14 \text{ mm}$. Wartości dokładne prędkości posuwu i odpowiadające im posuwy na ostrze określano na podstawie rzeczywistych zarejestrowanych przebiegów czasowych mocy pobieranej przez silnik ruchu głównego ramy piłowej.



Rysunek 6.7. Widok na panel pomiarowy programu AnalizaDAQ na komputerze stanowiskowym. Program w gotowości bezpośrednio przed rozpoczęciem pomiaru [zdjęcie własne]

Empiryczny proces przetarcia każdej z badanych próbek składał się z kilku kolejno występujących po sobie faz. Pierwsza faza obejmowała załączenie maszyny, nastawienie na pulpicie pierwszej wartości prędkości posuwu v_{f1} , a następnie podanie próbki do pierwszego dociskającego walca prowadzącego. W momencie przejścia próbki przez pierwszy walec

dociskający uruchamiano pomiar mocy średniej napędu głównego, za pomocą aplikacji programu pomiarowego na komputerze stanowiskowym (rys. 6.7). Próbką prowadzona przez walce dociskająco-prowadzące przesuwiała się do sprzęgu pił z nastawioną prędkością posuwu. Moc zarejestrowana w tej fazie pomiaru odzwierciedlała wartość mocy jałowej $\bar{P}_i$. W momencie, gdy próbka docierała do sprzęgu pił rozpoczynała się druga faza, a mianowicie, proces przecinania z pierwszą wartością prędkości posuwu v_{f1} . Wartość mocy zarejestrowanej z pierwszego etapu procesu (1 etap, rysunek 6.8) przecinania to moc całkowita dla pierwszej wartości prędkości posuw $\bar{P}_{cT1}$. Ta faza procesu trwała do momentu przecięcia około 1/3 długości próbki. Wówczas ruch posuwowy przedmiotu był zatrzymany i nastawiano wartość drugiej prędkości posuwu v_{f2} . W czasie przestawiania wartości prędkości posuwu kolejny raz rejestrowano wartości mocy jałowej $\bar{P}_i$. Po wykonaniu zmiany parametru znów załączano posuw na pilarcze i rozpoczynano pomiar mocy całkowitej (etap 2, rysunek 6.8) dla drugiej wartości prędkości posuwu $\bar{P}_{cT2}$. Ta faza trwała, aż cała próbka została przecięta. Po przecięciu próbki znów rejestrowano wartość mocy jałowej $\bar{P}_i$. Walce na wyjściu wysuwają przeciętą próbkę w postaci lameli o grubości około 4 mm.



Rysunek 6.8. Przykładowy zarejestrowany przebieg mocy skrawania w odniesieniu do badanej próbki z Krainy A (P_i – moc jałowa, v_{f1} i v_{f2} – prędkości posuwu w kolejnych etapach procesu przecierania próbki). Zaznaczenie dotyczy wpływu obecności sęków na moc skrawania.

Opisanemu przebiegowi procesu przecinania poddano każdą z badanych próbek polskiego drewna sosnowego. Wartość średnią mocy skrawania $\bar{P}_c$ liczono jako różnicę wartości średniej

mocy całkowitej napędu głównego $\bar{P}_{cT}$ i wartości średniej mocy biegu luzem napędu głównego $\bar{P}_i$:

$$\bar{P}_c = \bar{P}_{cT} - \bar{P}_i \quad (6.1)$$

Średnią moc biegu luzem $\bar{P}_i$ pilarki PRW15–M określano każdorazowo bezpośrednio przed rozpoczęciem próby skrawalnościowej, gdyż jej wartość była zmienna i zależała od temperatury oleju w skrzynkach przekładniowych napędu głównego.

Wartości średniej mocy skrawania w suwie roboczym $\bar{P}_{cw}$ obliczano jako:

$$\bar{P}_{cw} = 2\bar{P}_c \quad (6.2)$$

6.4. Metodyka wyznaczania R oraz τ_γ na podstawie testów skrawalnościowych

Uwzględniając fakt, że charakter przebiegu średniej mocy skrawania uzyskany podczas przecinania za pomocą cienkich pił jest liniowy i zarazem jakościowo zgodny z przebiegiem zmienności średniej mocy skrawania dla pił trakowych tradycyjnych [56, 57], dla uzyskanych wyników opracowywano równania liniowe przebiegów średnich mocy skrawania w suwie roboczym $\bar{P}_{cw}$ w funkcji posuwu na ostrze $\bar{f}_z$ ($\bar{f}_z$ jest w tym przypadku równe grubości warstwy skrawanej).

Otrzymane równania liniowe dla mocy skrawania w suwie roboczym dla jednej piły ze sprzęgu $\bar{P}_{cw}^{1p}$ przedstawiono poniżej:

$$\bar{P}_{cw}^{1p} = a \cdot \bar{f}_z + b \quad (6.3)$$

W pracach [57, 58] zaobserwowano, że dla wartości posuwu na ostrze $\bar{f}_z = 0 \text{ mm}$ na osi rzędnych $\bar{P}_{cw}$ występuje pewna niewielka wartość mocy [51] (ang. *intercept* [5–7] – punkt przecięcia prostej z osią współrzędnych). Wspomnianą wartość mocy w równaniu 6.3 reprezentuje współczynnik b .

Przyjmując za [56, 57], że równanie 6.3 można przyrównać do równania 6.4

$$\bar{P}_{cw}^{1p} = z_a \frac{\tau_\gamma S_t \gamma}{Q_{shear}} v_c \bar{f}_z + z_a \frac{RS_t}{Q_{shear}} v_c = \frac{H_P}{P} \frac{\tau_\gamma S_t \gamma}{Q_{shear}} v_c \bar{f}_z + \frac{H_P}{P} \frac{RS_t}{Q_{shear}} v_c \quad (6.4)$$

otrzymuje się następujące zależności:

$$a = \frac{H_P}{P} \frac{\tau_\gamma S_t \gamma}{Q_{shear}} v_c \quad (6.5)$$

$$b = \frac{H_P}{P} \frac{RS_t}{Q_{shear}} v_c \quad (6.6)$$

Ze współczynników (rów. 6.5) oraz (rów. 6.6) wyznaczano:

1. ze współczynnika kierunkowego równania prostej a w W/mm określano naprężenia tnące w strefie skrawania τ_v ,
2. z rzędnej b w W , przy jednoczesnym założeniu w tych obliczeniach, że współczynnik korekcji warunków tarcia $Q_{shear} = 1$, wyznaczono wiązkość R , J/m^2 (ang. *fracture toughness*), czyli pracę właściwą (energię) niezbędną do wytworzenia pęknięcia o powierzchni jednostkowej w trakcie skrawania.

Dla obliczeń z punktu 1. kąt tarcia $\beta_\mu = \tan^{-1}\mu$ był wyznaczony dla przyjętego współczynnika tarcia $\mu = 0.6$ (drewno sosnowe i świerkowe) (dla pary stal – suche drewno [11, 28]). Przy założeniu, że obliczenia są przeprowadzane dla posuwów na ostrze $f_z > 0.15\text{ mm}$, kiedy wartości właściwych powierzchniowych oporów skrawania są praktycznie stałe [56], można wykorzystać równanie Merchanta (rów. 3.4) dla wyznaczania kąta ścinania Φ_c . Przyjęto również, że skrawano piłami o ostrych ostrzach. Dla zapewnienia takich warunków pracy, pomimo niedługich czasów pracy pił, jak dla pił o ostrzach stelitowanych, które normalnie w eksploatacji pracują kilka zmian, dla każdej nowej partii badanego drewna zmieniano w sprzęgu piły na nowe.

6.5. Metodyka prognozowania mocy skrawania według nowatorskiej metody uwzględniającej wiązkość materiału dla pił o odmiennej szerokości rzazu piły

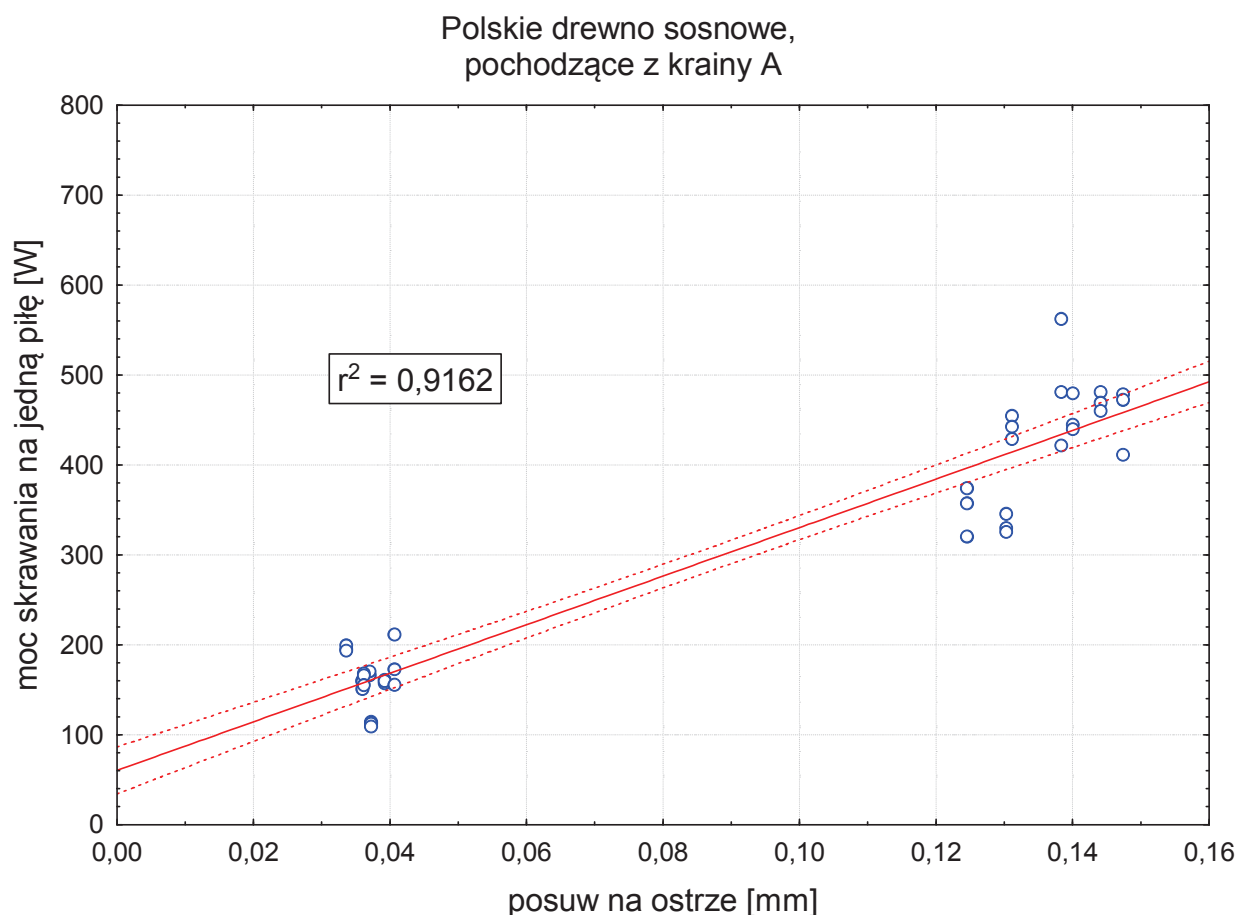
Przeprowadzone badania doświadczalne przecierania drewna sosnowego pozwoliły na dokonanie pomiaru wartości średniej mocy skrawania $\overline{P_c}$. Kolejne analizy uzyskanych danych pozwoliły na wyznaczenie właściwości materiału obrabianego w postaci wiązkości R i naprężeń tnących w strefie skrawania τ_v . Dzięki wyznaczeniu wspomnianych właściwości materiału obrabianego, wykorzystując równanie 6.4, można prognozować zapotrzebowanie mocy dla przecinania tego samego rodzaju materiału (drewno sosnowe) za pomocą pił o innej szerokości rzazu S_t .

7. WYNIKI BADAŃ I ICH ANALIZA

7.1. Wyniki badań efektów energetycznych

7.1.1. Drewno sosnowe pochodzące z Bałtyckiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (Kraina A)

Rysunek 7.1 przedstawia zmiany mocy skrawania przypadającej na jedną piłę podczas przecinania polskiego drewna sosnowego pochodzącego z Bałtyckiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (Kraina A) (rys.6.1, tabela 6.1).



Rysunek 7.1. Moc skrawania na jedną piłę w funkcji posuwu na ostrze (grubość warstwy skrawanej) podczas przecinania na pilarcze ramowej PRW15M polskiego drewna sosnowego pochodzącego z Bałtyckiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (linie przerywane dotyczą obszaru zmienności dla prawdopodobieństwa 95%)

Otrzymano równanie regresji liniowej:

$$P_c [\text{W}] = 60,34254 + 2699,73813 \cdot f_z \quad (7.1)$$

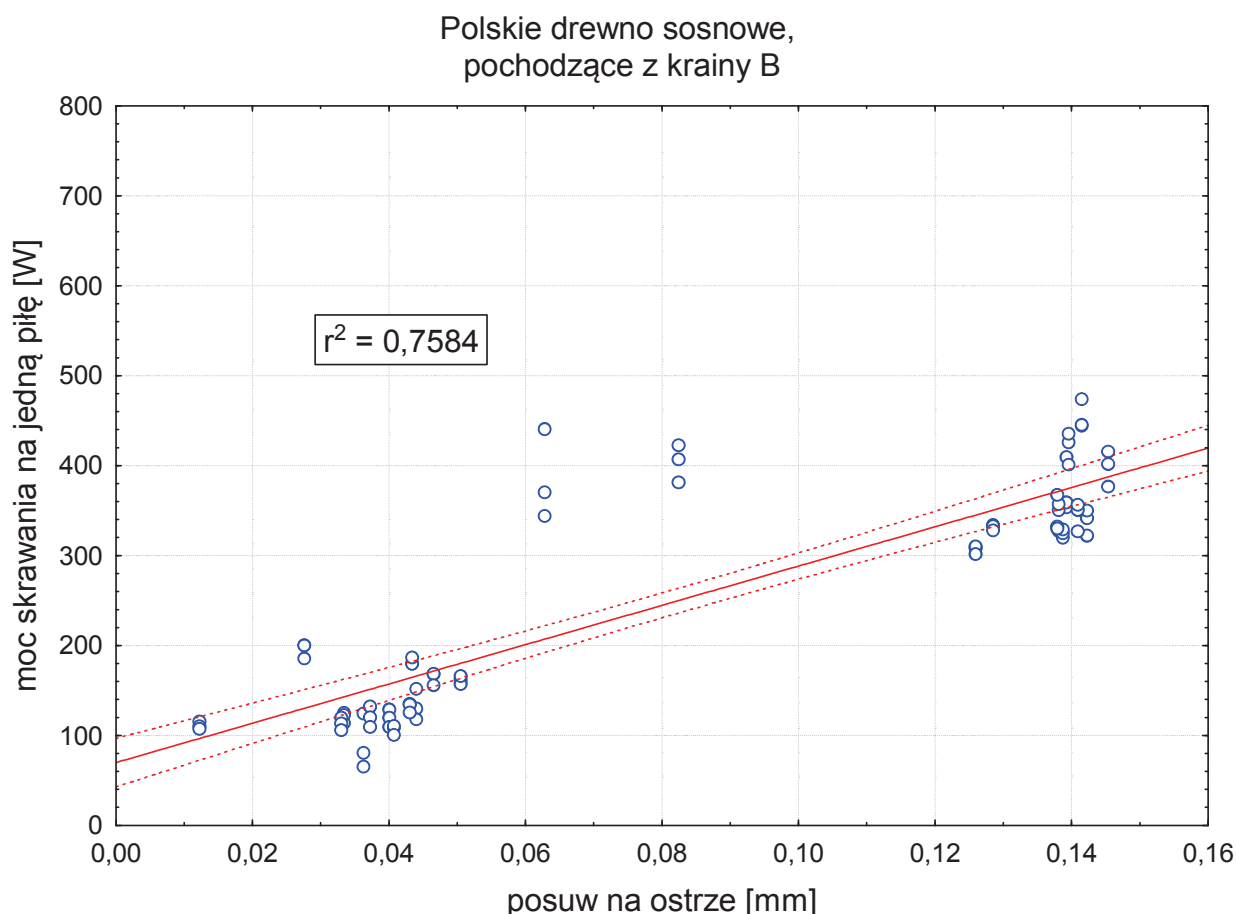
które charakteryzuje się współczynnikiem determinacji $r^2 = 0,9162$ (współczynnik Pearsona $r = 0,9572$).

Punkty pomiarowe na rysunku 7.1 są dość mocno skupione w dwóch grupach, szczególnie skupienie można zaobserwować dla mniejszych wartości posuwów na ostrze. Tak duże skupienie punktów, a co za tym idzie wysoki współczynnik determinacji r^2 , może wynikać z wielkości średnich przyrostów rocznych, które były bardzo zbliżone dla poszczególnych próbek drewna pochodzących z krainy A. Sposób pomiaru przyrostów rocznych próbek został

omówiony w pracy [15], a wpływ procentowego udziału drewna późnego w przyroście rocznym na moc skrawania opisano w [62].

7.1.2. Drewno sosnowe pochodzące z Karpackiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (Kraina B)

Na rysunku 7.2 przedstawiono zmiany mocy skrawania przypadającej na jedną piłę podczas przecinania polskiego drewna sosnowego pochodzącego z Karpackiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (Kraina B) (rys.6.1, tabela 6.1).



Rysunek 7.2. Moc skrawania na jedną piłę w funkcji posuwu na ostrze (grubości warstwy skrawanej) podczas przecinania na pilarcie ramowej PRW15M polskiego drewna sosnowego pochodzącego z Karpackiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (linie przerywane dotyczą obszaru zmienności dla prawdopodobieństwa 95%)

Otrzymane równanie regresji liniowej:

$$P_c [\text{W}] = 69,84906 + 2184,62531 \cdot f_z \quad (7.2)$$

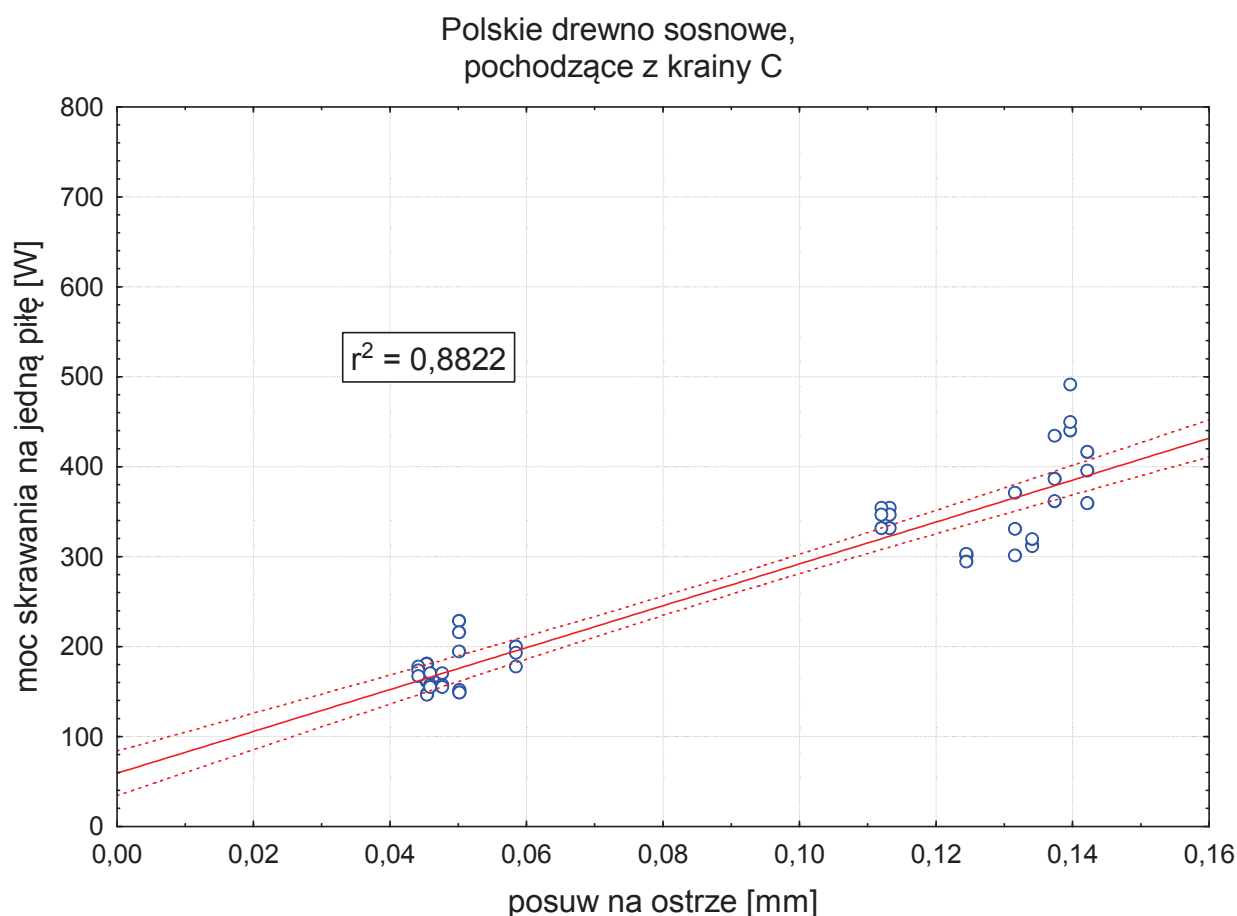
które charakteryzuje się współczynnikiem determinacji $r^2 = 0,7584$ (współczynnik Pearsona $r = 0,8709$).

Wykres (rys. 7.2) wyników pomiaru mocy skrawania dla polskiego drewna sosnowego pochodzącego z krainy B (rys. 6.1), charakteryzuje się dwoma skupiskami punktów pomiarowych oraz kilka punktów zlokalizowanych pomiędzy tymi skupiskami. Odosobnione punkty pomiarowe były zarejestrowane podczas przecierania dwóch próbek (B8 i B12) przy wyższej wartości prędkości posuwu v_{f2} . Wartości nastawionego posuwu były nastawione jako nieco niższe, niż w przypadku pozostałych próbek, gdyż próbki B8 i B12 posiadały zauważalne

wady, w postaci sęków znacznie większych rozmiarów niż w pozostałych badanych próbkach. Z powodu zaobserwowania wspomnianych wad drewna, zdecydowano się na nastawienie niższych wartości prędkości posuwu we wspomnianych dwóch przypadkach, aby ograniczyć zagrożenie wyrwania sęków z próbki, a co za tym idzie uszkodzenia pił w sprzęgu. Występujące wady drewna w postaci sęków, mogły być przyczyną wystąpienia znacznie większej wartości mocy skrawania niż by wynikała z funkcji liniowej powstałej z otrzymanych wyników pomiaru.

7.1.3. Drewno sosnowe pochodzące z Małopolskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (Kraina C)

Rysunek 7.3 przedstawia zmiany mocy skrawania przypadającej na jedną piłę podczas przecinania polskiego drewna sosnowego pochodzącego z Małopolskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (Kraina C) (rys. 6.1, tabela 6.1).



Rysunek 7.3. Moc skrawania na jedną piłę w funkcji posuwu na ostrze (grubość warstwy skrawanej) podczas przecinania na pilarcie ramowej PRW15M polskiego drewna sosnowego pochodzącego z Małopolskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (linie przerywane dotyczą obszaru zmienności dla prawdopodobieństwa 95%)

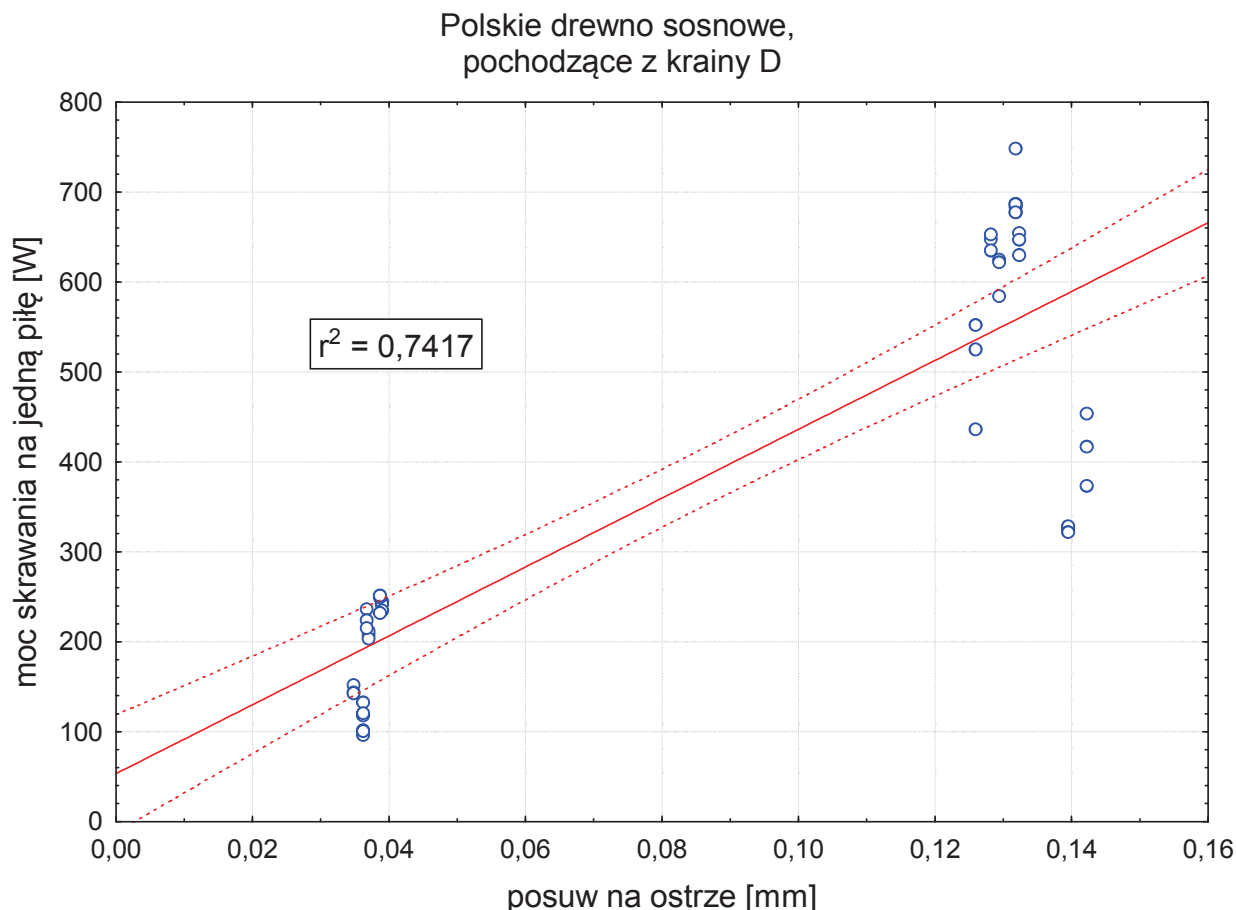
Otrzymane równanie regresji liniowej:

$$P_c [\text{W}] = 59,04966 + 2328,50157 \cdot f_z \quad (7.3)$$

które charakteryzuje się współczynnikiem determinacji $r^2 = 0,8822$ (współczynnik Pearsona $r = 0,9393$).

7.1.4. Drewno sosnowe pochodzące z Wielkopolsko-Pomorskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (Kraina D)

Na rysunku 7.4 przedstawiono zmiany mocy skrawania przypadającej na jedną piłę podczas przecinania polskiego drewna sosnowego pochodzącego z Wielkopolsko-Pomorskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (Kraina D) (rys. 6.1, tabela 6.1).



Rysunek 7.4. Moc skrawania na jedną piłę w funkcji posuwu na ostrze (grubości warstwy skrawanej) podczas przecinania na pilarcie ramowej PRW15M polskiego drewna sosnowego pochodzącego z Wielkopolsko-Pomorskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (linie przerywane dotyczą obszaru zmienności dla prawdopodobieństwa 95%)

Otrzymane równanie regresji liniowej:

$$P_c [\text{W}] = 53,28331 + 3828,82596 \cdot f_z \quad (7.4)$$

które charakteryzuje się współczynnikiem determinacji $r^2 = 0,7417$ (współczynnik Pearsona $r = 0,8612$).

Wyniki badań przecierania polskiego drewna sosnowego pochodzącego z krainy D (rys. 6.1) zobrazowane na rysunku 7.4 charakteryzują się najniższym współczynnikiem determinacji spośród czterech badanych grup polskiego drewna (rys. 6.1, tabela 6.1). Spowodowane jest to dużym rozrzutem punktów pomiarowych zarejestrowanych przy drugiej (wyższej) prędkości posuwu v_{f2} . Tak duży rozrzut może wynikać ze znacznego zróżnicowania gęstości próbek drewna sosnowego pochodzących z krainy D. Próbki posiadały gęstość od $0,41 \text{ g/cm}^3$ do $0,64 \text{ g/cm}^3$. Sposób pomiaru gęstości próbek został omówiony w pracy [15], zaś wpływ gęstości

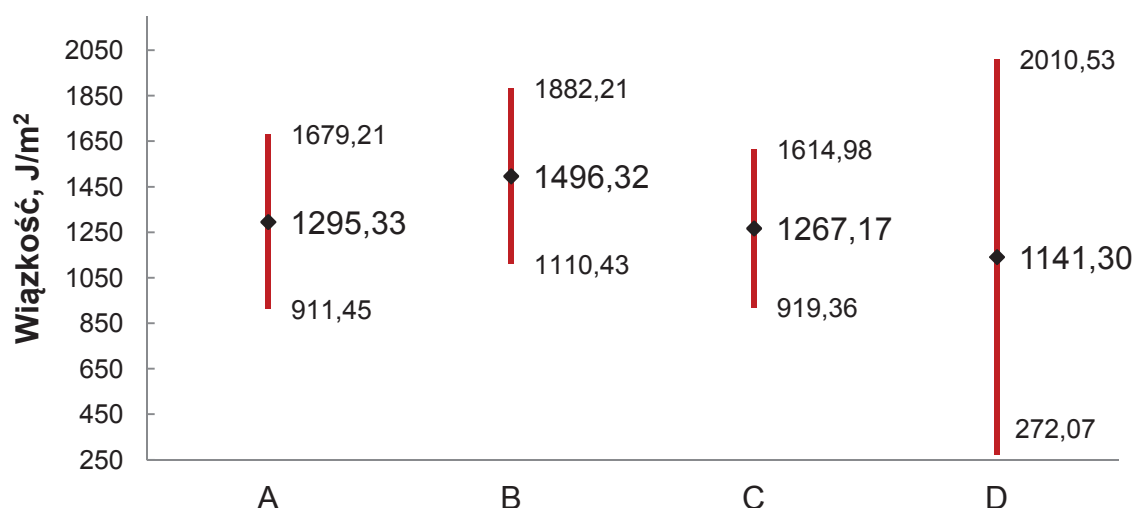
drewna na siły skrawania szeroko omówiono w pracach [17, 18], gdzie uwzględniono zarówno gęstość globalną próbek jak i lokalną mierzoną przy użyciu radiografii rentgenowskiej (X-ray). Badania pomiaru gęstości lokalnej przeprowadzono w CNR IVALS A Trees and Timber Institute (Instytut Włoskiej Akademii Nauk).

7.2. Wiązkość i naprężenia tnące w strefie skrawania dla badanego drewna

Z poszczególnych równań regresji (równania: 7.1, 7.2, 7.3, 7.4) otrzymanych dla różnych regionów pochodzenia drewna uzyskano wartości stałych materiałowych: wiązkość $R_{\perp}$ w J/m^2 (tabela 7.1) oraz naprężenia tnące w strefie skrawania τ_y w MPa (tabela 7.2). Wartości te zostały zobrazowane również na wykresach (rys. 7.5 i rys. 7.6). Rozrzuty dla obu parametrów wyznaczano na podstawie zaznaczonych na wykresach (rysunki: 7.1, 7.2, 7.3, 7.4) linii zmienności dla prawdopodobieństwa 95% (poziom istotności $\alpha = 0.05$).

Tabela 7.1. Wartości wiązkości R dla drewna sosnowego z różnych regionów Polski

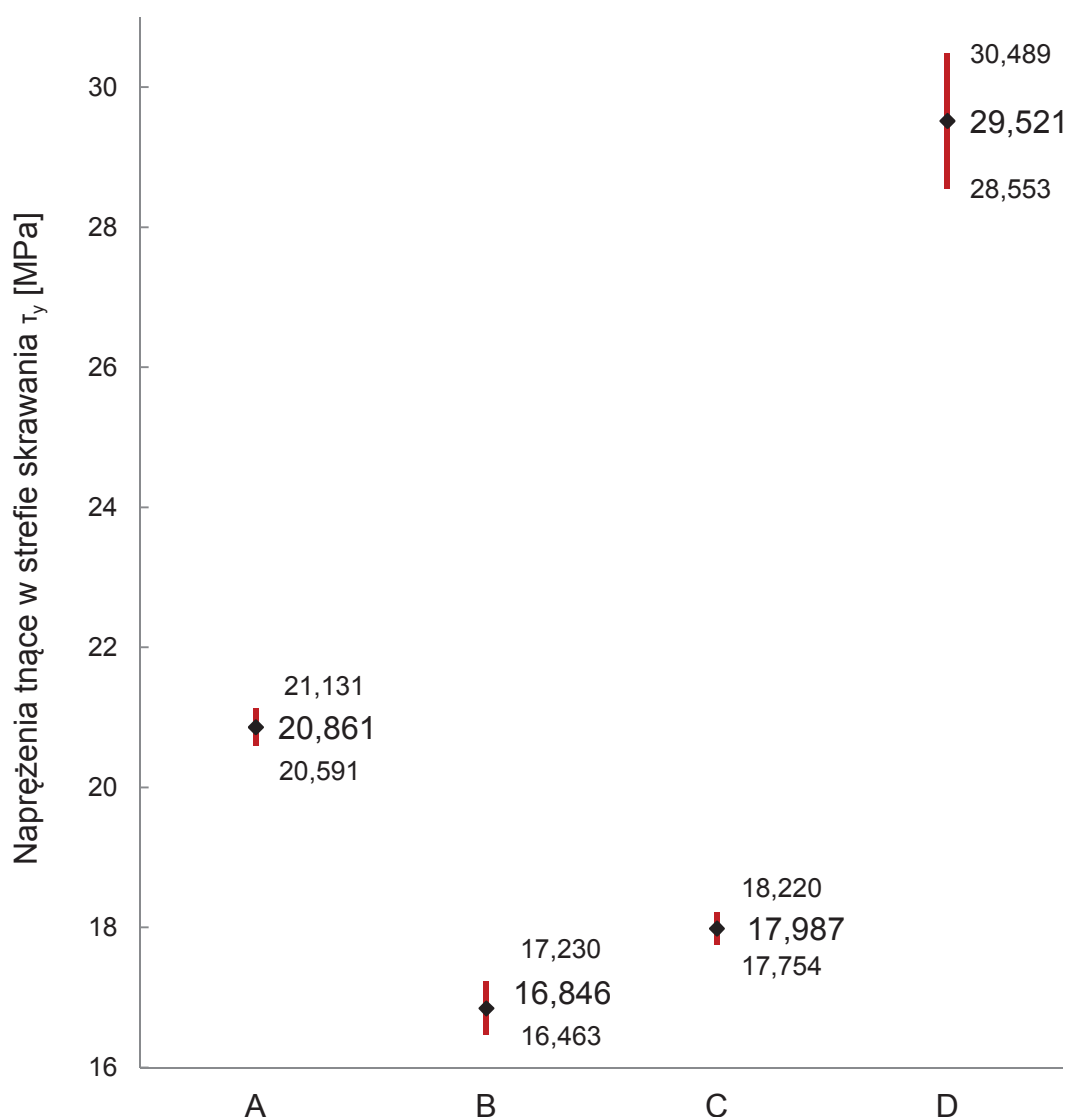
Kraina pochodzenia	Wartość wiązkości $R_{\perp}$, J/m^2
Kraina A	1295,33 $\pm$ 383,881
Kraina B	1496,32 $\pm$ 385,888
Kraina C	1267,17 $\pm$ 347,814
Kraina D	1141,30 $\pm$ 869,23



Rysunek 7.5. Wartości średnie wiązkości drewna sosnowego wraz z rozrzutami, gdzie: A – drewno sosnowe pochodzące z Bałtyckiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej, B – drewno sosnowe pochodzące z Karpackiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej, C – drewno sosnowe pochodzące z Małopolskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej, D - drewno sosnowe pochodzące z Wielkopolsko - Pomorskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (rozrzuty dotyczą obszaru zmienności dla prawdopodobieństwa 95%)

Tabela 7.2. Wartości naprężenia tnące w strefie skrawania τ_y dla drewna sosnowego z różnych regionów Polski

Kraina pochodzenia	Wartości naprężenia tnące w strefie skrawania τ_y , MPa
Kraina A	$20,861 \pm 0,27$
Kraina B	$16,846 \pm 0,384$
Kraina C	$17,987 \pm 0,233$
Kraina D	$29,521 \pm 0,968$



Rysunek 7.6. Wartości średnie naprężeń tnących w strefie skrawania drewna sosnowego wraz z rozrzutami, gdzie: A – drewno sosnowe pochodzące z Bałtyckiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej, B – drewno sosnowe pochodzące z Karpackiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej, C – drewno sosnowe pochodzące z Małopolskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej, D - drewno sosnowe pochodzące z Wielkopolsko – Pomorskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (rozrzuty dotyczą obszaru zmienności dla prawdopodobieństwa 95%)

7.3. Podsumowanie i analiza

Tabela 7.1 zawiera zbiorcze wartości wiążkości drewna sosnowego pochodzącego z różnych regionów Polski. Wartości z tabeli 7.1 zostały przedstawione w postaci wykresu zbiorczego na rysunku 7.5. Pomiedzy prezentowanymi wartościami średnimi wiążkości dokonano oceny różnic występujących między nimi. Oceny tej dokonano za pomocą testu t-Studenta, której wartość t wyznaczono z zależności [29, 42, 50]:

$$t = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\frac{s_1^2}{n_1} + \frac{s_2^2}{n_2}}} \quad (7.5)$$

gdzie:

n_1 i n_2 – liczebność przeprowadzonych prób,

$\bar{x}_1$ i $\bar{x}_2$ – wartości średnia z przeprowadzonych prób,

s_1 i s_2 – odchylenia standardowe z populacji.

Wyznaczoną wielkość z równania 7.5 porównywano z wartością krytyczną testu t-Studenta dla stopni swobody $f = n_1 + n_2 - 2$, przy poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Dla średnich wartości wiążkości pomiędzy poszczególnymi krainami pochodzenia nie zaobserwowano istotnych różnic, co przedstawiono w tabeli 7.3.

Tabela 7.3. Istotność różnic wartości średnich wiążkości drewna sosnowego pochodzącego z czterech regionów Polski

Porównywane krainy	t_{1-2}		t_{kryt}	Istotność różnic
A-B	0,756	<	2,00178	nie
A-C	0,113	<	2,01675	nie
A-D	0,335	<	2,01675	nie
B-C	0,899	<	2,0002	nie
B-D	0,768	<	2,0002	nie
C-D	0,278	<	2,0129	nie

Uwzględniając brak istotnych różnic pomiędzy średnimi wartościami wiążkości $R_{\perp}$ drewna sosnowego pochodzącego z czterech regionów Polski, można wyznaczyć z tych średnich wartości, jedną średnią wartość wiążkości, która byłaby przypisana wszystkim badanym regionom. Wówczas wartość średnia wiążkości dla polskiego drewna sosnowego wynosiłaby $R_{\perp} = 1300 \text{ J/m}^2$.

Za pomocą testu t-Studenta i równania 7.5, podobnie, jak dla wartości średnich wiążkości $R_{\perp}$, dokonano oceny różnic wartości średnich naprężeń tnących w strefie skrawania τ_y dla drewna sosnowego pochodzącego z czterech polskich krain przyrodniczo-leśnych. Wartości średnie

naprężeń tnących w strefie skrawania τ_y zamieszczono w tabeli 7.2, a przedstawiono w postaci wykresu na rysunku 7.6. Wyniki istotności różnic pomiędzy wartościami średnimi naprężeń tnących τ_y przedstawiono w tabeli 7.4.

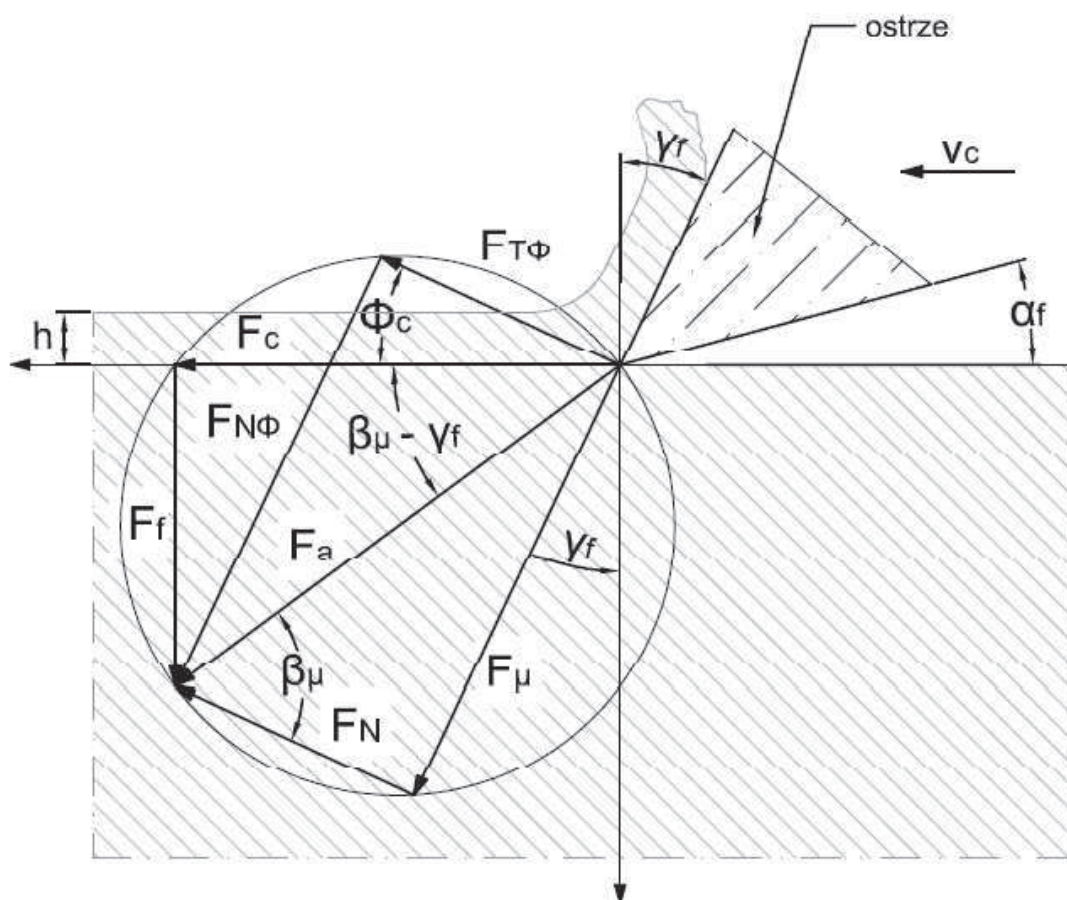
Tabela 7.4. Istotność różnic wartości średnich naprężeń tnących w strefie skrawania drewna sosnowego pochodzącego z czterech regionów Polski

Porównywane krainy	t_{1-2}		t_{kryt}	Istotność różnic
A-B	17,44031	>	2,00178	tak
A-C	16,72128	>	2,01675	tak
A-D	17,79535	>	2,01675	tak
B-C	5,161984	>	2,0002	tak
B-D	25,04604	>	2,0002	tak
C-D	23,91312	>	2,0129	tak

W przypadku analizy różnic pomiędzy wartościami średnimi naprężeń tnących w strefie skrawania τ_y , zaobserwowano ich znaczącą istotność (tabela 7.4). Oznacza to, że drewno sosnowe w zależności od regionu pochodzenia różni się istotnie swoją własnością materiałową, jaką są naprężenia tnące w strefie skrawania.

8. OKREŚLENIE KĄTA ŚCINANIA Φ_c ORAZ ODKSZTAŁCENIA POSTACIOWEGO γ

Badania empiryczne w postaci testów przecierania polskiego drewna sosnowego, które zostały opisane we wcześniejszych rozdziałach tej rozprawy, pozwoliły na wyznaczenie stałych materiałowych. Wyznaczone dane materiałowe (tabela 7.1 i 7.2) pozwalają prognozować wartości sił skrawania dla danego materiału, lecz również umożliwiają określenie innych ważnych danych procesu skrawania jakimi są: kąt ścinania Φ_c , czyli położenie płaszczyzny ścinania w odniesieniu do powierzchni obrabianej (rys. 8.1), oraz γ odkształcenie postaciowe, czyli odkształcenie przy ścinaniu wzdłuż płaszczyzny ścinania, nawet dla małych grubości warstwy skrawanej, co do tej pory było niemożliwe do wyznaczenia w prosty sposób.

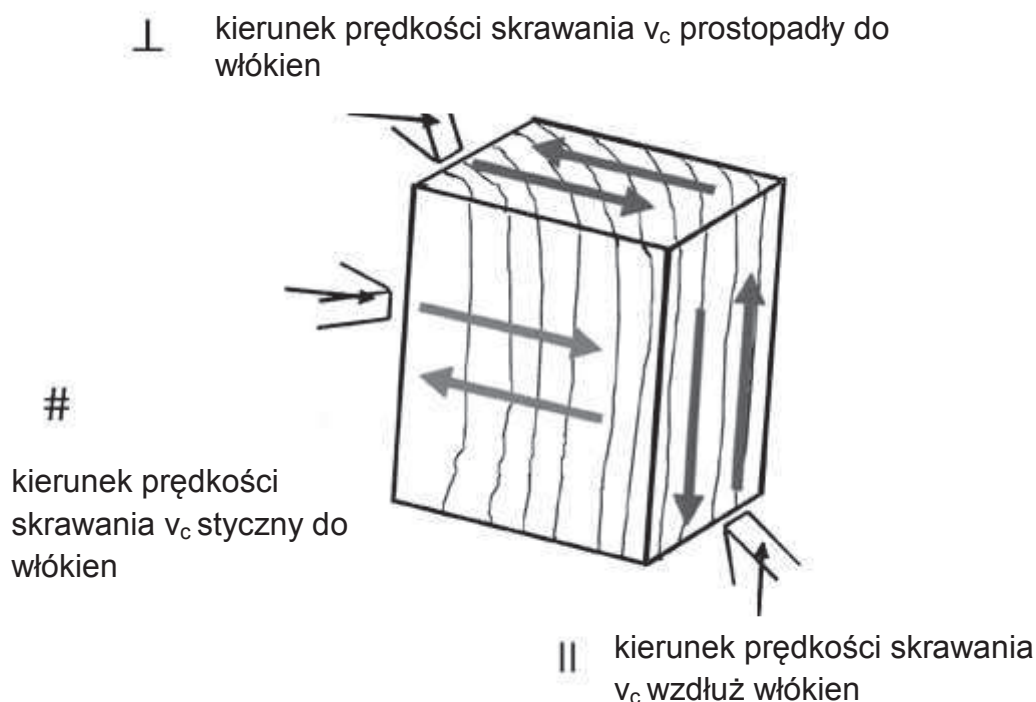


Rysunek 8.1. Układ sił opracowany przez Ernsta i Merchanta [27, 64]: F_a – siła czynna, F_c – siła skrawania, F_f – siła posuwu, F_{μ} – siła tarcia powierzchni natarcia, F_N – siła normalna do powierzchni natarcia, $F_{T\Phi}$ – siła tnąca w płaszczyźnie ścinania, $F_{N\Phi}$ – siła normalna do płaszczyzny ścinania, α_f – kąt przyłożenia, Φ_c – kąt ścinania, γ_f – kąt natarcia, β_{μ} – kąt tarcia, h – grubość warstwy skrawanej

Kąt ścinania Φ_c obliczano do tej pory z zależności Ernsta – Merchanta (rów. 3.4), lecz ta zależność miała zastosowanie wyłącznie dla większych wartości posuwu na ostrze f_z , gdyż dla dużych wartości grubości warstwy skrawanej kąt ścinania przyjmuje stałe wartości ($\Phi_c = \text{const.}$) [5]. W praktyce wartości kąta ścinania Φ_c wyznaczone empirycznie różnią się od wartości określanych z wykorzystaniem modelu Ernsta – Merchanta. Wartości określone doświadczalnie są zazwyczaj mniejsze od wartości, które uzyskano z zależności 3.4.

Spowodowane jest to tym, że zależność ta nie uwzględnia wpływu stosunku wiązkości do naprężeń tnących w strefie skrawania R/τ_y [5-7].

Model do określania kąta ścinania Φ_c , również dla małych wartości grubości warstwy skrawanej, która uwzględnia wpływ stosunku wiązkości do naprężeń tnących w strefie skrawania, został sformułowany przez Atkinsa [5] w postaci równania 4.18. Pamiętając o anizotropowości drewna, należy stosować wartości R (rów. 4.22) i τ_y (rów. 4.23), odpowiednie dla danego kierunku prędkości skrawania w odniesieniu do kierunku włókien drewna (rys. 8.2) [36], gdyż silnie on zależy od kinematyki przecierania.



Rysunek 8.2. Główne pozycje krawędzi skrawającej i kierunki prędkości skrawania [37, 43, 58]

Dla badanego polskiego drewna sosnowego, pochodzącego z czterech krain przyrodniczo-leśnych (rys. 6.1), zostały wyznaczone wartości kąta ścinania Φ_c w oparciu o model Atkinsa, przy zastosowaniu metody numerycznej Newtona – Raphsona [12, 25]. Opracowano również prostą aplikację w środowisku JAVA, która umożliwia obliczenie wartości kąta ścinania z równania Atkinsa (rów. 4.18) dla podanych wartości: kąta natarcia γ_f , kąta tarcia β_μ oraz parametru Z , który uwzględnia właściwości materiałowe (wiązkość, naprężenia tnące w strefie skrawania) i grubość warstwy skrawanej, $Z = \frac{R}{\tau_y \cdot h}$ [19].

Aplikacja w środowisku Java, której podstawowy widok przedstawiono na rysunku 8.3, pozwala na szybkie określenie wartości kąta ścinania dla danego przypadku, ale nie umożliwia zobrazowania zmian wartości kąta Φ_c w zależności od zmiany wartości grubości warstwy skrawanej, co jest bardzo przydatne do analizy procesu cięcia, a co umożliwia metoda Newtona – Raphsona.

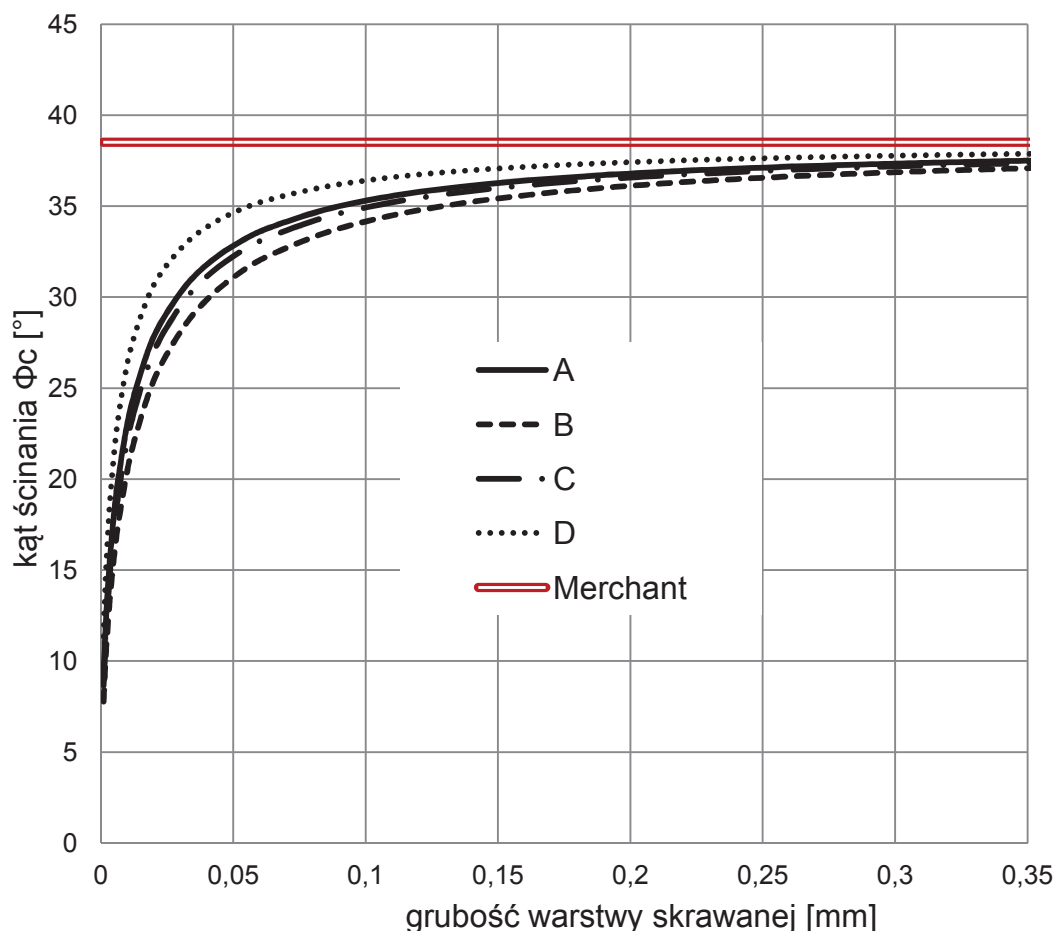
rake angle γ_f [°]
 angle of friction β_μ [°]
 $Z = R / (\tau_y \cdot f_z)$
 where:
 R - fracture toughness [J·m²]
 τ_y - the yield strength [Pa]
 f_z - feed per tooth [m]

 shear angle Φ_c [°] 37.8600278522

Rysunek 8.3. Aplikacja w środowisku JAVA wyznaczająca wartość kąta ścinania z zależności proponowanej przez Atkinsa w oparciu o metody iteracyjne [19]. Na widoku aplikacji przedstawiono obliczenia wartości kąta ścinania dla drewna sosnowego pochodzącego z krainy Małopolskiej Krainy Przyrodniczo Leśnej, przecinanej na pilarcie DTRB-63 w tartaku firmy Complex, przy nastawie grubości warstwy skrawanej h (f_z) = 0,625 mm.

Wartości kąta ścinania Φ_c w zależności od wartości grubości warstwy skrawanej h (f_z), wyznaczone metodą Newtona – Raphsona, przedstawiono na rysunku 8.4. Wartości te zostały określone dla sosny pochodzącej z czterech krain przyrodniczo – leśnych w Polsce oraz dla trzech rodzajów pilarek, pilarki ramowej (DTRB-63, firmy FOD), taśmowej (ST – 100R, firmy Stenner) i tarczowej (PRW 422, firmy TOS Svitavy). Z uwagi na to, że jakościowo przebiegi zmian kąta ścinania Φ_c będą podobne dla tych trzech pilarek, na rysunku 8.4 przedstawiono wyniki dla pilarki ramowej, zaś pełne wyniki zamieszczono w Dodatku B. Dla porównania wartości prognozowanych z zależności Atkinsa, na wykresie 8.4 również przedstawiono wartości kąta ścinania wyznaczonego z zależności Ernsta – Merchanta. Wartości uzyskane z klasycznego sposobu określania kąta ścinania są zawsze nieco wyższe, niż wartości prognozowane z zależności 4.18. Klasyczny model wyznaczania wartości kąta ścinania nie uwzględnia rodzaju materiału, grubości warstwy skrawanej oraz kierunku obróbki względem włókien drewna. Model Atkinsa zaś uwzględnia te czynniki w parametrze Z , który zawiera wiązkość R , naprężenia tnące w strefie skrawania τ_y oraz grubość warstwy skrawanej h . Wiazkość i naprężenia tnące jako właściwości materiałowe określają rodzaj materiału, a ich zmienność w zależności od kierunku skrawania względem włókien drewna pozwala uwzględnić również w prognozowaniu wartości kąta ścinania, kierunek obróbki względem włókien drewna. Zawarcie grubości warstwy skrawania h w parametrze Z zależności Atkinsa (rów. 4.18), pozwala na wyznaczenie wartości kąta ścinania w zależności od grubości warstwy skrawania,

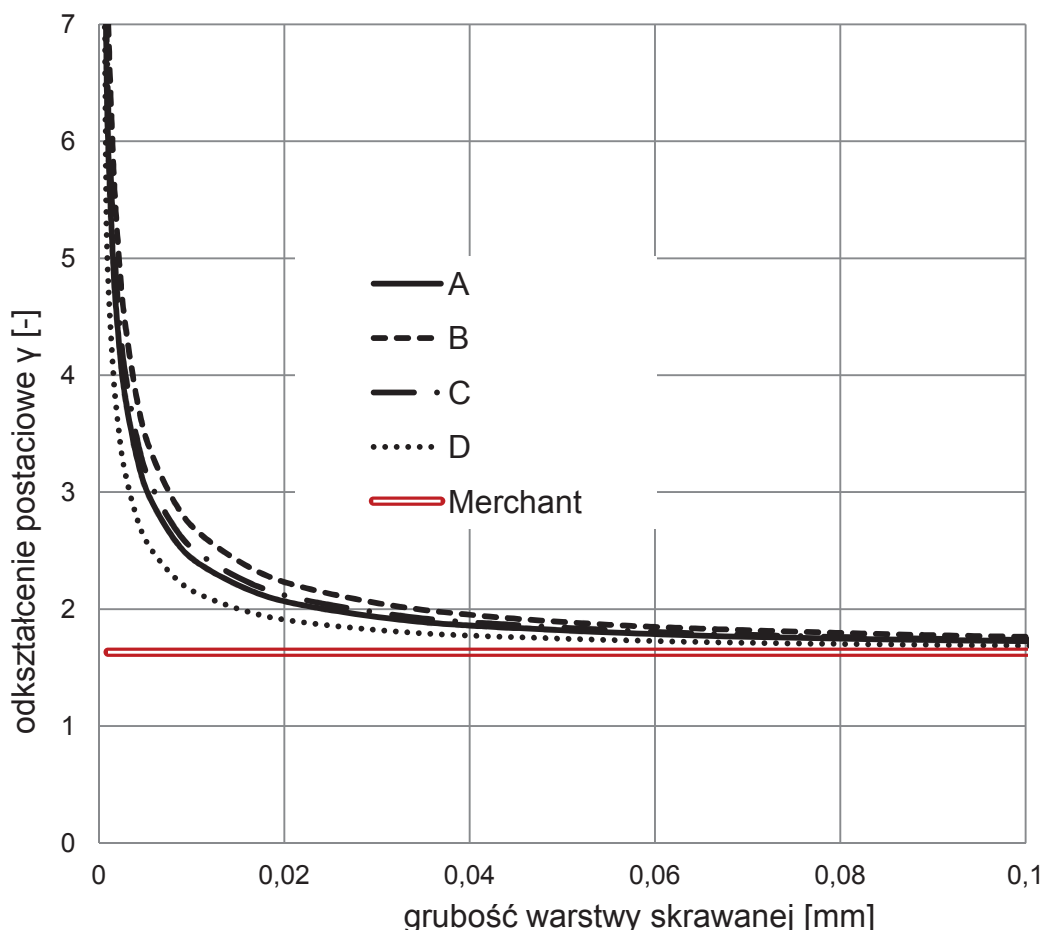
co umożliwia zaobserwowanie zmiany wartości kąta Φ_c przy małych wartościach grubości warstwy skrawania.



Rysunek 8.4. Porównanie prognozowanych wartości kąta ścinania Φ_c dla drewna sosnowego różnych regionów Polski, uzyskanych z użyciem modelu zawierającego pracę rozdzielania materiału oraz pracę tarcia na powierzchni natarcia w funkcji grubości warstwy skrawanej h (f_z) z wartościami kąta ścinania wyznaczonymi wg zależności Ernsta – Merchanta. Wartości Φ_c uzyskane dla kąta natarcia $\gamma_f = 18^\circ$, dla pilarki ramowej DTRB-63, firmy FOD.

Na wykresie 8.4 można zaobserwować, że wartości kąta ścinania, wyznaczone z modelu Atkinsa, przy wartościach grubości warstwy skrawanej powyżej 0,3 mm, zbliżają się do wartości wyznaczonych z klasycznego modelu Ernsta – Merchanta, lecz są nieco mniejsze. Dla wartości grubości warstwy skrawanej mniejszych od 0,2 mm, wartości kąta ścinania znacząco maleją. Przy wartościach grubości warstwy skrawania poniżej 0,01 mm, wartości kąta ścinania zbliżają się do zera. Spowodowane jest to tzw. efektem skali, czyli efektem zmiany warunków skrawania [5], który jest był możliwy do wytłumaczenia dzięki zastosowaniu do modelowania efektów energetycznych procesu skrawania elementów mechaniki pękania. Podobne zjawisko, można również zaobserwować dla prognozowanych wartościach odkształcenia postaciowego γ na rysunku 8.5, gdzie wraz z malejącymi wartościami grubości warstwy skrawanej wzrastają wartości odkształcenia postaciowego. Zmiany te, podobnie jak przy kącie ścinania, są spowodowane zmianami warunków skrawania dla małych wartości warstwy skrawanej [5].

Prognozowane wartości odkształcenia postaciowego przy ścinaniu γ zostały określone z zależności 4.16 z uwzględnieniem wcześniej wyznaczonych wartości kąta ścinania ϕ_c z modelu uwzględniającego mechanikę pęknięcia.



Rysunek 8.5. Porównanie prognozowanych wartości odkształcenia postaciowego wzdłuż płaszczyzny ścinania γ dla drewna sosnowego różnych regionów Polski, uzyskanych z użyciem modelu zawierającego pracę rozdzielania materiału oraz pracę tarcia na powierzchni natarcia w funkcji grubości warstwy skrawanej h (f_z) z wartościami odkształcenia postaciowego uzyskanych w oparciu o zależność Ernsta – Merchanta. Wartości γ wyznaczano dla kąta natarcia $\gamma_f = 18^\circ$, dla pilarki ramowej DTRB-63, firmy FOD.

Prognozowane wartości odkształcenia postaciowego w płaszczyźnie ścinania (rys. 8.5) zostały wyznaczone dla tego samego drewna, pilarki oraz warunków skrawania jak w przypadku prognozowania wartości kąta ścinania (rys. 8.4). Również wartości uzyskane z uwzględnieniem mechaniki pęknięcia zostały zestawione z wartościami uzyskanymi z modelu Ernsta - Merchanta (rów. 3.4).

Z wykresów 8.4 i 8.5 można zaobserwować, że zarówno wartości kąta ścinania jak i odkształcenia postaciowego są zróżnicowane w zależności od pochodzenia drewna sosnowego. Zróżnicowanie to jest bardziej widoczne dla mniejszych wartości warstwy skrawanej. Różnice pomiędzy prognozowanymi wartościami kąta ścinania i odkształcenia postaciowego w płaszczyźnie ścinania, dla drewna pochodzącego z czterech krain Polski,

zanikają wraz ze wzrostem grubości warstwy skrawanej, wartości te zbliżają się do wartości określonych w oparciu o model Ernsta – Merchanta.

Z analiz przeprowadzonych dla trzech rodzajów pilarek zaobserwowano, że spośród badanego drewna sosnowego pochodzącego z czterech regionów Polski, najniższe wartości kąta ścinania Φ_c otrzymano dla drewna pochodzącego z Karpackiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (Region B). Największe zaś wartości zostały określone dla Wielkopolsko-Pomorskiej Krainy (Region D). Trend wzrostu wartości kąta ścinania Φ_c dla poszczególnych regionów pochodzenia, pokrywa się z trendami wzrostu innych własności strukturalnych badanego drewna tj. ciężar właściwy ρ , umowna wytrzymałość na zginanie MOR oraz naprężeń tnących w strefie skrawania τ_y (tabela 8.1).

Tabela 8.1. Gęstość, wiązkość, naprężenia tnące w strefie skrawania, wytrzymałość na zginanie statyczne drewna sosnowego w funkcji regionu pochodzenia

Region	ρ	R_L	τ_{yL}	MOR^*
	kgm^{-3}	Jm^{-2}	kPa	MPa
A	520	1295.33	20861	41,6
B	439	1496.32	16846	25,3
C	478	1267.17	17986	35,2
D	589	1141.29	29521	45,1
ρ – gęstość, MOR – wytrzymałość na zginanie statyczne (* wartości przyjęte od Krzoska [38, 39, 40])				

Dla określanych wartości odkształcenia postaciowego w płaszczyźnie ścinania zaobserwowano odwrotną kolejność niż dla wartości kąta ścinania. Największe wartości dla każdej z analizowanych pilarek uzyskiwano dla drewna sosnowego pochodzącego z Karpackiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (Region B), najmniejsze dla Wielkopolsko-Pomorskiej Krainy (Region D).

9. PROGNOZOWANIE MOCY SKRAWANIA DLA OPERACJI PRZECINANIA NA WYBRANYCH PILARKACH STOSOWANYCH W POLSKIM PRZEMYŚLE TARTACZNYM

Prognozowanie mocy skrawania zostało wykonane dla rzeczywistych przypadków procesów przecinania na pilarkach zainstalowanych w jednym z tartaków firmy Complex w województwie Pomorskim. Do tej analizy wybrano tartak zlokalizowany w Dziemianach w województwie Pomorskim m.in. ze względu na zobowiązania związane z otrzymaniem dofinansowania badań w postaci stypendium w ramach projektu „Innodoktorant – stypendia dla doktorantów, V edycja”, realizowanego przez Departament Rozwoju Gospodarczego Urzędu Marszałkowskiego Województwa Pomorskiego w ramach Priorytetu VIII Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki [115].

Tabela 9.1. Dane maszyn i narzędzi

Parametry	Pilarka ramowa DTRB-63 (firmy FOD)	Dwuwrzecionowa pilarka tarczowa PRW 422 (firmy TOS Svitavy)		Pilarka taśmowa ST- 100R (firmy Stenner)
		Dolne	Górne	
H_P , mm **	194,2	45	30	75
n_{sb}	6	9	9	1
S_t , mm	3,9	3,9		2,2
P , mm	25	–		32
γ_f , °	18	22		20
Z	38	18		173
v_c , m/s	5,2	69,6		29
v_f , m/min (m/s)	1,2–9 (0,02–0,15)	4–40 (0,07–0,67)		5–60 (0,083–1)
f_z , mm*	0,19–1,44	0,058–0,58		0,092–1,1
H , mm*	0,19–1,44	0,034–0,35	0,029–0,29	0,092–1,1
v_f , m/min (m/s), stosowane	3,9 (0,065)	16 (0,27)		46 (0,77)
f_z , mm, stosowane	0,625	0,234		0,85
h , mm, stosowane	0,625	0,139	0,115	0,85
P_{EM} , kW	45	110	110	15
P_i , kW	19	14	14	2,5
P_{cA} , kW (P_{cA}^I)	20,8 (3,46)	76,8 (8,53)	76,8 (8,53)	10 (10)
Legenda: *Wartości używane w obliczenia prognozowania mocy skrawania, P_{EM} – moc silnika elektrycznego, P_i – moc jałowa, P_{cA} , (P_{cA}^I) – dostępna moc skrawania w strefie skrawania (dostępna moc skrawania na jedną piłę), n_{sb} – liczba pił **Dla pilarki ramowej wartość H_P określa średnią wysokość cięcia, która jest określana dla wielkości obrabianych kłód drewna				

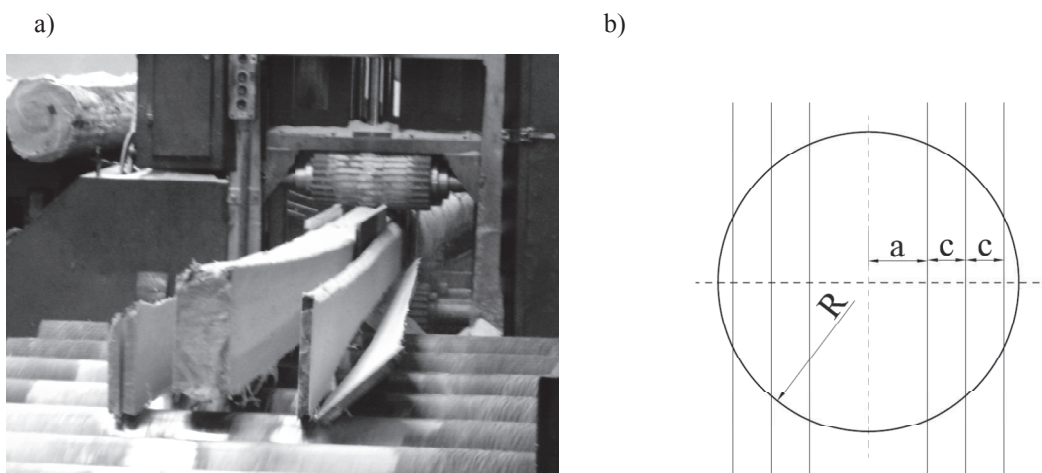
Trzy rodzaje pilarek, dla których przeprowadzono prognozowanie mocy skrawania, zajmują różne miejsce w procesie produkcyjnym: pilarka ramowa DTRB-63 (firmy FOD, PL, rys. 9.1) stosowana w pierwotnym przerobie drewna, dwuwrzecionowa pilarka tarczowa PRW 422 (firmy TOS Svitavy, CZ, rys. 9.3) również stosowana w pierwotnym przerobie drewna, pilarka taśmowa ST-100R (firmy Stenner, UK, rys. 9.6) stosowana w przerobie wtórnym drewna w produkcji elementów klejonych warstwowo. Podstawowe parametry wymienionych pilarek oraz procesów cięcia, dla których przeprowadzono obliczenia, zostały przedstawione w tabeli 9.1. Materiał, dla którego dokonano określania prognozowanej mocy skrawania pochodził z czterech krain przyrodniczo-leśnych Polski (rys. 6.1): Bałtyckiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (A), Karpackiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (B), Małopolskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (C) i Wielkopolsko-Pomorskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (D). Surowiec, jego właściwości oraz dokładne pochodzenie zostały omówione w rozdziale 6. Dodatkowe informacje zamieszczono w tabeli 8.1.

Do obliczeń przyjęto wilgotność surowca MC 8.5–12% dla pilarki taśmowej, zaś MC~30% dla pilarki ramowej i pilarki tarczowej. Założenia te zostały podyktowane miejscem lokalizacji danej pilarki w procesie produkcyjnym w tartaku. Dlatego, otrzymane wyniki mocy skrawania dla pilarek ramowych i tarczowych były powiększone o współczynnik 1.05 [46]. Wartość współczynnika tarcia pomiędzy suchym drewnem sosnowym a stalą, przyjęto $\mu = 0.6$ [11, 28].

Prognozowania zapotrzebowania mocy skrawania dokonano przy zastosowaniu nowatorskiej metody uwzględniającej naprężenia poślizgu i elementy mechaniki pęknięcia, która została opisana w rozdziale 4.3. Wyniki obliczeń uzyskane z wspomnianej metody porównano z wynikami prognozowania mocy skrawania z wykorzystaniem podejścia klasycznego opisanego w literaturze [46, 49, 52, 64]. Zdecydowano się tylko na porównanie z podejściem klasycznym opartym na właściwym oporze skrawania, gdyż jest to najpopularniejsza metoda i szeroko opisana w literaturze [46, 52, 53, 69], zaś inne modele, jak statystyczny model wieloczynnikowy [8, 67] czy metody przybliżone opierające się na właściwej gęstości drewna [89, 90], dają znaczne rozbieżności między wartościami rzeczywistymi mocy skrawania, co wykazano w pracach [21, 64, 65].

9.1. Pilarka ramowa DTRB-63 (firmy FOD, PL)

W tartaku Complex stosowany jest sposób przetarcia dwukrotnego [91], polegający na wycięciu z drewna okrągłego pryzmy i desek bocznych (rys. 9.1). Następnie uzyskana pryzma jest obracana o 90° i przecierana na deski bądź bale. W tym przypadku grubość powstałej pryzmy wynosi $2a = 75 \text{ mm}$, dodatkowo otrzymano dwie deski boczne po każdej stronie pryzmy, o grubości $c = 25.3 \text{ mm}$, co przedstawiono na rysunku 9.1b. Średnica kłody w cieńszym końcu wynosiła około $d_g \approx 9'' \approx 230 \text{ mm}$ (największa średnica $d_g \approx 260 \text{ mm}$), a długość przecieranej kłody wynosiła $l = 4 \text{ m}$. Wysokość rzazu H_P przedstawiona w tabeli 9.1, jest w tym przypadku średnią wartością rzazu wyznaczoną w środku długości kłody.



Rysunek 9.1. Pilarka ramowa DTRB-63 (a) zastosowany wzór piłowania (b)

W celu oszacowania średnicy kłody po środku jej długości, obliczono współczynnik stożka kłody TC (cm/m, stopień zbieżności) [44] z zależności:

$$TC = \frac{1}{10} \left[6.2 + 74l^{-3} + \left(\frac{0.48}{\sqrt{l}} - 0.12 \right) (d_g - 22 + 0.3l) \right] \quad (9.1)$$

gdzie: l to długość kłody w m, d_g to górna średnica kłody bez kory w cm.

W tym przypadku $TC = 0.763$ cm/m, a dla tej wartości średnica kłody po środku jej długości wynosi $d = 24.53$ cm.

Dodatkowo obliczono całkowitą wysokość rzazu H_Σ z zależności [13]:

$$H_\Sigma = 4 \sum_{i=1}^{i=k} \sqrt{\left(\frac{d}{2} \right)^2 - [a + (i-1)c]^2} \quad (9.2)$$

gdzie: $\frac{d}{2} \geq a + (i-1)c$, i to liczba poprawnych przetarć materiału liczonych od środka kłody.

Z tego wynika, że dla pilarki ramowej średnia grubość cięcia H_P to stosunek H_Σ do liczby pól w sprzęgu n_{sb} . Obliczona wartość H_P dla rozpatrywanego przypadku jest przedstawiona w tabeli 9.1.

Prognozowane moce skrawania wyznaczono z zależności (rów. 4.21) opracowanej przez Orłowskiego i Atkinsa [56] w oparciu o model opisany w pracy [5]. Stałe materiałowe, jak wiązkość i naprężenia tnące w strefie skrawania, które przyjęto do prognoz są przedstawione w tabeli 8.1. Wartości odkształcenia postaciowego w płaszczyźnie ścinania γ zostały określone w oparciu o wyznaczony kąt ścinania z zależności 4.18 za pomocą metody numerycznej Newtona – Raphsona i zostało to opisane w rozdziale 8. Również współczynnik korekcyjny tarcia Q_{shear} został wyznaczony z zależności 4.17 w oparciu o wyznaczony kąt ścinania. Pozostałe dane potrzebne do prognozy zostały zamieszczone w tabeli 9.1 i 8.1.

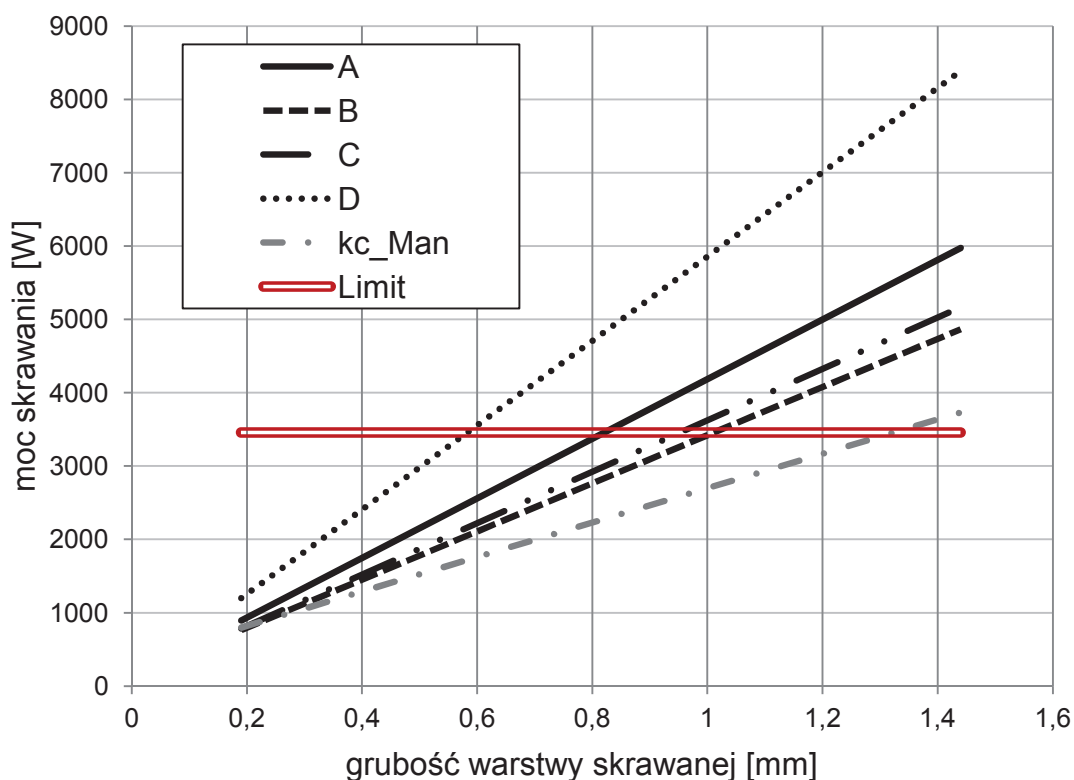
Do prognozowania mocy skrawania metodą klasyczną, wartości właściwego oporu skrawania odczytano z tabeli 22 zamieszczonej w pracy [69]. Dla rozpatrywanego przypadku, dla

$f_z = 0,625 \text{ mm}$ i $H_p = 194,2 \text{ mm}$, właściwy opór skrawania wynosi $k_c = 67,7 \text{ MPa}$. Wartość ta została pomnożona przez współczynnik $k_{MC} = 1,05$, o czym wspomniano wcześniej, ze względu na przyjętą wilgotność drewna na poziomie 30%, zgodnie z informacją uzyskaną w tartaku Complex. Moc skrawania obliczono z równania 4.6.

Na rysunku 9.2 przedstawiono prognozowane wartości mocy skrawania dla drewna sosnowego pochodzącego z omawianych w pracy czterech krain przyrodniczo-leśnych za pomocą modelu uwzględniającego elementy mechaniki pęknięcia, oraz za pomocą klasycznego modelu opartego na właściwym oporze skrawania. Wyznaczone wartości mocy skrawania przypadają na jedną piłę w sprzęgu. Na wykresie tym przedstawiono również wartość dostępnej mocy w strefie skrawania P_{cA}^I , którą można obciążyć jedną piłę ze sprzęgu. Wartość ta jest przedstawiona w tabeli 9.1, a obliczono ją z zależności:

$$P_{cA}^I = \frac{(P_{EM} - P_i)\eta_m}{n_{sb}} \quad (9.3)$$

Do obliczeń przyjęto, że sprawność η_m głównego układu napędowego jest na poziomie $\eta_m = 0,85$. Takich obliczeń dokonano dla każdego przypadku analizowanego w pracy (tab. 9.1).



Rysunek 9.2. Przewidywana moc skrawania przypadająca na jedną piłę dla pilarki ramowej DTRB 63. A, B, C, D – moce wyznaczone wg modelu uwzględniającego mechanikę pęknięcia dla drewna sosnowego pochodzącego z czterech regionów Polski. k_{c_Man} oznacza moc prognozowaną wg klasycznego modelu.

Na rys. 9.2 można zaobserwować, że otrzymane wartości mocy skrawania dla drewna sosnowego z różnych regionów Polski różnią się między sobą znacząco. Największe wartości przypadają dla drewna pochodzącego z Wielkopolsko-Pomorskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (D), zaś najmniejsze dla drewna z Karpackiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (B). Jest to

zgodne z trendem zmian pozostałych właściwości materiałowych, jak naprężenia ścinające, wytrzymałość na zginanie, czy gęstość (tab. 8.1). W pracy [18] wykazano, że gęstość jako pojedynczy parametr ma mało istotny wpływ na moc skrawania. Współczynniki korelacji Pearsona pomiędzy gęstością globalną, a mocą skrawania dla drewna sosnowego pochodzącego z Karpackiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (B) wynosiły $r = -0,02$ (dla $f_z = 0,04 \text{ mm}$) i $r = -0,08$ (dla $f_z = 0,14 \text{ mm}$), zaś dla drewna z Wielkopolsko-Pomorskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (D), $r = 0,83$ (dla $f_z = 0,04 \text{ mm}$) oraz $r = 0,91$ (dla $f_z = 0,14 \text{ mm}$) [18]. Powyżej przedstawiono skrajne wartości współczynników korelacji pomiędzy gęstością drewna, a mocą skrawania, które zostały wyznaczone w pracach [17, 18]. Współczynniki dla pozostałych dwóch regionów wynoszą: Bałtycka Kraina Przyrodniczo-Leśna (A): $r = 0,75$ (dla $f_z = 0,04 \text{ mm}$) oraz $r = 0,54$ (dla $f_z = 0,14 \text{ mm}$), oraz Małopolska Kraina Przyrodniczo-Leśna (C): $r = 0,49$ (dla $f_z = 0,04 \text{ mm}$) oraz $r = 0,56$ (dla $f_z = 0,14 \text{ mm}$).

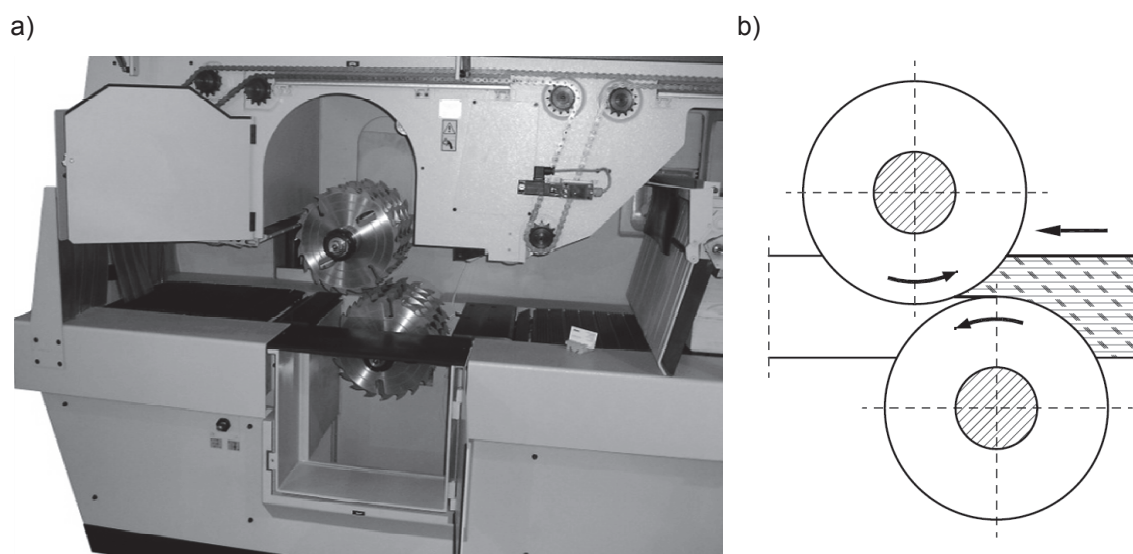
Wartości mocy skrawania prognozowane metodą klasyczną (rys. 9.2) są znacznie niższe od wartości prognozowanych metodą uwzględniającą elementy mechaniki pękania. Tak duża różnica pomiędzy wartościami uzyskanymi z tych dwóch metod spowodowana jest zapewne uwzględnieniem w prognozowaniu, przez metodę opartą na elementach mechaniki pękania, naprężeń tnących w strefie skrawania τ_v , które mają znaczny wpływ na moc skrawania (rów. 4.15), zmieniają się ze względu na rodzaj materiału oraz kierunek obróbki i są zasadniczo wyższe od granicy plastyczności [3, 4, 34]. Dlatego na rysunku 9.2 możemy zaobserwować, że dla drewna sosnowego z krainy D, różnica prognozy dla tego drewna względem prognozy metodą klasyczną jest największa, a co można zaobserwować w tabeli 8.2, wartość naprężeń ścinających dla tego drewna także jest największa.

Wszystkie prognozy przekraczają poziom dostępnej mocy skrawania na jedną piłę. Jednakże prognozy z metody uwzględniającej mechanikę pękania, przekraczają dostępny poziom mocy już przy wartościach grubości warstwy skrawanej poniżej 1 mm, a prognoza dla krainy D już poniżej 0,6 mm. W badaniach [63, 64] pokazano, że prognozowane wartości mocy skrawania w oparciu o metodę uwzględniającą elementy mechaniki pękania są bardzo zbliżone do wartości rzeczywistych. Uwzględniając badania [63, 64], oraz analizując wartości określanych mocy na rysunku 9.2, można dodatkowo zaobserwować, że według metody opartej na właściwym oporze skrawania, limit mocy skrawania zostanie przekroczonych dopiero pod koniec dostępnego zakresu grubości warstwy skrawanej. Tak niedoszacowane wartości mocy skrawanej, mogą prowadzić do awarii pilarki spowodowanej zbyt dużą liczbą zamontowanych pił w sprzęgu i przeciążeniem napędu głównego, a także mogą doprowadzić do błędzenia pił w związku z dużymi siłami posuwu.

9.2. Pilarka tarczowa PRW 422 (firmy TOS Svitavy, CZ)

Kolejną pilarką, dla której zostało przeprowadzone prognozowanie zapotrzebowania mocy przecierania, jest pilarka tarczowa PRW 422 wyprodukowana przez firmę TOS Svitavy (rysunek 9.3). Pilarka ta posiada dwa wrzeciona, dlatego prognoza mocy skrawania będzie dotyczyć obu wrzecion. Na każdym wrzecionie przyjęto do obliczeń po 9 szt. pił tarczowych

(tab. 9.1) o średnicy $D_{cs} = 350 \text{ mm}$. Parametr określający położenie pryzmy obrabianej oś osi wrzeciona dla poszczególnych wrzecion przyjęto następujące wartości: dolne wrzeciono $a = 115 \text{ mm}$, górne wrzeciono $a = 135 \text{ mm}$.



Rysunek 9.3. Dwuwrzecionowa pilarka tarczowa PWR422 (a) [96], kinematyka i podział głębokości cięcia (b)

Pozostałe parametry pilarki potrzebne do wyznaczenia mocy skrawania zostały zamieszczone w tabeli 9.1. Właściwości materiałowe w oparciu, o które określano zapotrzebowanie mocy na obu wrzecionach pilarki PRW 422, zostały przedstawione w tabeli 8.1. Wartości właściwości materiałowych (wiążkość, naprężenia tnące w strefie skrawania) zawartych w tabeli 8.1 odpowiadają właściwością materiału dla przecinania prostopadłego. W trakcie przecinania pryzm na pilarkie tarczowej mamy do czynienia z przecinaniem mieszanym, złożonym z przecinania prostopadłego i wzdłużnego (rys. 8.2). Dlatego wyznaczono odpowiednie wartości wiążkości i naprężeń tnących w strefie skrawania z uwzględnieniem kąta pomiędzy kierunkiem przecinania a włóknami drewna z zależności 4.22 i 4.23. Dodatkowo przyjęto za pracę [9], że wiążkość w kierunku osiowym można wyznaczyć w oparciu o wartość wiążkości w kierunku promieniowego $R_{||} = 0,05R_{\perp}$. Natomiast wartości naprężeń tnących w kierunku osiowym można wyznaczyć w oparciu o wytrzymałość na zginanie statyczne MOR , $\tau_{y||} = 0,125 \cdot MOR$ [32]. Wyznaczone wartości wiążkości i naprężeń tnących w strefie skrawania w kierunku osiowym przedstawiono w tabeli 9.2.

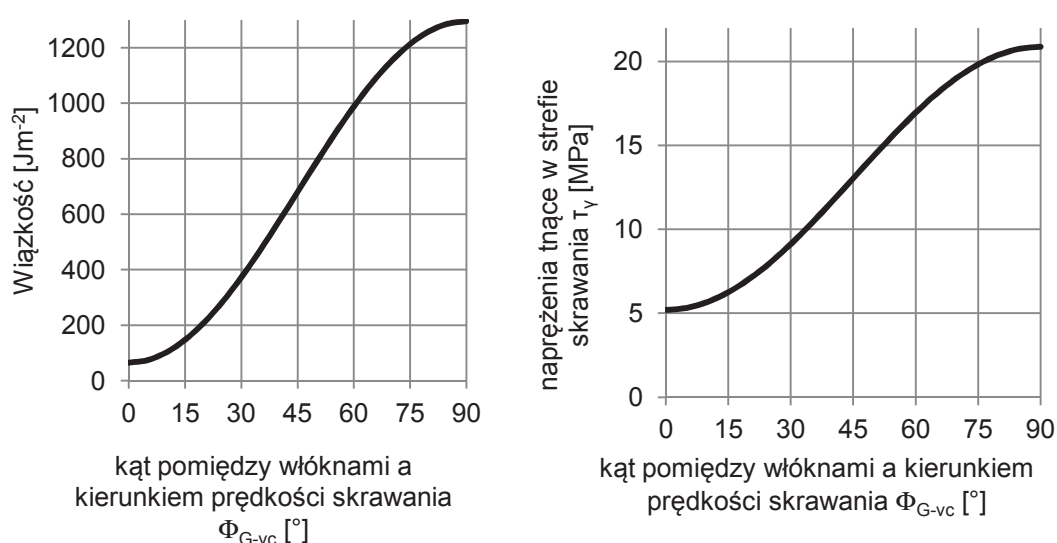
Prognozowane wartości mocy skrawania metodą opierającą się o właściwy opór skrawania zostały wyznaczone za pomocą zależności 4.6, podobnie jak dla pilarki ramowej. Podstawowy opór skrawania określono z zależności 4.7 zaproponowanej przez Manžosa [46] dla pilarek tarczowych. Otrzymane wartości zostały powiększone o współczynnik $k_{MC} = 1,05$, ze względu na przyjęte założenie o wilgotności drewna, dla którego jest przeprowadzana prognoza, na poziomie 30%. Właściwy opór skrawania dla stosowanych wartości grubości warstwy skrawanej (tab. 9.1) wynosił: $k_c = 55,91 \text{ MPa}$ (dla $v_f = 16 \text{ m/min}$) [46].

Tabela 9.2. Właściwości materiałowe z uwzględnieniem kierunku obróbki

Region	$R_{\perp}$	$R_{\parallel}$	$\tau_{y\perp}$	$\tau_{y\parallel}$
	Jm^{-2}	Jm^{-2}	kPa	kPa
A	1295.33	64,77	20861	5200
B	1496.32	74,82	16846	3162,5
C	1267.17	63,36	17986	4400
D	1141.29	51,06	29521	5637,5

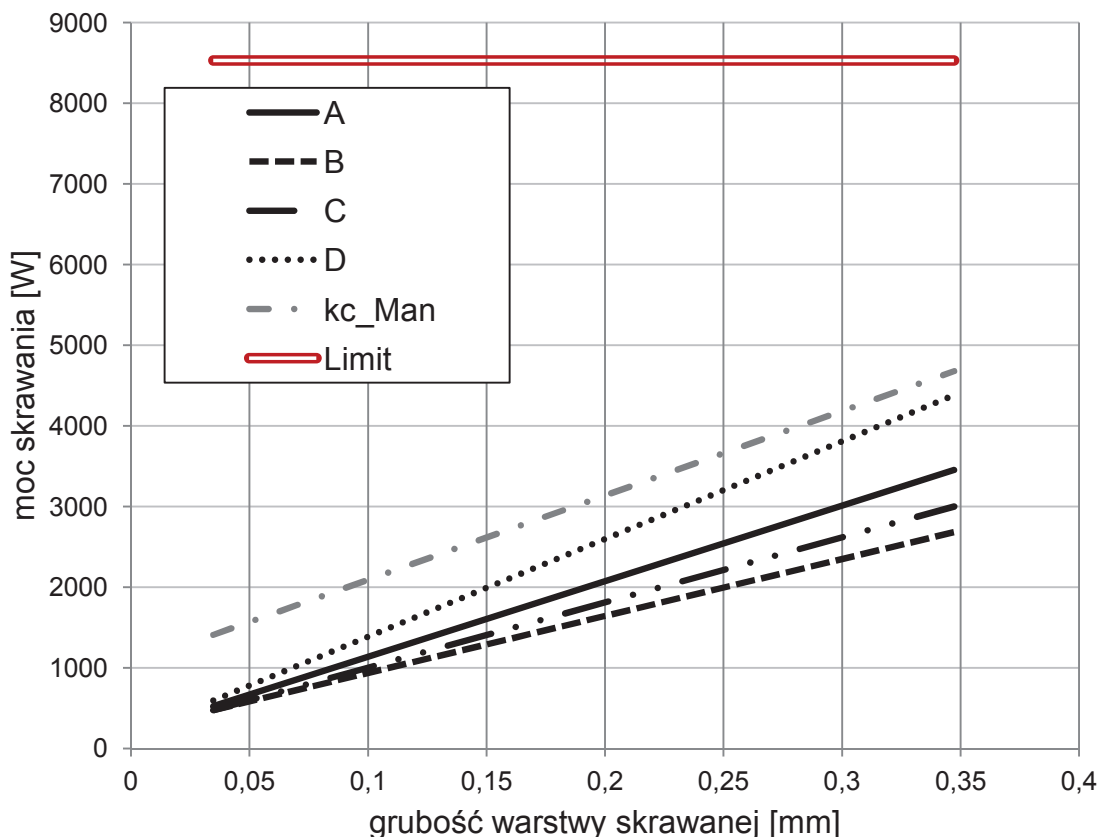
Prognozowane wartości mocy skrawania wyznaczono z zależności 4.21. Podobnie jak dla pilarki ramowej wartości odkształcenia postaciowego γ i współczynnik korekcji tarcia określono w oparciu o wyznaczone wartości kąta ścinania (rozdział 8).

Właściwości reprezentujące materiał w modelu opierającym się na elementach mechaniki pękania, to wiązkość i naprężenia tnące strefie skrawania. Wartości tych właściwości zmieniają się wraz ze zmianą kąta pomiędzy włóknami drewna a prędkością skrawania co przedstawiono na rysunku 9.4 na przykładzie wartości uzyskanych dla drewna sosnowego pochodzącego z Bałtyckiej Krainy Przyrodniczo – Leśnej (A). W procesie cięcia na pilarcie tarczowej skrawania nie odbywa się jedynie w kierunku prostym ($\Phi_{G-vc} = 90^\circ$), tak jak przyjęto na pilarkach ramowych i taśmowych. Dlatego należy uwzględnić zmiany wartości właściwości materiałowych w odniesieniu do kąta pomiędzy włóknami drewna a prędkością skrawania. Na rysunku 9.4 można zaobserwować, że wartości zarówno wiązkości jak i naprężeń tnących w strefie skrawania maleją wraz ze zmniejszającym się kątem Φ_{G-vc} . Można więc wnioskować, że wraz ze zwiększającym się udziałem w procesie przecinania, skrawania wzdłuż włókien, wartości mocy skrawania będą niższe.



Rysunek 9.4. Zmiany właściwości materiałowych w zależności od kąta pomiędzy włóknami drewna a prędkością skrawania, dla drewna pochodzącego z Bałtyckiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (A).

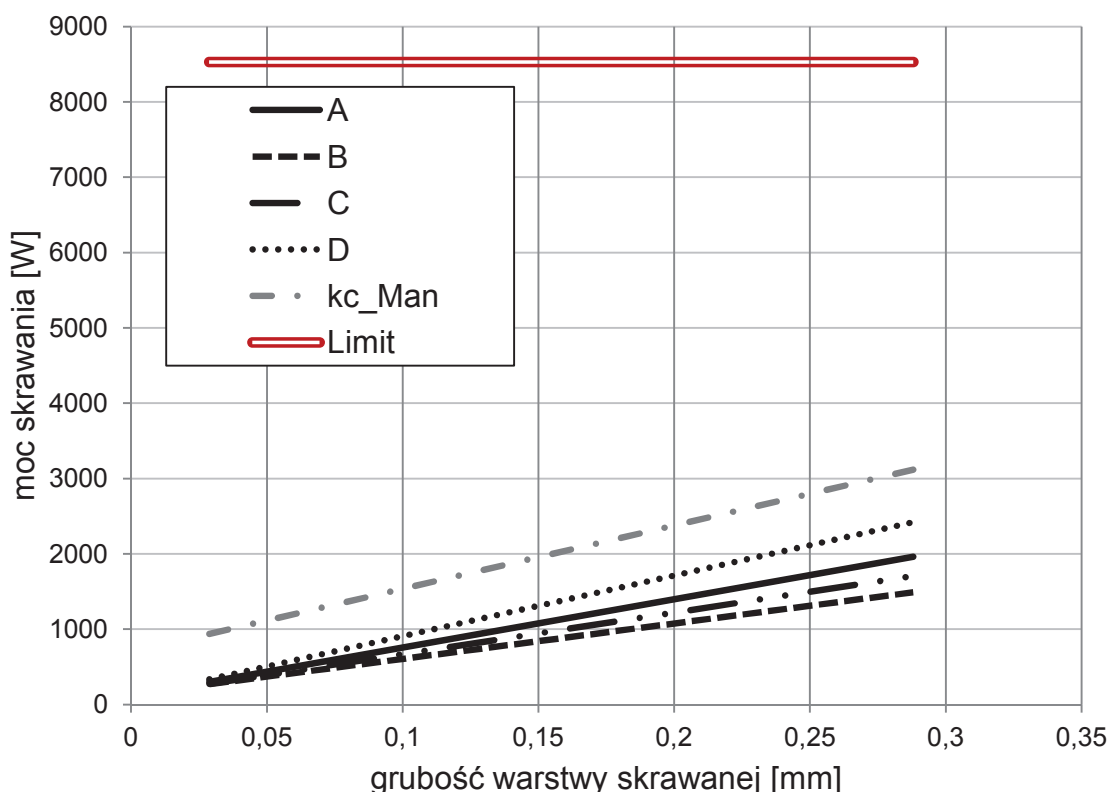
Uzyskane prognozy mocy skrawania otrzymane dla poszczególnych wrzecion pilarki przedstawiono na: rysunek 9.5 dla wrzeciona dolnego, rysunek 9.6 dla wrzeciona górnego.



Rysunek 9.5. Przewidywana moc skrawania przypadająca na jedną piłę dla pilarki tarczowej PWR422, dolne wrzeciono. A, B, C, D – moce wyznaczone wg modelu uwzględniającego mechanikę pęknięcia dla drewna sosnowego pochodzącego z czterech regionów Polski. kc_Man oznacza moc prognozowaną wg klasycznego modelu.

Analizując wykresy 9.5 i 9.6, można zaobserwować, że zarówno dla dolnego jak i górnego wrzeciona, dla danych parametrów obróbki i dla obu modeli prognozowania, występują znaczne rezerwy mocy, które można zagospodarować.

Podobnie jak przy pilarence ramowej, największe wartości prognozowanej mocy skrawania dla obu wrzecion są przypisane dla krainy D, a najmniejsze dla krainy B. Wartości mocy prognozowane metodą klasyczną w oparciu o właściwy opór skrawania są wyższe od wartości prognozowanych metodą uwzględniającą elementy mechaniki pęknięcia. Różnice pomiędzy wartościami uzyskanymi w obu metodach mogą być spowodowane tym, że w metodzie opartej na elementach mechaniki pęknięcia, uwzględnia się zmiany właściwości materiałowych w odniesieniu do kąta pomiędzy prędkością skrawania a kierunkiem włókien drewna Φ_{G-vc} .



Rysunek 9.6. Przewidywana moc skrawana przypadająca na jedną piłę dla pilarki tarczowej PWR422, górne wrzeciono. A, B, C, D – moce wyznaczone wg modelu uwzględniającego mechanikę pęknięcia dla drewna sosnowego pochodzącego z czterech regionów Polski. k_{c_Man} oznacza moc prognozowaną wg klasycznego modelu.

9.3. Pilarka taśmowa ST100R (firmy Stenner, UK)

Pilarki taśmowe, które stonowią trzecią grupę pilarek z tartaku Complex, dla których przeprowadzono określenia zapotrzebowania mocy, były reprezentowane przez pilarkę firmy Stenner ST100R (rys. 9.7). Podobnie jak przy wcześniej omawianych, w tym rozdziale pilarkach, parametry maszyny oraz materiału badanego, na podstawie których zostały przeprowadzone prognozy mocy, przedstawiono w tabelach 9.1 i 8.1.

Wartości prognozowanej mocy skrawania metodą uwzględniającą elementy mechaniki pęknięcia określono przy zastosowaniu równania 4.21. Podobnie jak dla poprzednich przypadków wartości γ i Q_{shear} wyznaczono z zależności 4.16 i 4.17 w oparciu o wartości kąta ścinania określone z równania 4.18 przy zastosowaniu metod numerycznych (rozdział 8).

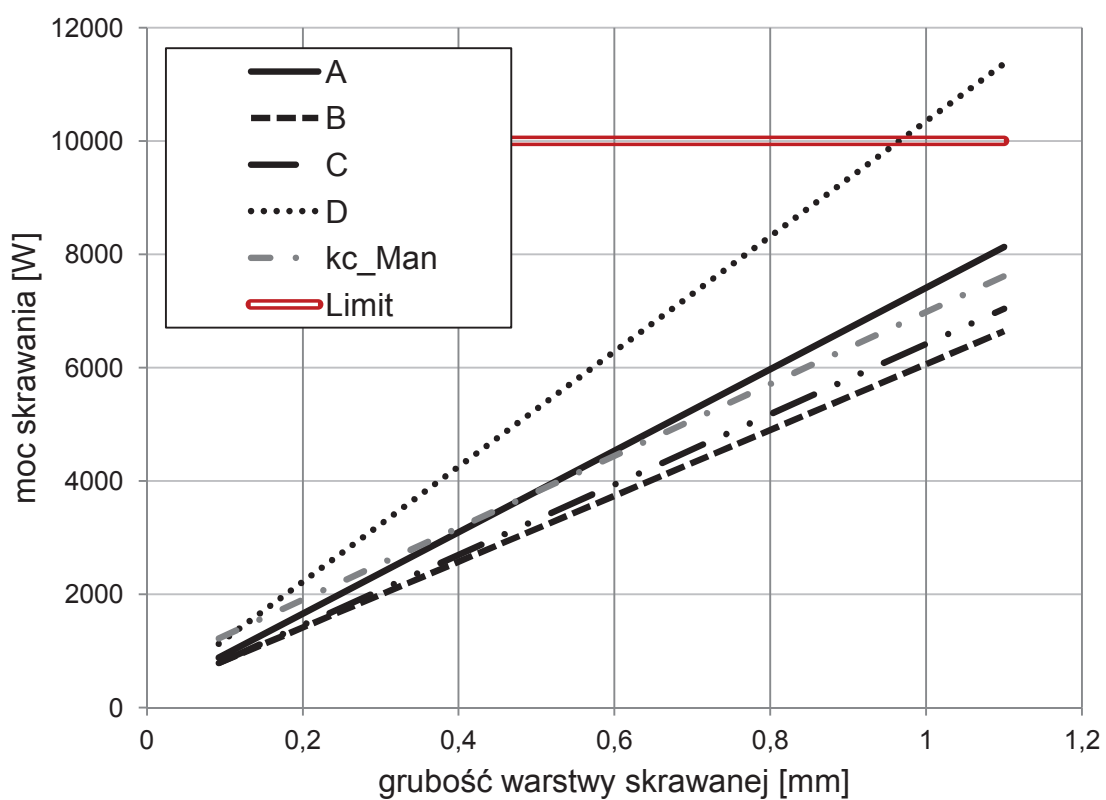
Prognozowanie wartości mocy skrawanej metodą opartą na właściwym oporze skrawania, określano z użyciem zależności 4.6, a właściwy opór skrawania określano z równania (9.1) proponowanego przez Manżosa [46] dla pilarek taśmowych.

$$k_c = 9.91(5.3 + 0.01H_p - 0.03v_f) \quad (9.1)$$

Uzyskane z zależności 9.1 wartości zostały powiększone o współczynnik $k_{vc} = 1,04$ [52, 69], który uwzględnia prędkość skrawania. Wartość oporu skrawania dla przyjętego przypadku (tab. 9.1) wynosiła $k_c = 48.13 \text{ MPa}$.



Rysunek 9.7. Pilarka taśmowa ST100R [97]



Rysunek 9.8. Przewidywana moc skrawania dla pilarki taśmowej ST100R. A, B, C, D – moce wyznaczone wg modelu uwzględniającego mechanikę pęknięcia dla drewna sosnowego pochodzącego z czterech regionów Polski. kc_Man oznacza moc prognozowaną wg klasycznego modelu

Prognozowane wartości mocy skrawania na pilarce taśmowej ST100R (rys. 9.6) zostały przedstawione na rysunku 9.8. Podobnie, jak dla wyżej omawianych pilarek, rozkładają się prognozowane wartości mocy skrawania metodą uwzględniającą elementy mechaniki pękania, dla drewna pochodzącego z różnych regionów Polski. Największe wartości prognozowanej mocy są przypisane dla krainy D, a najmniejsze krainie B.

Wartości mocy skrawania prognozowanej za pomocą metody klasycznej dla tej pilarki są zbliżone do wartości uzyskiwanych metodą uwzględniającą elementy mechaniki pękania. Jedynie prognozy dla drewna pochodzącego z regionu D znacznie odbiegają o prognoz metody klasycznej. Również, prognozy dla drewna pochodzącego z Wielkopolsko-Pomorskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (D) pod koniec zakresu grubości warstwy skrawanej, przekraczają wartości mocy dopuszczalnej.

10. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy zaprezentowano wyniki badań doświadczalnych oraz analiz teoretycznych określania zapotrzebowania mocy skrawania dla drewna sosnowego pochodzącego z różnych krain przyrodniczo leśnych Polski. Wyniki badań empirycznych, przeprowadzanych na wielopółkowej pilarence ramowej PRW15-M, dotyczyły głównie mocy skrawania przy nastawie dwóch prędkości posuwu na ostrze, dla drewna z czterech regionów Polski.

W oparciu o uzyskane wyniki badań doświadczalnych, wyznaczono wartości właściwości materiałowych, czyli naprężenia tnące w strefie skrawania oraz wiązkość. Wspomniane wartości zostały wyznaczone przy zastosowaniu metodyki opisanej w pracach [56, 57], dla drewna sosnowego pochodzącego z wszystkich czterech badanych regionów. Sprawdzono istotność różnic pomiędzy wartościami omawianych właściwości, uzyskanych dla drewna pochodzącego z różnych obszarów Polski.

Wyznaczone z badań skrawalnościowych wartości naprężeń tnących w strefie skrawania i wiązkości, posłużyły do dalszych analiz teoretycznych, którymi były prognozowania mocy skrawania dla trzech rodzajów pilarek oraz parametrów procesu stosowanych w jednym z tartaków firmy Complex. Prognozowanie zapotrzebowania mocy wykonano przy pomocy dwóch metod. Jedną z metod była klasyczna metoda oparta na właściwym oporze skrawania, która nie pozwala na analizę drewna ze względu na region pochodzenia, gdyż uwzględnia jedynie rodzaj gatunku drewna. Drugą metodą było nowatorskie podejście uwzględniające elementy mechaniki pęknięcia. Do tej analizy użyto, wyznaczone doświadczalnie, wartości właściwości drewna z uwzględnieniem jego pochodzenia. Zastosowanie do określania mocy skrawania dwóch metod prognozowania, pozwoliło na porównanie wielkości różnic wartości mocy skrawania otrzymywanych z różnych modeli. Dodatkowo zobrazowano w jakim zakresie zapotrzebowanie na moc skrawania, dla poszczególnych pilarek, przy danych parametrach procesu obróbczego, wyczerpuje możliwości techniczne danej pilarki. Dokonano tego poprzez zestawienia wartości prognozowanych z limitem mocy, którym dysponuje dana pilarka.

Kolejnej analizie poddano również prognozowanie kąta ścinania Φ_c , oraz odkształcenia postaciowego γ . Wartości kąta ścinania zostały określane przy zastosowaniu rozbudowanego równania Atkinsa, które zawiera w sobie wyznaczone doświadczalnie wartości naprężeń tnących w strefie skrawania i wiązkości (element mechaniki pęknięcia). Określanie wartości odkształcenia postaciowego γ , odbywało się już w oparciu o wyznaczony kąt ścinania Φ_c , kąt natarcia γ_f i współczynniki tarcia μ pomiędzy powierzchnią natarcia narzędzia a oddzielonym wiórem.

W oparciu o przeprowadzone badania empiryczne oraz analizy teoretyczne procesu przecinania polskiego drewna sosnowego pochodzącego z czterech krain przyrodniczo-leśnych, można sformułować szereg wniosków poznawczych, użytkowych, jak również wyznaczyć kierunki dalszych badań.

10.1. Wnioski poznawcze

1. Zarejestrowane moce skrawania podczas badań skrawalnościowych na pilarcze ramowej, różnią się w zależności od regionu pochodzenia drewna sosnowego. Najwyższe wartości występują dla drewna pochodzącego z Wielkopolsko-Pomorskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (D), a najniższe z Karpackiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (B). Podobne relacje występują dla prognozowanych mocy skrawania, dla każdej z trzech analizowanych pilarek. Największe wartości występują dla drewna pochodzącego z krainy D, następnie kraina A, kraina C i najmniejsze z krainy B.
2. Występują różnice pomiędzy wyznaczonymi wartościami wiązkości dla badanego drewna z czterech regionów Polski. Pomimo, że różnice wydają się być znaczne (do 350 J/m^2), to nie są one istotne statystycznie.
3. Występują istotne statystycznie różnice pomiędzy wyznaczonymi wartościami naprężeń tnących w strefie skrawania dla drewna sosnowego pochodzącego z czterech krain przyrodniczo-leśnych Polski.
4. Podobne różnice, jak dla prognozowanej mocy skrawania, występują dla prognozowanych wartości kąta ścinania. Również największe wartości kąta występują dla drewna pochodzącego z krainy D, a wartości dla drewna pochodzącego z pozostałych krain odpowiadają kolejnością wartością określonych mocy skrawania, czyli kraina A, kraina C i najmniejsze wartości, kraina B.
5. Zaobserwowano również zależność pomiędzy wartościami wiązkości, a wartościami odkształcenia postaciowego. Podobnie jak przy wymienianych wcześniej relacjach dla mocy skrawania i pozostałych parametrów, wiązkość i odkształcenie postaciowe mają tą samą kolejność jeśli chodzi o wzrost wartości tych właściwości w zależności od regionu pochodzenia drewna. Największe wartości osiągane są dla drewna pochodzącego z krainy B, a najmniejsze dla drewna z krainy D. Jest to kolejność odwrotna jeśli chodzi o różnice występujące dla wartości mocy skrawania.
6. Metoda uwzględniająca elementy mechaniki pęknięcia pozwala na wyznaczenie kąta ścinania dla małych wartości grubości warstwy skrawanej. Jak również pozwala na wyznaczenie wartości tego kąta z uwzględnieniem regionu pochodzenia drewna.

10.2. Wnioski użytkowe

1. Występujące różnice mocy skrawania pomiędzy drewnem tego samego gatunku, pochodzącym z różnych regionów kraju są znaczne. Dzięki tej wiedzy, można zoptymalizować proces przecinania drewna pochodzącego z danego regionu, gdyż różnice w wartościach zapotrzebowania mocy mogą pozwolić na zwiększenie wydajności poprzez np. zwiększenie prędkości posuwu lub zamontowanie dodatkowej piły w sprzęgu.
2. Zaproponowana metoda prognozowania kąta ścinania pozwala na jeszcze dokładniejsze określanie zapotrzebowania mocy skrawania, a szczególnie dla małych

wartości grubości warstwy skrawanej, dla których wartości kąta ścinania zmieniają się znacząco.

10.3. Kierunki dalszych badań

Przeprowadzone badania empiryczne wyznaczania mocy skrawania w procesie przecinania drewna sosnowego pochodzącego z czterech krain przyrodniczo-leśnych, wyznaczania stałych materiałowych dla badanego drewna, jakimi są naprężenia tnące w strefie skrawania i wiązkość oraz analizy teoretycznej prognozowania mocy skrawania, kąta ścinania i odkształcenia postaciowego przy zastosowaniu nowatorskiej metody uwzględniającej elementy mechaniki pęknięcia, nie są wystarczające, aby wyczerpać zagadnienia związane z prognozowaniem mocy skrawania dla procesu przecinania. Należy podkreślić, że choć otrzymane wyniki pozwalają zaobserwować znaczące różnice wartości mocy skrawania dla drewna pochodzącego z różnych regionów, to żeby móc je w pełni wykorzystać, wymaga to przeprowadzenia dalszych badań. Głównymi kierunkami dalszych prac, które mogłyby pomóc rozszerzyć wykorzystanie nowatorskiej metody prognozowania mocy skrawania dla procesu przecinania, mogłyby być następujące:

1. Wyznaczenie z metod skrawalnościowych wartości wiązkości i naprężeń tnących w strefie skrawania dla drewna sosnowego pochodzącego z innych regionów Polski. Pozwoliłoby to dokładnie opisać zróżnicowanie drewna w zależności od regionu pochodzenia.
2. Przeprowadzić badania na innych gatunkach drewna, popularnych w polskim przemyśle drzewnym. Pozwoliłoby to na stworzenie bazy właściwości materiałowych, która umożliwiłaby szybkie prognozowanie mocy skrawania dla danego procesu przecinania.
3. Stworzenie prostego oprogramowania, który w oparciu o metodę uwzględniającą elementy mechaniki pęknięcia pozwoli na szybkie prognozowanie zapotrzebowania mocy w warunkach produkcyjnych.
4. Opracowanie metody wyznaczania wiązkości R i naprężeń tnących w strefie skrawania τ_v w sposób nieniszczący materiału np. przez zastosowanie technologii *NIR* (Near - infrared spectroscopy) [92].

WYKAZ LITERATURY

1. Ashby M.F., Jones D.R.H.: *Materiały inżynierskie. Własności i zastosowanie 1* (*Engineering materials. Properties and applications 1*). Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 1995.
2. Astakhov, V.P.: *Metal Cutting Mechanics*. CRC Press, Boca Raton, 1999.
3. Astakhov V.P.: *On the inadequacy of the single-shear plane model of chip formation*. International Journal of Mechanical Sciences 47 (2005) 1649–1672.
4. Astakhov V.P.: A methodology for practical cutting force evaluation based on the energy spent in the cutting system. Machining Science and Technology, 12 (2008):325–347.
5. Atkins A.G.: *Modelling metal cutting using modern ductile fracture mechanics: quantitative explanations for some longstanding problems*. International Journal of Mechanical Sciences, 45(2003): 373–396.
6. Atkins, A.G.: *Toughness and cutting: a new way of simultaneously determining ductile fracture toughness and strength*. Engineering Fracture Mechanics, 72(2005):849-860.
7. Atkins A.G.: *The science and engineering of cutting. The mechanics and process of separating, scratching and puncturing biomaterials, metals and non-metals*. Butterworth-Heinemann is an imprint of Elsevier, Oxford, 2009.
8. Axelsson B. O. M., Lundberg Å. S., Grönlund A.: *Studies of the main cutting force at and near a cutting edge*. Holz Roh Werkst. (1993) 51(1), 43-48.
9. Aydin S., Yardimci M.Y., Ramyar K.: *Mechanical properties of four timber species commonly used in Turkey*. Turkish J. Eng. Env. Sci., vol. 31(2007) issue 1: 19–27.
10. Bajkowski J.: *Maszyny i urządzenia do obróbki drewna*. Warszawa, Wydawnictwo Szkolne i Pedagogiczne 1997.
11. Beer P.: *Obróbka skrawaniem obwodowym drewna nowo opracowanymi narzędziami*. Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu, Rozprawy Naukowe, Zeszyt 330. Wydawnictwo Akademii Rolniczej im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu, Poznań, 2002.
12. Bjarck A., Dahlquist G., *Metody numeryczne*, Warszawa, PWN, 1987
13. Csanády E., Magoss E.: *Mechanics of Wood Machining*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. (2013) 199 p.
14. Chuchala D., Miszkiewicz K., Orłowski K.A.: *Methods of determining cutting forces during woodcutting*. Ann. WULS-SGGW, Forestry and Wood Technology (2010) 71, 70-74.
15. Chuchala D., Orłowski K., Krzosek S.: *The preparation method of experimental studies of the wood sawing process*, Annals of Warsaw University of Life Sciences. Forestry and Wood Technology, (2011) No 73: 199–202.
16. Chuchala D., Orłowski K.A., Krzosek S.: *The effect of the late wood share upon density of the Polish pine wood as a function of its origin*. Ann. WULS-SGGW, Forestry and Wood Technology (2012) 77, 118-124.
17. Chuchala D., Orłowski K., Pauliny D., Sandak A., Sandak J.: *Is it right to predict cutting forces on the basis of wood density?* In: Proceedings of the 21st International Wood Machining Seminar. 4-7 August 2013, Tsukuba, Japan. pp. 37–45.
18. Chuchala D., Orłowski K., Sandak A., Sandak J., Pauliny D., Baranski J.: *The Effect of Wood Provenance and Density on Cutting Forces While Sawing Scots Pine (Pinus sylvestris L.)*. BioRes. (2014) 9(3), 5349-5361.
19. Chuchala D., Chuchala R., Ochrymiuk T., Orłowski K.: *Methods of solving the Atkins equation determine shear angle with taking into consideration a modern fracture mechanics*. Annals of Warsaw University of Life Sciences. Forestry and Wood Technology, (2014) No 85: 31–35.

20. Cristovao L., Broman O., Ekevad M., Grönlund A., Siteo R.: *Main cutting force model for two species of tropical wood*. Wood Material Science and Engineering (2011), 7(3), 143-149.
21. Cristovao L., Ekevad M., Grönlund A.: *Industrial Sawing of Pinus sylvestris L.: Power Consumption*. BioRes. (2013), 8(4), 6044-6053.
22. Dmochowski J.: *Podstawy obróbki skrawaniem*. PWN, Warszawa, 1981.
23. Dziewanowski R.: *Zarys rejonizacji jakościowej sosnowego drewna tartaczego w Polsce*. Prace Instytutu Technologii Drewna, rok XIV, zeszyt 4 (44), s. 5-24, Poznań 1967.
24. Fischer R.: *Micro processes at cutting edge – some basics of machining wood*. W: Proceedings of the 2nd International Symposium on Wood Machining, Vienna, Austria, 2004. pp. 191–202.
25. Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J., *Metody numeryczne*, WNT, Warszawa, 1995
26. FPL (Forest Products Laboratory), 1980: *Structure of Wood. Research Note*, March. FPL-04, United States Department of Agriculture Forest Service.
27. Franz, N.C.: *An Analysis of the Wood-cutting Process*. The University of Michigan Press, Ann Arbor 1958.
28. Glass, S.V.; Zelinka, S.L.: *Moisture Relations and Physical Properties of Wood (Chapter 4)*. In: Wood Handbook – Wood as an Engineering Material (Centennial Edition). General Technical Report FPL-GTR-190. Madison (2010), WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory. 508 p. http://www.fpl.fs.fed.us/documnts/fplgtr/fpl_gtr190.pdf
29. Godziszewski J.: *Zasady planowania doświadczeń i opracowywania wyników pomiarów*. Kraków : Wydawnictwo AGH, 1987.
30. Goli, G., Wyeth, D., Atkins, A.G., Jeronimidis, G., Fioravanti, M., Del Taglia, A.: *Chip formation in wood cutting with different grain orientations using high and low cutting speeds*. In: Proceedings of the 8th Associazione Italiana di Tecnologia Meccanica conference, Montecatini (2007b), Italy. pp. 57–58.
31. Górski J.: *Proces cięcia drewna elektryczną pilarką łańcuchową*. SGGW, Katedra Mechanicznej Obróbki Drewna. Rozprawy Naukowe i Monografie, Wydawnictwo SGGW, 2001.
32. Green D.W., Winandy J.E., Kretschmann D.E.: *Mechanical Properties of Wood (Chapter 4)*. W: Wood handbook—Wood as an engineering material. Forest Products Laboratory. Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-113. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 1999.
33. Grotte K.H., Antonsson E.K.: *Machining Processes*. W: Springer Handbook of Mechanical Engineering, Part B: Applications in Mechanical Engineering. Springer, 2008: 606–656.
34. Grzesik W., *Podstawy skrawania materiałów konstrukcyjnych*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2010.
35. Javorek L., *Tools*, Technical University in Zvolen, Zvolen 2015
36. Jeronimidis G.: *The fracture behaviour of wood and the relations between toughness and morphology*. Proc. R. S. Lond. (1980) B 208, 447–460.
37. Kivimaa E.: *Cutting force in wood-working*, The State Institute for Technical Research, Publication No. 18, Helsinki (1950).
38. Krzosek S., Grześkiewicz M., Bacher M.: *Mechanical properties of Polish-grown Pinus sylvestris L. structural sawn timber*. In: End user's needs for wood material and products. COST E53 conference proceedings, 29th-30th of October 2008 Delft, The Netherlands (Eds. Gard W. F., van de Kuilen J. W. G.). - Delft : Delft University of Technology, 2008: 253–260.

39. Krzosek S.: *Wytrzymałościowe sortowanie polskiej sosnowej tarcicy konstrukcyjnej różnymi metodami*. Wydawnictwo SGGW, Warszawa, 2009, 127 p.
40. Krzosek S.: *Timber strength grading of Pinus Sylvestris L. using a visual method according to Polish Standard PN-82/D-94021 and German Standard DIN 4074*. Wood Research, Vol. 56(2011), Issue: 3: 435–440.
41. Krzysik F., *Nauka o drewnie*. PWN, Warszawa, 1974.
42. Kukielka L., *Podstawy badań inżynierskich*. PWN, Warszawa 2002.
43. Laternser R., Gänser H-P., Taenzer L., Hartmaier A.: *Chip formation in cellular materials*. Transactions of the ASME. Vol. 125, January 2003: 44–49.
44. Leśnik, LasyRej_20130110. *Obsługa drewna kłodowanego*. Podręcznik użytkownika. System Informatyczny Lasów Państwowych. Lasy Państwowe. Warszawa 2013, styczeń. 21 p.
45. Merchant M.E.: *Basics mechanics of metal cutting process*. Trans. ASME Journal of Applied mechanics Phys. (1945), 16:267–318
46. Manžos F.M.: *Derevorežušie stanki*, Izdatel'stvo Lesnaâ Promyšlennost', Moskva, 1974.
47. McKenzie, W.M.: *Fundamental analysis of the wood-cutting process*. PhD thesis, University of Michigan (1961), MI, USA.
48. Mechanik. Poradnik techniczny. Tom III, Część 3. Państwowe Wydawnictwo Techniczne, Warszawa 1956.
49. Naylor A., Hackney P.: *A review of wood machining literature with a special focus on sawing*. BioRes. (2013) 8(2), 3122-3135.
50. Nikiel G.: *Opracowanie statystyczne wyników badań doświadczalnych z wykorzystaniem programu ReGreg*. Opracowanie niepublikowane, Bielsko - Biała 2001.
51. Olszak W., (2008) *Obróbka skrawaniem*. (In Polish: Machininig) Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
52. Orlicz T., *Obróbka drewna narzędziami tnącymi*, Skrypty SGGW-AR w Warszawie, Wydawnictwo SGGW-AR, Warszawa, 1988.
53. Orłowski K. : *Materiałoszczędne i dokładne przecinanie drewna piłami*. Monografia 40, Gdańsk. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 2003.
54. Orłowski K. A.: *Experimental analysis of forces while cutting on frame sawing machines*. W: COST Action E35 /European Cooperation in the Field of Scientific and Technical Research, Rosenheim, Germany, 29-30 September 2005
55. Orłowski K.: *Experimental studies on specific cutting resistance while cutting with narrow-kerf saws*. Advances in Manufacturing Science and Technology (2007). 31(1): 49–63.
56. Orłowski K. A., Atkins A.: *Determination of the cutting power of the sawing process using both preliminary sawing data and modern fracture mechanics*. pp. 171–174. In: Navi, P., Guidoum, A. (Eds.) Proc. of the Third Inter. Symposium on Wood Machining. Fracture Mechanics and Micromechanics of Wood and Wood Composites with regard to Wood Machining. (2007), 21–23 May, Lausanne, Switzerland. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne.
57. Orłowski K.A., Pałubicki B.: *Recent progress in research on the cutting process of wood*. A review COST Action E35 2004–2008: Wood machining – micromechanics and fracture. Holzforschung, 63(2009): 181–185.
58. Orłowski K.A.: *The fundamentals of narrow-kerf sawing: the mechanics and quality of cutting*. Technical University in Zvolen, Publishing house of the Technical University in Zvolen. 2010.
59. Orłowski K.A., Ochrymiuk T.: *Sposób prognozowania kąta ścinania w strefie skrawania przy przecinaniu drewna*. W: *Obróbka Skrawaniem: Współczesne problemy*. Szkoła

- Obróbki Skrawaniem, nr 4, B. Kruszyński (red.). Łódź : Politechnika Łódzka, 2010: 449–456.
60. Orłowski K.A., Ochrymiuk T.: *Prognozowanie mocy skrawania przy przecinaniu drewna na pilarkach o prostoliniowej trajektorii ruchu pił*. W: Obróbka skrawaniem: nauka a przemysł. (pod red. W. Grzesika). Opole, Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, 2011. (Szkoła Obróbki Skrawaniem, nr 5), 517–525.
 61. Orłowski K.A., Ochrymiuk T., Chuchala D.: *Prognozowanie mocy skrawania przy przecinaniu polskiego drewna sosnowego na pilarkach tarczowych*. Mechanik, 2012, nr 8–9, 661–663 (Artykuł na płycie CD dołączonej do czasopisma).
 62. Orłowski K., Chuchala D.: *The effect of the late wood share in the annual ring growth on the cutting power*. Trieskove a beztrieskove obrabanie dreva , 8 (1): 267-272, Zvolen 2012.
 63. Orłowski K. A., Ochrymiuk T., Chuchala D. (2012). *On some approaches to cutting power estimation while wood sawing*. Ann. WULS-SGGW, Forestry and Wood Technology 79, 129-134.
 64. Orłowski K.A., Ochrymiuk T., Atkins A., Chuchala D., *Application of fracture mechanics for energetic effects predictions while wood sawing*. Wood Sci Technol, 47(2013)5, 949–963 (Open access).
 65. Orłowski K. A., Ochrymiuk T. (2014). *Fracture mechanics model of cutting power versus widespread regression equations while wood sawing with circular saw blades*. Ann. WULS-SGGW, Forestry and Wood Technology 85, 168-174.
 66. Pantea R.C., *Wood cutting system: modelling and process simulation*. Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures de l'université Laval pour l'obtention du grade de maître ès science (M.Sc.). Département de génie mécanique FACULTÉ DES SCIENCES ET DE GENIE, UNIVERSITÉ LAVAL, 1999, (National Library of Canada).
 67. Porankiewicz B., Axelsson B., Grönlund A., Marklund B.: *Main and normal cutting forces by machining wood of Pinus sylvestris*. BioRes. (2011) 6(4), 3687-3713.
 68. Scholz F., Duss R., Hasslinger R., Ratnasingam J.: *Integrated model for the prediction of cutting forces*. pp. 183–190. In: Handong Zhou, Nanfeng Zhu, Tao Ding (Eds.) Proc. of 19th International Wood Machining Seminar., (2009) October 21–23, Nanjing, China, Nanjing Forestry University.
 69. Staniszevska A., Zakrzewski W.: *Obróbka cięciem*. Poznań, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, 2010
 70. Staniszevski J., Boratyński M.: *Obróbka i obrabiarki do drewna*. Część 7, Wybrane zagadnienia z podstaw konstrukcji obrabiarek do drewna. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu. Poznań, 1990.
 71. Stanzl-Tschegg S.E., Navi P.: *Fracture behaviour of wood and its composites*. A Review Selected articles from the COST Action E35: Wood machining – micromechanics and fracture. Holzforschung, **63**(2009):139–149.
 72. Stewart, H.A.: *Chip formation when orthogonally cutting wood against the grain*. Wood Sci. (1971) 3:193–203.
 73. Stewart, H.A.: *A model for predicting wood failure with respect to grain angle in orthogonal cutting*. Wood Fiber Sci. (1983) 15:317–325.
 74. Time, J.: *Soprotivlene Metallov i Dereva Rezanii*, (Cutting resistance of metals and wood), Dermacow Press House, St. Petersburg, Russia, 1870.
 75. Walkowiak T.: *Metoda oceny dokładności położenia ostrzy pił tarczowych w procesie przecinania materiałów drzewnych na podstawie warunków skrawania*. Praca doktorska. Politechnika Gdańska, 2009.
 76. Wasielewski R.: *Pilarki ramowe z eliptyczną trajektorią prowadzenia pił i hybrydowym wyrównoważonym dynamicznie układem napędu głównego*. Monografia nr 10. Gdańsk, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej 1999

77. Wasielewski R., Orlowski K.: *Hybrid dynamically balanced saw frame drive*. *Holz als Roh- und Werkstoff*, (2002) **60**: 202-206.
78. Wasielewski R.: *Parameters of entry and going out of saw blade teeth during cutting with circular saw*. *Ann. Warsaw Agric. Univ. 2003 For. and Wood Technol.* nr. 53, 2003.
79. Wasielewski R., Orlowski K., Szyszkowski S.: *Proekologiczne przecinanie drewna piłami tarczowymi*. W : *Obróbka Skrawaniem Nauka a Przemysł / pod red. Wita Grzesika*. - Wrocław / Opole : Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, 2011. - (Szkola Obróbki Skrawaniem, nr 5). - S. 533–540 : 5 rys. - Bibliogr. 6 poz. - ISBN 978-83-61101-10-9
80. Wasielewski R.: *Dokładne i oszczędne przecinanie drewna piłami tarczowymi*. - Gdańsk : Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, 2011. - S. 1-154 : 133 rys. - Bibliogr. 122 poz. - ISBN 978-83-7348-390-3
81. Williams J. G.: *Friction and plasticity effects in wedge splitting and cutting fracture tests*. *J of Materials Science* (1998) **33**:5351 – 5357. doi: 10.1023/A:1004490015211.
82. Williams J.G., Patel Y., Blackman B.R.K.: *A fracture mechanics analysis of cutting and machining*. *Engineering Fracture Mechanics* **77**, Issue 2 (2010): 293–308.
83. Woodson G.E., Koch P.: *Tool forces and chip formation in orthogonal cutting of Loblolly Pine*. U .S . Department of Agriculture. Forest Service Research Paper SO-52. 1970.
84. Wyeth, D. J., Goli, G., & Atkins, A. G.: *Fracture toughness, chip types and the mechanics of cutting wood*. A review COST Action E35 2004–2008: Wood machining – micromechanics and fracture (2009). *Holzforschung*, 63 (2), 168-180. DOI: 10.1515/HF.2009.017.
85. PN-92/M-01002/04. *Podstawowe pojęcia w obróbce wiórowej i ścierniej. Siły, energia i moc*.
86. Opracowanie nr U-233/BE/2014. *Stałe monitorowanie zmian w polskim sektorze leśno-drzewnym według standardów Komitetu Leśnictwa i Przemysłu Drzewnego EKG ONZ*. Ministerstwo Środowiska, Departament Leśnictwa i Ochrony Przyrody. INSTYTUT TECHNOLOGII DREWNA, Poznań, październik 2014.
87. *Polska. Raport o stanie gospodarki i rynku drzewnego*. Europejska Komisja Gospodarcza. Komitet Drzewny. Sesja nr 66. Ministerstwo Środowiska. Październik 2008.
88. *Ustawa o lasach z dnia 28 września 1991*. Dz.U. 1991 nr 101 poz.444
89. http://www.woodproductsonlineexpo.com/content.php/678/2173/wood_products_gang_edger_calculator.html (dostęp, październik 2014)
90. http://www.woodproductsonlineexpo.com/content.php/677/2160/wood_products_bandmill_calculator.html (dostęp, październik 2014)
91. <http://www.solidnydom.pl/sposoby-przetarcia-drewna.html> (dostęp, wrzesień 2015)
92. <https://www.impublications.com/content/introduction-near-infrared-nir-spectroscopy> (dostęp, wrzesień 2015)
93. <http://www.ciop.pl/5907.html> (dostęp, wrzesień 2014)
94. <http://www.ciop.pl/22225> (dostęp, wrzesień 2014)
95. http://www.tanel.com.pl/download/wrd100_manual_PL.pdf (dostęp, wrzesień 2014)
96. <http://www.tos.cz/indexan.php?stranka=rozpily3> (dostęp, wrzesień 2015)
97. <http://www.wadkin.com/products/view/241> (dostęp, wrzesień 2015)
98. <http://www.p-aspi.pl/z-ostrzami-stellitowanymi/> (dostęp, wrzesień 2015)
99. <http://www.p-aspi.pl/chromowane/> (dostęp, wrzesień 2015)
100. <http://www.p-aspi.pl/do-rozwierania/> (dostęp, wrzesień 2015)

101. <http://www.nel-tech.pl/piy-trakowe-pionowe/pily-zgrubiane>
(dostęp, wrzesień 2015)
102. <http://www.nel-tech.pl/piy-trakowe-pionowe/pily-chromowane>
(dostęp, wrzesień 2015)
103. <http://www.nel-tech.pl/piy-trakowe-pionowe/pily-stellitowane>
(dostęp, wrzesień 2015)
104. http://www.ewd.de/fileadmin/user_upload/images/Gatter-Technologie/600-mm-Hub/GDZGE/EWD_GDZGE_EN_web.pdf (dostęp, wrzesień 2015)
105. http://www.ewd.de/fileadmin/user_upload/images/Gatter-Technologie/700-mm-Hub/HDSN/EWD_HDSN_EN_web.pdf (dostęp, wrzesień 2015)
106. <http://www.fod.com.pl/produkty-11-24> (dostęp, wrzesień 2015)
107. http://www.ewd.de/fileadmin/user_upload/images/Bandsaege-Technologie/Blockband/01_PDF_Broschuere/EWD_FlexiLine_Prospekt_GB_2013_smaII.pdf (dostęp, wrzesień 2015)
108. <http://fod.com.pl/produkty-52-59-61> (dostęp, wrzesień 2015)
109. <http://217.199.187.72/stenner.co.uk/wp/wp-content/uploads/2015/04/High-Speed-Horizontal-Resaw.pdf> (dostęp, wrzesień 2015)
110. <http://www.fod.com.pl/produkty-13-47> (dostęp, wrzesień 2015)
111. http://www.ewd.de/fileadmin/user_upload/images/Kreissaege-u-Profilier-Technologie/EWD_BNK_EN_web.pdf (dostęp, wrzesień 2015)
112. <http://stellite.co.uk/Portals/0/Stellite%206%20Final.pdf> (dostęp, wrzesień 2015)
113. <http://www.awax-dia.com.pl/produkty/pily/> (dostęp, wrzesień 2015)
114. https://www.punta.com.pl/sklep,1809,pily_diamentowe_art_dsa
(dostęp, wrzesień 2015)
115. <http://www.rigp.pl/node/742> (dostęp, wrzesień 2015)

WYKAZ RYSUNKÓW

- Rysunek 2.1. Trak ramowy DTRB-63 (firmy FOD, PL) w Tartaku "Complex" w Dziemianach
- Rysunek 2.2. Schemat działania tradycyjnego traka pionowego
- Rysunek 2.3. Kinematyka przecinania na pilarce ramowej
- Rysunek 2.4. Pilarka taśmowa ST100R firmy Stenner w Tartaku "Complex" w Dziemianach
- Rysunek 2.5. Schemat skrawania na pilarce taśmowej
- Rysunek 2.6. Pilarka tarczowa PRW 422 (firmy TOS Svitavy) w Tartaku "Complex" w Dziemianach
- Rysunek 2.7. Schemat działania pilarki tarczowej dwuwrzecionowej
- Rysunek 2.8. Kinematyka przecinania na pilarce tarczowej
- Rysunek 2.9. Warianty kinematyczne przecinania piła tarczową
- Rysunek 3.1. Parametry wpływające na wartości sił skrawania
- Rysunek 3.2. Obciążenia zewnętrzne piły podczas skrawania
- Rysunek 3.3. Siły skrawania związane z kierunkiem ruchu głównego przypadające na jeden ząb piły
- Rysunek 3.4. Uproszczony model procesu skrawania wraz z kołem Merchanta
- Rysunek 3.5. Struktura wióra podczas skrawania wzdłuż włókien (według Time)
- Rysunek 3.6. Struktura wióra podczas skrawania stycznie do włókien (według Time)
- Rysunek 3.7. Struktura wióra podczas skrawania prostopadłego do włókien (według Time)
- Rysunek 3.8. Wiór typu I według klasyfikacji Franza
- Rysunek 3.9. Wiór typu II według klasyfikacji Franza
- Rysunek 3.10. Wiór typu III według klasyfikacji Franza
- Rysunek 3.11. Wiór typu I-a według klasyfikacji McKenzie
- Rysunek 3.12. Wiór typu I-b według klasyfikacji McKenzie
- Rysunek 3.13. Wiór typu II-a według klasyfikacji McKenzie
- Rysunek 3.14. Wiór typu II-b według klasyfikacji McKenzie
- Rysunek 3.15. Kierunki skrawania drewna podczas badań Woodsona i Kocha
- Rysunek 3.16. Fornir ciągły powstający podczas skrawania w kierunku 0 – 90 sosny Loblolly w stanie mokrym
- Rysunek 3.17. Uszkodzenia ciągłości forniru podczas skrawania w kierunku 0 – 90 sosny Loblolly o poziomie wilgotności 7%
- Rysunek 4.1. Zasadnicze położenia krawędzi skrawającej i kąty kierunkowe definiującej jej położenie
- Rysunek 4.2. Wybrane elementy geometrii ostrzy piły o rozwarciu zgrubiałym
- Rysunek 4.3. Moc skrawania podczas przecinania na pilarce ramowej w cyklu
- Rysunek 6.1. Rozmieszczenie w Polsce krain przyrodniczo-leśnych z których pochodzą badane tarcice sosnowe
- Rysunek 6.2. Pilarka ramowa PRW15M
- Rysunek 6.3. Zdjęcie przedstawiające ramę piłową pilarki PRW-15M
- Rysunek 6.4. Układ odsysający trociny
- Rysunek 6.5. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego

- Rysunek 6.6. Charakterystyczne wymiary pił użytych w badaniach przecierania polskiego drewna sosnowego
- Rysunek 6.7. Widok na panel pomiarowy programu AnalizaDAQ na komputerze stanowiskowym.
- Rysunek 6.8. Przykładowy zarejestrowany przebieg mocy skrawania w odniesieniu do badanej próbki z Krainy A
- Rysunek 7.1. Moc skrawania na jedną piłę w funkcji posuwu na ostrze (grubości warstwy skrawanej) podczas przecinania na pilarce ramowej PRW15M polskiego drewna sosnowego pochodzącego z Bałtyckiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (linie przerywane dotyczą obszaru zmienności dla prawdopodobieństwa 95%)
- Rysunek 7.2. Moc skrawania na jedną piłę w funkcji posuwu na ostrze (grubości warstwy skrawanej) podczas przecinania na pilarce ramowej PRW15M polskiego drewna sosnowego pochodzącego z Karpackiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (linie przerywane dotyczą obszaru zmienności dla prawdopodobieństwa 95%)
- Rysunek 7.3. Moc skrawania na jedną piłę w funkcji posuwu na ostrze (grubości warstwy skrawanej) podczas przecinania na pilarce ramowej PRW15M polskiego drewna sosnowego pochodzącego z Małopolskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (linie przerywane dotyczą obszaru zmienności dla prawdopodobieństwa 95%)
- Rysunek 7.4. Moc skrawania na jedną piłę w funkcji posuwu na ostrze (grubości warstwy skrawanej) podczas przecinania na pilarce ramowej PRW15M polskiego drewna sosnowego pochodzącego z Wielkopolsko-Pomorskiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (linie przerywane dotyczą obszaru zmienności dla prawdopodobieństwa 95%)
- Rysunek 7.5. Wartości średnie wiązkości drewna sosnowego wraz z rozrzutami
- Rysunek 7.6. Wartości średnie naprężeń tnących w strefie ścinania drewna sosnowego wraz z rozrzutami
- Rysunek 8.1. Układ sił opracowany przez Ernsta i Merchanta
- Rysunek 8.2. Główne pozycje krawędzi skrawającej i kierunki prędkości skrawania
- Rysunek 8.3. Aplikacja w środowisku JAVA wyznaczająca wartość kąta ścinania z zależności proponowanej przez Atkinsa w oparciu o metody iteracyjne
- Rysunek 8.4. Porównanie prognozowanych wartości kąta ścinania Φ_c dla drewna sosnowego różnych regionów Polski, uzyskanych z użyciem modelu zawierającego pracę rozdzielania materiału oraz pracę tarcia na powierzchni natarcia w funkcji grubości warstwy skrawanej h (f_z)
- Rysunek 8.5. Porównanie prognozowanych wartości odkształcenia postaciowego γ dla drewna sosnowego różnych regionów Polski w funkcji grubości warstwy skrawanej h (f_z)
- Rysunek 9.1. Pilarka ramowa DTRB-63 (a), zastosowany wzór piłowania (b)
- Rysunek 9.2. Przewidywana moc skrawana przypadająca na jedną piłę dla pilarki ramowej DTRB 63
- Rysunek 9.3. Dwuwrzecionowa pilarka tarczowa PWR422
- Rysunek 9.4. Zmiany właściwości materiałowych w zależności od kąta pomiędzy włóknami drewna a prędkością skrawania, dla drewna pochodzącego z Bałtyckiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej (A).
- Rysunek 9.5. Przewidywana moc skrawana przypadająca na jedną piłę dla pilarki tarczowej PWR422, górne wrzeciono
- Rysunek 9.6. Przewidywana moc skrawana przypadająca na jedną piłę dla pilarki tarczowej PWR422, dolne wrzeciono
- Rysunek 9.7. Pilarka taśmowa ST100R
- Rysunek 9.8. Przewidywana moc skrawana dla pilarki taśmowej ST100R

WYKAZ TABEL

Tabela 3.1. Rodzaje wiórów według klasyfikacji Franza zaobserwowane w badaniach Woodsona i Kocha

Tabela 3.2. Rodzaje wiórów według klasyfikacji McKenzie zaobserwowane w badaniach Woodsona i Kocha

Tabela 6.1. Pochodzenie materiału badawczego

Tabela 6.2. Najważniejsze dane techniczne pilarki PRW15M

Tabela 6.3. Wymiary przekrojów poprzecznych próbek z drewna sosnowego pochodzącego z czterech krain przyrodniczo-leśnych

Tabela 6.4. Wymiary pił stosowanych w badaniach doświadczalnych

Tabela 7.1. Wartości wiązkości dla drewna sosnowego z różnych regionów Polski

Tabela 7.2. Wartości naprężenia tnące w strefie skrawania τ_y dla drewna sosnowego z różnych regionów Polski

Tabela 7.3. Istotność różnic wartości średnich wiązkości drewna sosnowego pochodzącego z czterech regionów Polski

Tabela 7.4. Istotność różnic wartości średnich naprężeń tnących w strefie ścinania drewna sosnowego pochodzącego z czterech regionów Polski

Tabela 8.1. Gęstość, wiązkość, naprężenia tnące w strefie skrawania, wytrzymałość na zginanie statyczne drewna sosnowego w funkcji regionu pochodzenia

Tabela 9.1. Dane maszyn i narzędzi

Tabela 9.2. Właściwości materiałowe z uwzględnieniem kierunku obróbki

Dodatek A: Rozwiązywanie równań nieliniowych

Metoda Newtona – Raphsona

Metoda Newtona jest jednym z iteracyjnych rozwiązań problemu znajdowania pierwiastków równania nieliniowego. Pierwiastki są określane w sposób przybliżony, co jest charakterystyczną cechą wszystkich metod iteracyjnych, pokrewnych metodzie Newtona – Raphsona, znanej także pod nazwą metody stycznych. Metoda ta opiera się na fakcie, iż funkcja $F(t)$ spełnia w zadanym przedziale $[a, b]$ następujące warunki [A1 - A6]:

- jest ciągła i jej pierwsza pochodna jest również ciągła,

$$F(t) \in C^0 \cap C^1 \quad (\text{A-1})$$

- znaki wartości funkcji w granicach przedziałów są różne,

$$F(a) \cdot F(b) < 0 \quad (\text{A-2})$$

- znak pierwszej i drugiej pochodnej w zadanym przedziale się nie zmienia, co oznacza brak ekstremów funkcji $F(t)$ oraz zmian wypukłości,

$$F'(a) \cdot F'(b) > 0, F''(a) \cdot F''(b) > 0 \quad (\text{A-3})$$

- dodatkowo przedział nie powinien być szerszy niż pewna zadana wartość,

$$|a - b| \leq d \quad (\text{A-4})$$

Powyższe warunki dotyczą wszystkich iteracyjnych metod wyznaczania pierwiastków równań nieliniowych.

Warunek (A-1) jest konieczny do zapewnienia zbieżności metody. Gdy funkcja nie jest ciągła oznacza to, że wewnątrz zadanego przedziału istnieją takie argumenty funkcji, dla których jej pochodna może być zerowa. Należy oczywiście rozróżnić kwestie nieciągłości samej funkcji i jej pochodnej. Gdy nie jest spełniony warunek przynależności do klasy C^0 funkcja może w przedziale $[a, b]$ dla pewnej wartości t , dążyć do nieskończoności [A1 - A6].

W przypadku warunku (A-2) jest on konieczny aby w przedziale mogło istnieć przynajmniej jedno miejsce zerowe. Jednakże, gdy warunek nie jest spełniony nie oznacza to jednoznacznie, iż w przedziale $[a, b]$ nie ma żadnych zer równania. Taka sytuacja może zachodzić np. w kontekście funkcji kwadratowej. Zbyt szeroki przedział może obejmować obydwa rozwiązania równania. Taki przedział byłby uznany za nieprawidłowy z powodu dodatniego znaku iloczynu (A-2). Problem ten jest związany z obecnością wewnątrz zadanego przedziału ekstremum funkcji $F(t)$ [A1 - A6].

Warunek (A-3) opisuje sytuację obecności w przedziale poszukiwań ekstremów lokalnych funkcji $F(t)$. Ich obecność może równocześnie wskazywać, iż wewnątrz zadanego przedziału jest więcej niż jedno miejsce zerowe funkcji. Taka sytuacja może zaistnieć gdy mówimy o poszukiwaniu zer funkcji sześcienniej (wielomianu stopnia 3). Mimo spełnienia warunków (A-1) i (A-2) dla pewnych przedziałów warunek (A-3) nie będzie spełniony. W efekcie znajdować się w nim mogą wszystkie t dla których funkcja się zeruje. Oznacza to, iż nie można zapewnić w takiej sytuacji zbieżności metody w skończonym czasie [A1 - A6].

Warunek (A-4) dotyczy długości przedziału poszukiwań zera funkcji i w przypadku metody Newtona – Raphsona odnosi się on do określenia optymalnego położenia punktu początkowego poszukiwań, dodatkowo kładąc nacisk na spełnienie pozostałych warunków. Według warunku (A-4) wartość przyjmowana jako szerokość przedziału powinna być określana na podstawie tego jak zachowuje się funkcja w okolicach punktu początkowego przedziału a . Tym samym końcowa granica przedziału poszukiwań miejsc zerowych może być określona wzorem:

$$b = a + d \quad (\text{A-5})$$

Wartość współczynnika d może być tutaj otrzymywana jako dt dla funkcji $F(t)$ biorąc ją z przybliżenia wartości pochodnej:

$$F' = \frac{dF}{dt} \quad (\text{A-6})$$

przyjmując $dF = 1$. W takiej sytuacji wartość a można wyznaczyć dokonując szeregu prób dla różnych kandydatów, sprawdzając dla których z nich wartość funkcji dla (A-5) spełnia warunek (A-1) wraz z $F(a)$. Należy tutaj zauważyć, iż takie rozumowanie samo z siebie może być traktowane jako metoda wykrycia zer funkcji, zakładając że wartość dF będzie w każdym kroku podlegała zmianom [A1 - A6].

Metoda Newtona opiera się na rozkładzie funkcji $F(t)$ dla określonej wartości argumentu t_0 na szereg Taylora:

$$F(t) = F(t_0) + \left. \frac{dF}{dt} \right|_{t_0} (t - t_0) + r(t, t_0), t \in R \quad (\text{A-7})$$

gdzie $r(t, t_0)$ jest resztą składającą się z pozostałych pochodnych funkcji, przyjmującą postać

$$r(t, t_0) = \sum_{n=2}^{\infty} \frac{F^{(n)}(t_0)}{n!} (t - t_0)^n \quad (\text{A-8})$$

W naszym przypadku reszta jest pomijalna gdyż nie jest brana pod uwagę przy wyszukiwaniu, a zagadnienie sprowadza się do aproksymacji funkcji za pomocą prostej stycznej do niej w punkcie t_0 . Algorytm polega na zastosowaniu rozwiązania równania

$$F(t_0) + \left. \frac{dF}{dt} \right|_{t_0} (t - t_0) = 0 \quad (\text{A-9})$$

Postaci

$$t_1 = t_0 - \frac{F(t_0)}{F'(t_0)} \quad (\text{A-10})$$

W kolejnych krokach metody postępuje się podobnie. Każde przybliżenie argumentu t_k , dla którego funkcja $F(t)$ się zeruje jest dane wzorem podobnym do (A-10)

$$t_k = t_{k-1} - \frac{F(t_{k-1})}{F'(t_{k-1})}, \text{ dla } k = 1, 2, 3, \dots, m \quad (\text{A-11})$$

gdzie m jest maksymalną dopuszczalną liczbą iteracji, w których aproksymowana jest wartość argumentu spełniającego

$$F(t_k) = 0 \quad (\text{A-12})$$

W każdej iteracji metody brane są pod uwagę podstawowe warunki stopu [A1 - A6]:

- równość (A-12) zapewniająca w jednoznaczny sposób zakończenie poszukiwań,
- wartość bezwzględna funkcji dla k - tej iteracji mniejsza niż zadany parametr,

$$|F(t_k)| < \delta \quad (\text{A-13})$$

- odległość między argumentami funkcji z (k) i $(k-1)$ iteracji mniejsza niż zadany parametr,

$$|t_k - t_{k-1}| < \varepsilon \quad (\text{A-14})$$

Podane we wzorach (A-13) i (A-14) parametry określają stopień dokładności z jaką wyznaczane jest miejsce zerowe funkcji $F(t)$. Mają one tym samym, włączając w to także parametr m ze wzoru (A-11), znaczący wpływ na czas rozwiązania. Stosując większą liczbę iteracji wraz z mniejszymi wartościami δ i ε narażamy się na długotrwałe obliczenia, równocześnie zwiększając ich dokładność. W przypadku odwrotnym obliczenia są w stanie stosunkowo szybko dojść do zadowalającego nas (według parametrów δ i ε) rozwiązania. Zastosowanie odpowiedniej kombinacji parametrów wraz z optymalnym określeniem punktu początkowego $t_0 = a$ dla metody (warunki (A-1) do (A-4)) pozwalają na otrzymanie kompromisu pomiędzy dokładnością a ilością iteracji metody [A1 - A6].

Algorytm metody Newtona – Raphsona zapewnia zbieżność kolejnych przybliżeń danych wzorem rekurencyjnym (A-11) gdy wartość punktu początkowego poszukiwań jest dostatecznie bliska rzeczywistemu położeniu zera funkcji $F(t)$.

Równanie Atkinsa

$$\left[1 - \frac{\sin \beta_\mu \sin \Phi_c}{\cos(\beta_\mu - \gamma_f) \cdot \cos(\Phi_c - \gamma_f)} \right] \cdot \left[\frac{1}{\cos^2(\Phi_c - \gamma_f)} - \frac{1}{\sin^2 \Phi_c} \right] +$$

$$+ [\cot \Phi_c + \tan(\Phi_c - \gamma_f) + Z] \cdot \left[\frac{\sin \beta_\mu}{\cos(\beta_\mu - \gamma_f)} \left\{ \frac{\cos \Phi_c}{\cos(\Phi_c - \gamma_f)} + \frac{\sin \Phi_c \sin(\Phi_c - \gamma_f)}{\cos^2(\Phi_c - \gamma_f)} \right\} \right] = 0 \quad (\text{A-15})$$

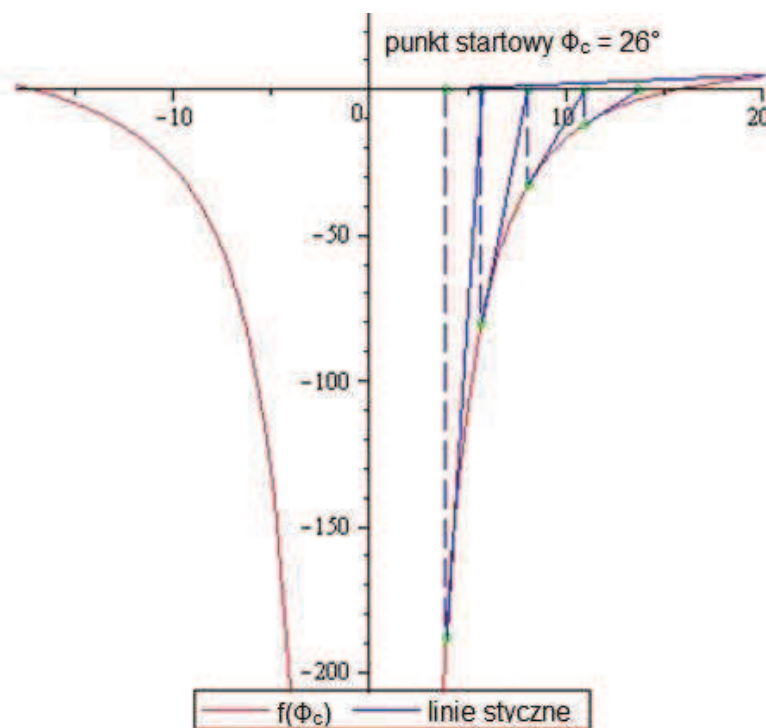
jest równaniem nieliniowym i rozwiązywane jest numerycznie metodami iteracyjnymi. Bardzo istotnym jest wybór punktu startowego, będącym warunkiem (A-4) dotyczącym długości przedziału poszukiwań zera funkcji.

Na rysunkach A-1, A-2 i A-3 przedstawiono graficznie przykładowe poszukiwanie miejsca zerowego dla równania Atkinsa (A-15) za pomocą metody Newtona - Raphsona w zależności od przyjętego punktu startowego. Przykładowe oszacowania wartości kąta ścinania Φ_c przeprowadzono dla polskiego drewna sosnowego pochodzącego z Bałtyckiej Krainy Przyrodniczo-Leśnej, dla procesu przecinania na dwuwrzecionowej pilarcie tarczowej PRW 422 firmy TOS Svitavy. Dla tych prognoz przyjęto takie parametry procesu przecinania na pilarcie

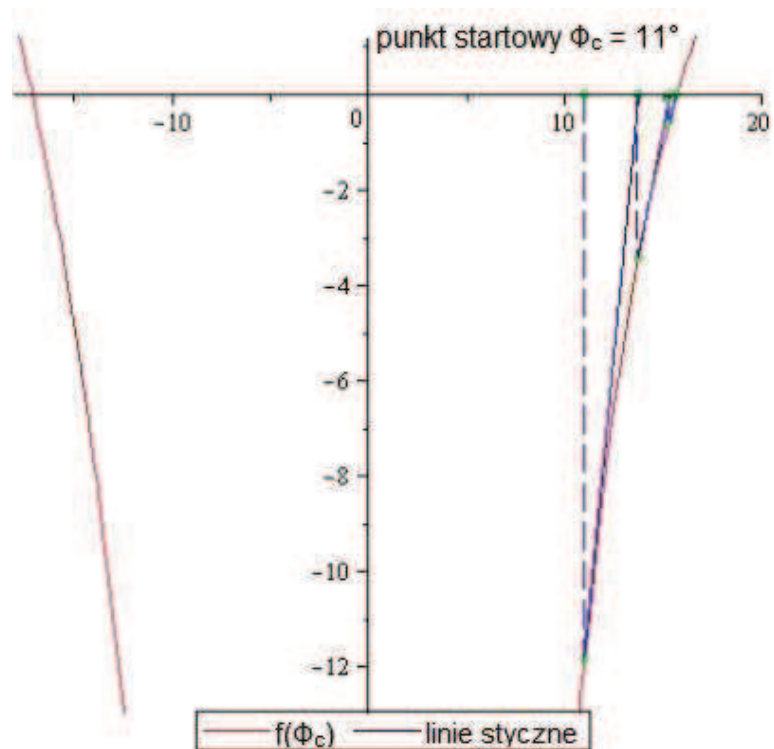
tarczowej, dla których wartość kąta określającego kontakt zębów z materiałem obrabianym wynosi $\varphi = 28,56^\circ$. Wartość parametru Z wynosi $Z = 18,83$, gdzie $Z = \frac{R}{\tau_\gamma \cdot h}$. Potrzebne do

obliczenia parametru Z wartości właściwości materiałowych z uwzględnieniem kierunku skrawania względem włókien drewna wynoszą odpowiednio: wiązkość $R_{\perp} = 345,935 \text{ J/m}^2$ oraz naprężenia tnące w strefie skrawania $\tau_{y\perp} = 8,78 \text{ MPa}$, zaś grubość warstwy skrawanej $h = 0,002 \text{ mm}$. Pozostałe parametry wynosiły: $\gamma_f = 22^\circ$, $\beta_\mu = 30,96^\circ$. Obliczona wartość kąta ścinania $\Phi_c = 15,67^\circ$.

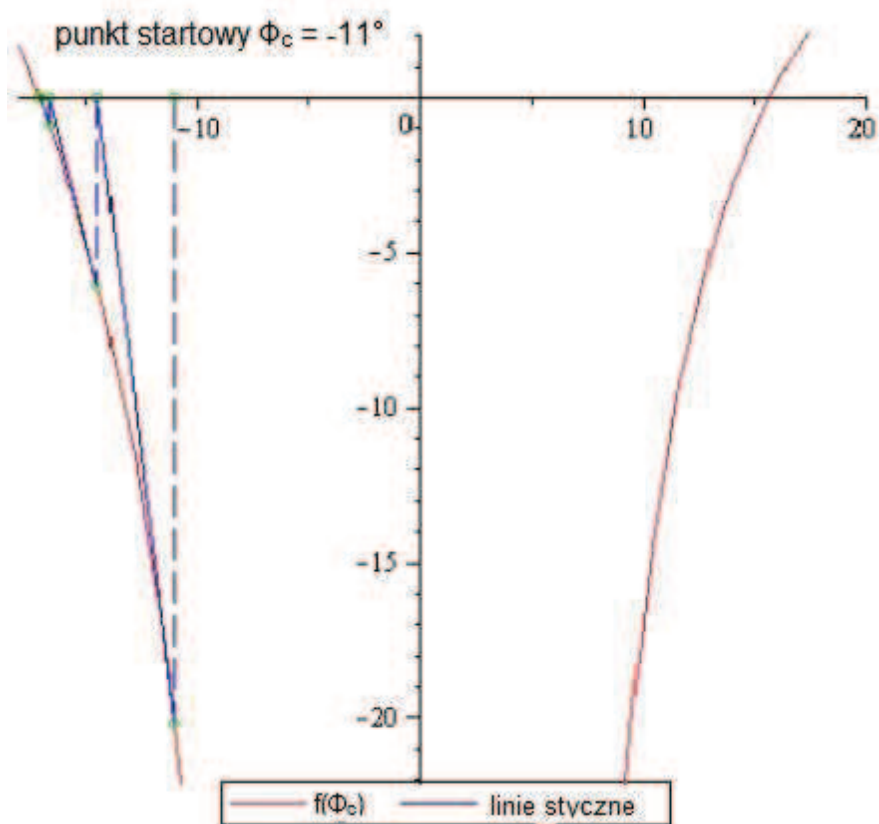
Odpowiednio dobrana wartość punktu startowego skraca czas potrzebny do znalezienia miejsca zerowego funkcji. Wariant z punktem startowym $\Phi_c = 26^\circ$ dla rozpatrywanym przypadku, został przedstawiony na rysunku A-1. Na rysunku tym można zaobserwować zasadę według której są poszukiwane miejsca zerowe funkcji nieliniowej według metody Newtona – Raphsona. Od punktu startowego, w tym przypadku $\Phi_c = 26^\circ$, jest prowadzona prosta prostopadła do osi odciętych, która jest osią reprezentującą kąt ścinania. Prosta ta przecina w pewnym punkcie funkcję. Z otrzymanego punktu przecięcia prowadzona jest prosta styczna do funkcji, która przecina w kolejnym punkcie oś odciętych. Z otrzymanego punktu przecięcia prowadzimy kolejną prostą prostopadłą, która przecina w nowym punkcie funkcję, z którego znów prowadzimy styczną do funkcji, przecinającą oś odciętych. Taki proces powtarzany jest do momentu, aż kolejna ze stycznych przetnie oś odciętych w tym samym punkcie, w którym tą oś przecina funkcja, czyli zostanie odnalezione miejsce zerowe.



Rysunek A-1. Poszukiwanie miejsca zerowego w nieliniowym przebiegu równania Atkinsa w funkcji kąta ścinania $f(\Phi_c)$ z punktem startowym $\Phi_c = 26^\circ$ przy zastosowaniu metody Newtona – Raphsona.

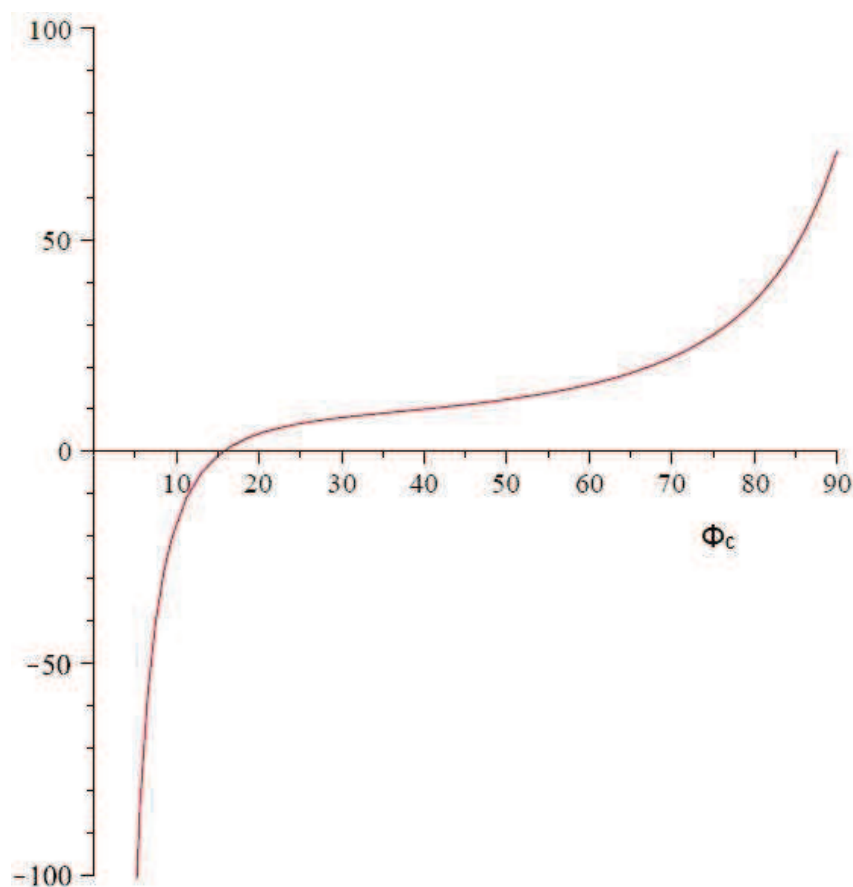


Rysunek A-2. Poszukiwanie miejsca zerowego w nieliniowym przebiegu równania Atkinsa w funkcji kąta ścinania $f(\Phi_c)$ z punktem startowym $\Phi_c = 11^\circ$ przy zastosowaniu metody Newtona – Raphsona.

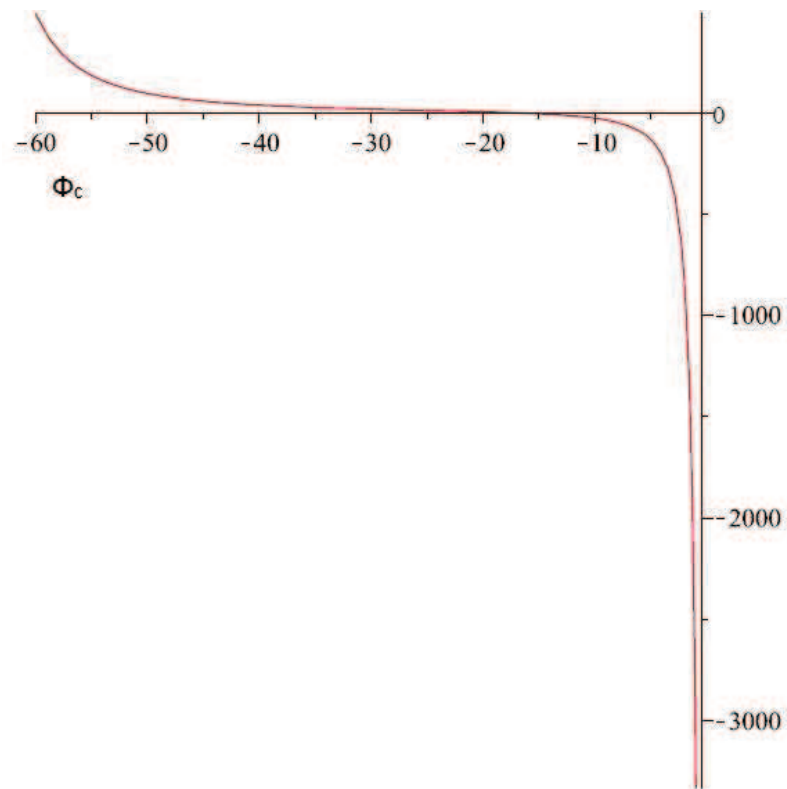


Rysunek A-3. Poszukiwanie miejsca zerowego w nieliniowym przebiegu równania Atkinsa w funkcji kąta ścinania $f(\Phi_c)$ z punktem startowym $\Phi_c = -11^\circ$ przy zastosowaniu metody Newtona – Raphsona.

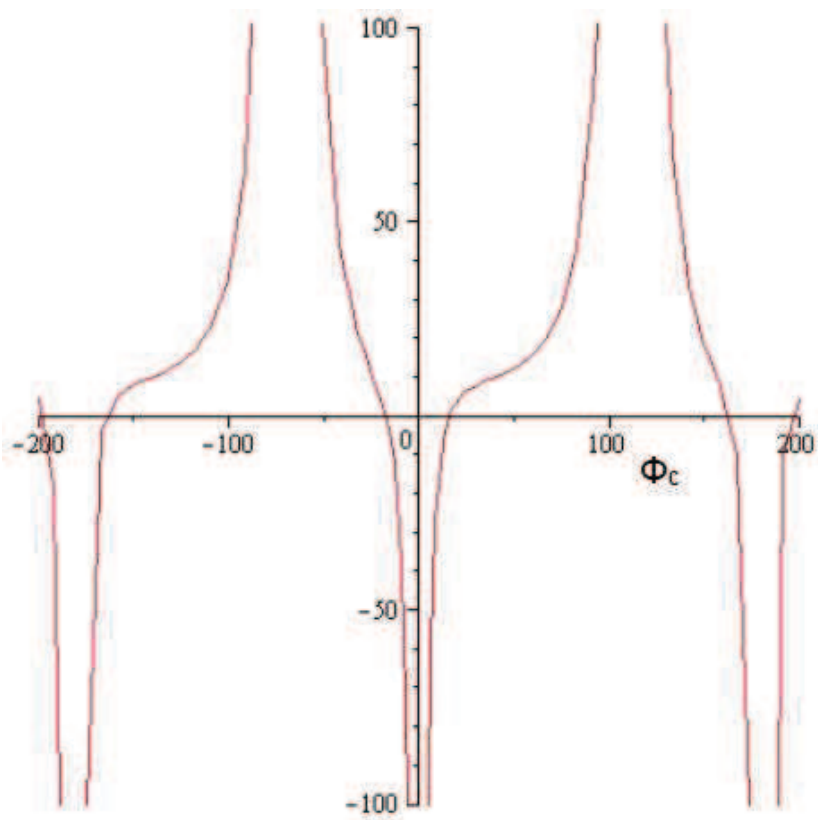
Rysunki A-4, A-5, A-6 pokazują zróżnicowanie przebiegu równania Atkinsa w zależności od analizowanego zakresu kąta ścinania Φ_c . Na wykresach A-4 i A-5 zaobserwować można, że przebieg funkcji, w zakresie wartości kąta ścinania Φ_c od -90° do 90° , dla wartości ujemnych różni się znacznie od przebiegu dla wartości dodatnich. Wykres A-6 przedstawia przebieg równania Atkinsa w szerokim zakresie kąta ścinania. Pokazuje on, jak kształt przebiegu funkcji Atkinsa jest zależny od zakresu wartości kąta ścinania, co pozwala na jeszcze dokładniejsze zrozumienie jak bardzo ważny jest wybór wartości punktu startowego do poszukiwania miejsca zerowego przy zastosowaniu metody Newtona – Raphsona, jak również innych metod iteracyjnych.



Rysunek A-4. Przebieg równania Atkinsa w funkcji kąta ścinania $f(\Phi_c)$ dla zakresu kąta ścinania od 0° do 90° .



Rysunek A-5. Przebieg równania Atkinsa w funkcji kąta ścinania $f(\Phi_c)$ dla zakresu kąta ścinania od -60° do 0° .

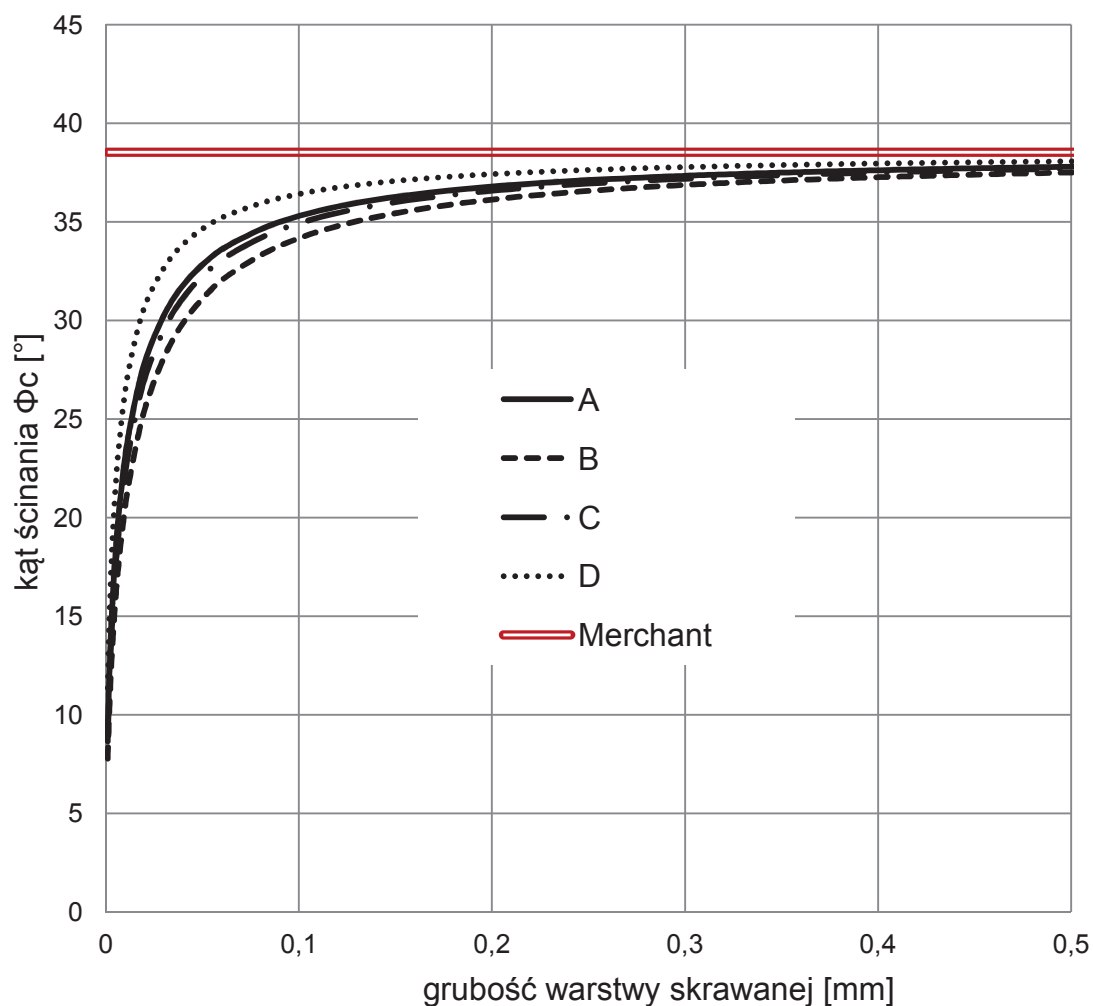


Rysunek A-6. Przebieg równania Atkinsa w funkcji kąta ścinania $f(\Phi_c)$ dla zakresu kąta ścinania od -200° do 200° .

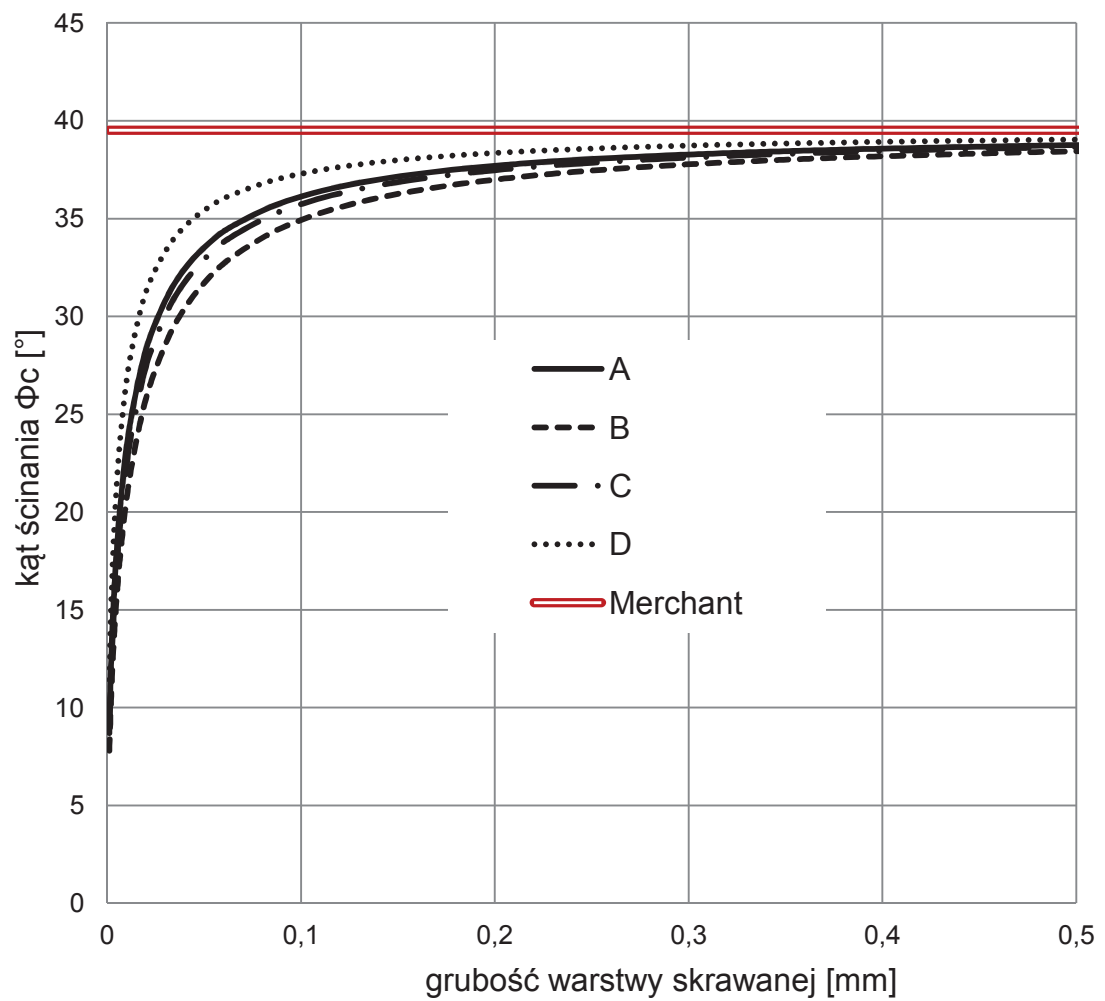
Wykaz literatury

- A1. Kincaid D., Cheney W., *Analiza numeryczna*. WNT 2006
- A2. Stoer J., Burlirsch R. *Wstęp do analizy numerycznej*. PWN 1987
- A3. Dahlquist G., Björk A. *Metody numeryczne*. PWN 1983
- A4. Ralston A. *Wstęp do analizy numerycznej*. PWN 1971
- A5. Demidowicz B.P., Maron I.A., Szuwałowa E.Z. *Metody numeryczne*. PWN 1965
- A6. Fortuna Z., Macukow B., Wąsowski J. *Metody Numeryczne*. WNT 1993

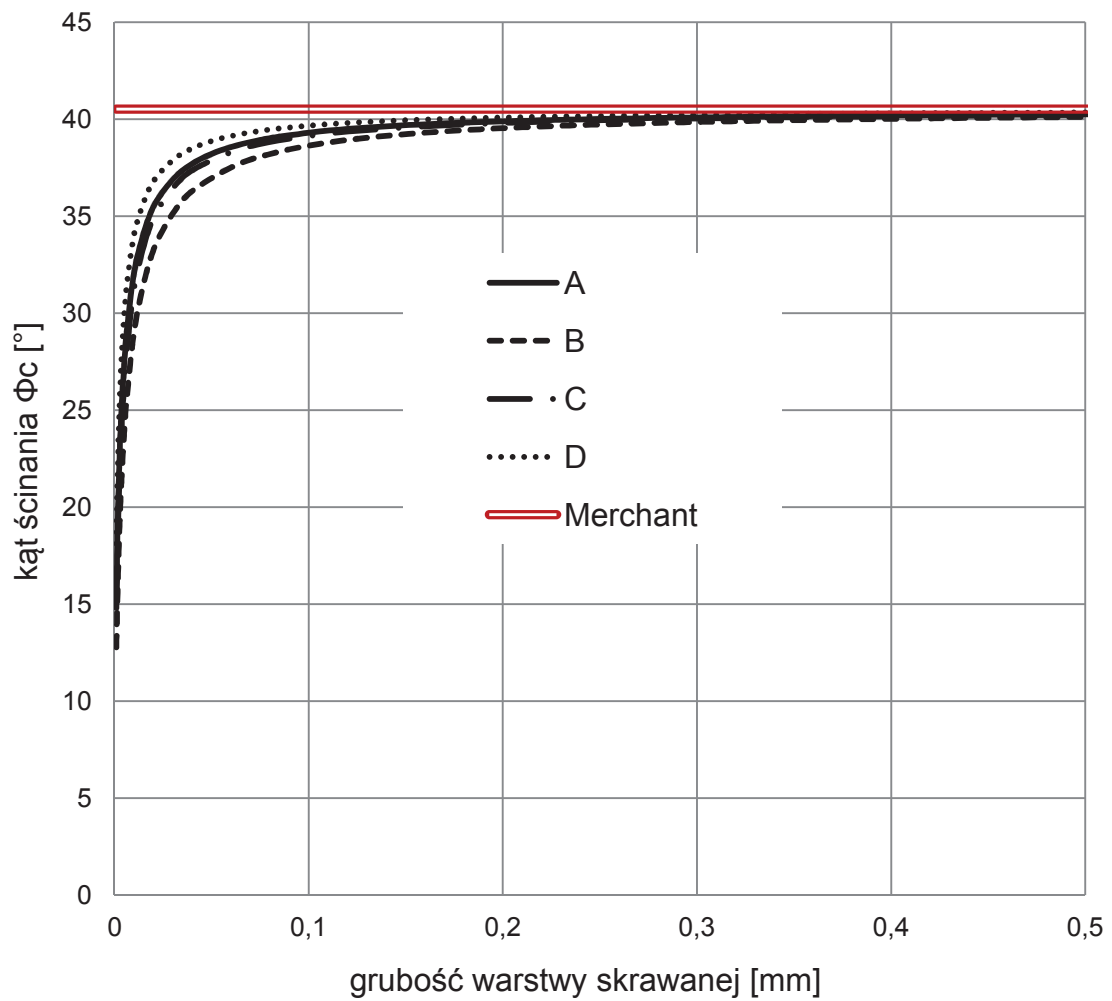
Dodatek B: Wykresy prognozowanych wartości kąta ścinania, odkształcenia postaciowego wzdłuż płaszczyzny ścinania oraz współczynnika korekcyjnego tarcia



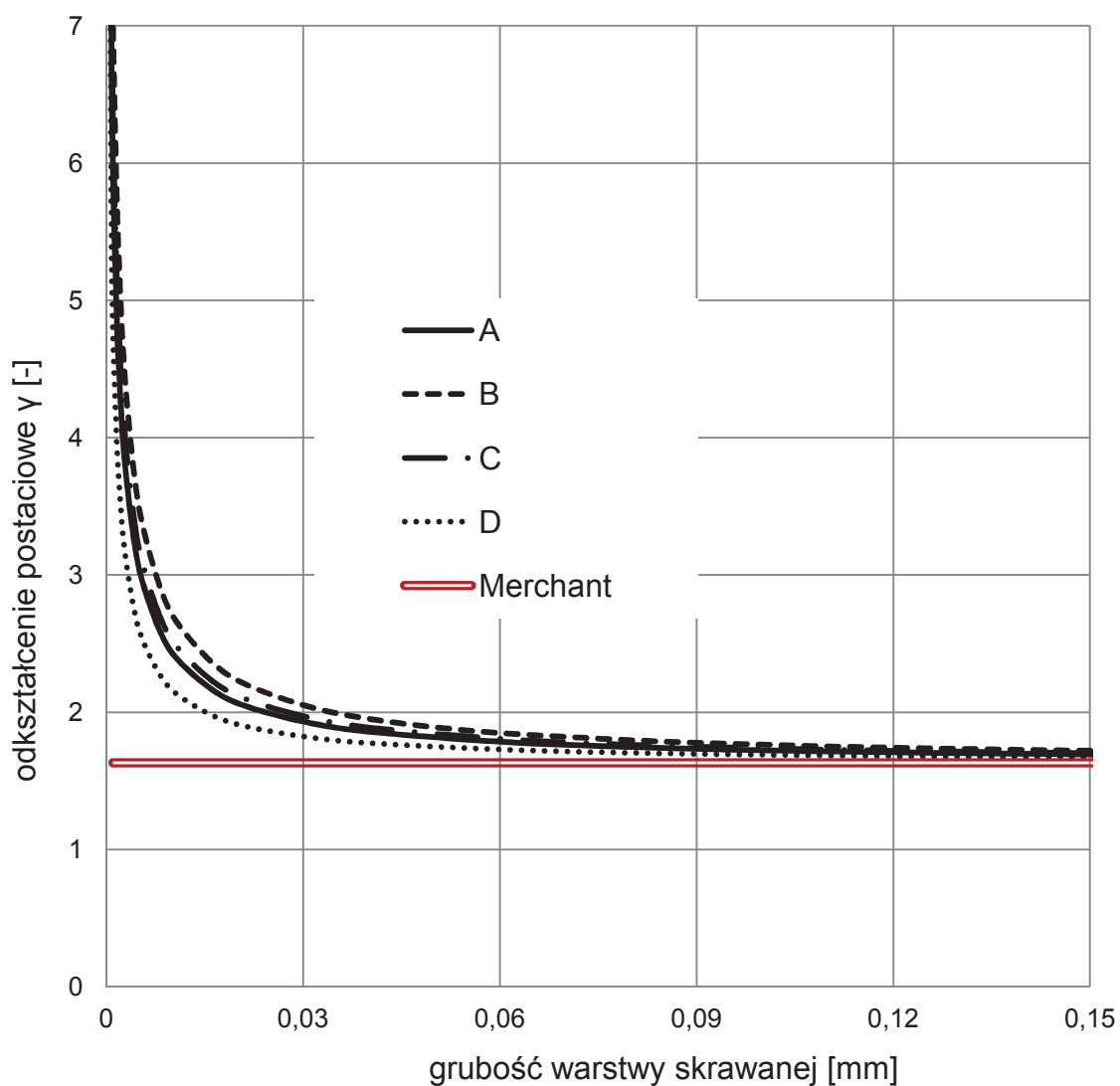
Rysunek B-1. Porównanie prognozowanych wartości kąta ścinania Φ_c dla drewna sosnowego różnych regionów Polski, uzyskanych z użyciem modelu zawierającego pracę rozdzielania materiału oraz pracę tarcia na powierzchni natarcia w funkcji grubości warstwy skrawanej h (f_z) z wartościami kąta ścinania wyznaczonymi wg zależności Ernsta – Merchanta. Wartości Φ_c uzyskane dla kąta natarcia $\gamma_f = 18^\circ$, dla pilarki ramowej DTRB-63, firmy FOD.



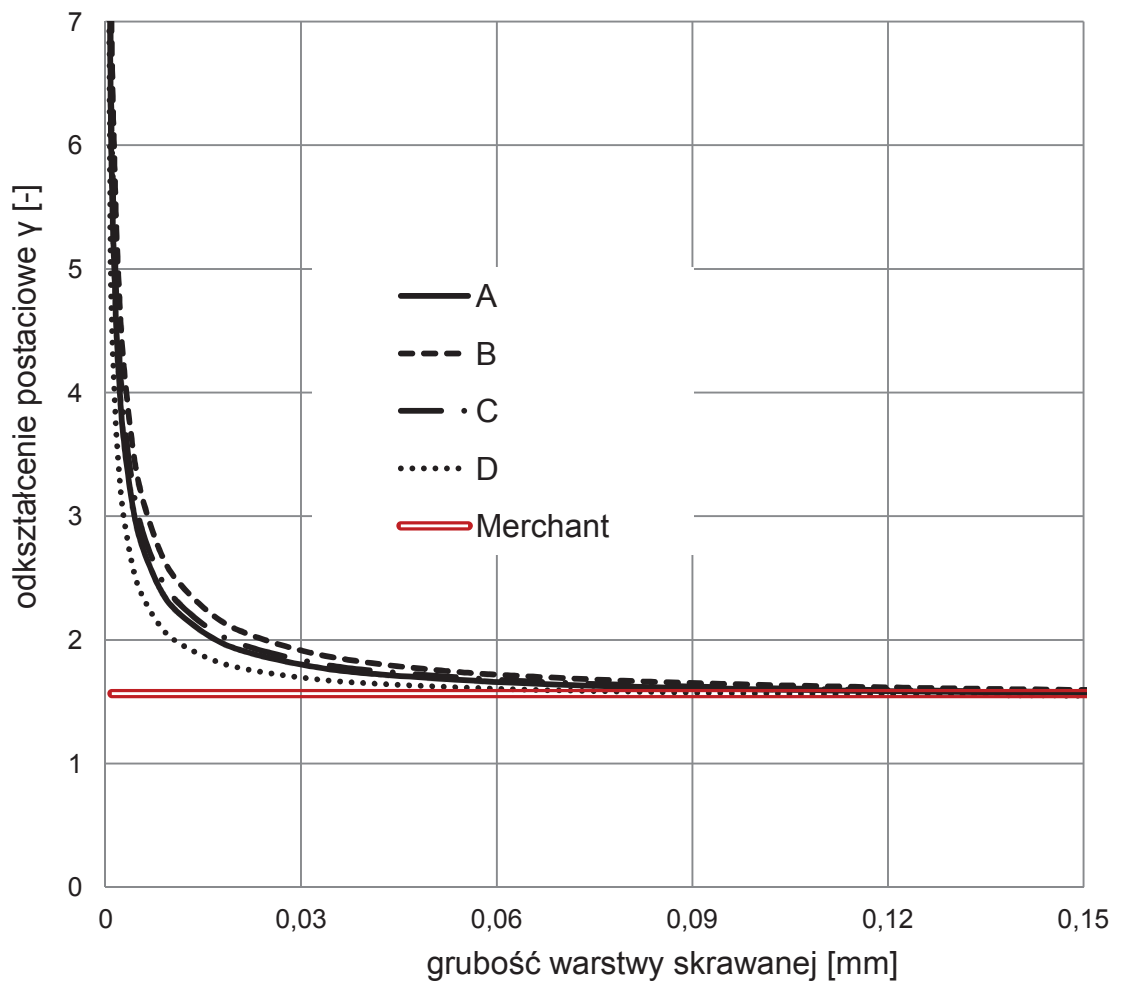
Rysunek B2. Porównanie prognozowanych wartości kąta ścinania Φ_c dla drewna sosnowego różnych regionów Polski, uzyskanych z użyciem modelu zawierającego pracę rozdzielania materiału oraz pracę tarcia na powierzchni natarcia w funkcji grubości warstwy skrawanej h (f_z) z wartościami kąta ścinania wyznaczonymi wg zależności Ernsta – Merchanta. Wartości Φ_c uzyskane dla kąta natarcia $\gamma_f = 20^\circ$, dla pilarki taśmowej ST – 100R, firmy Stenner.



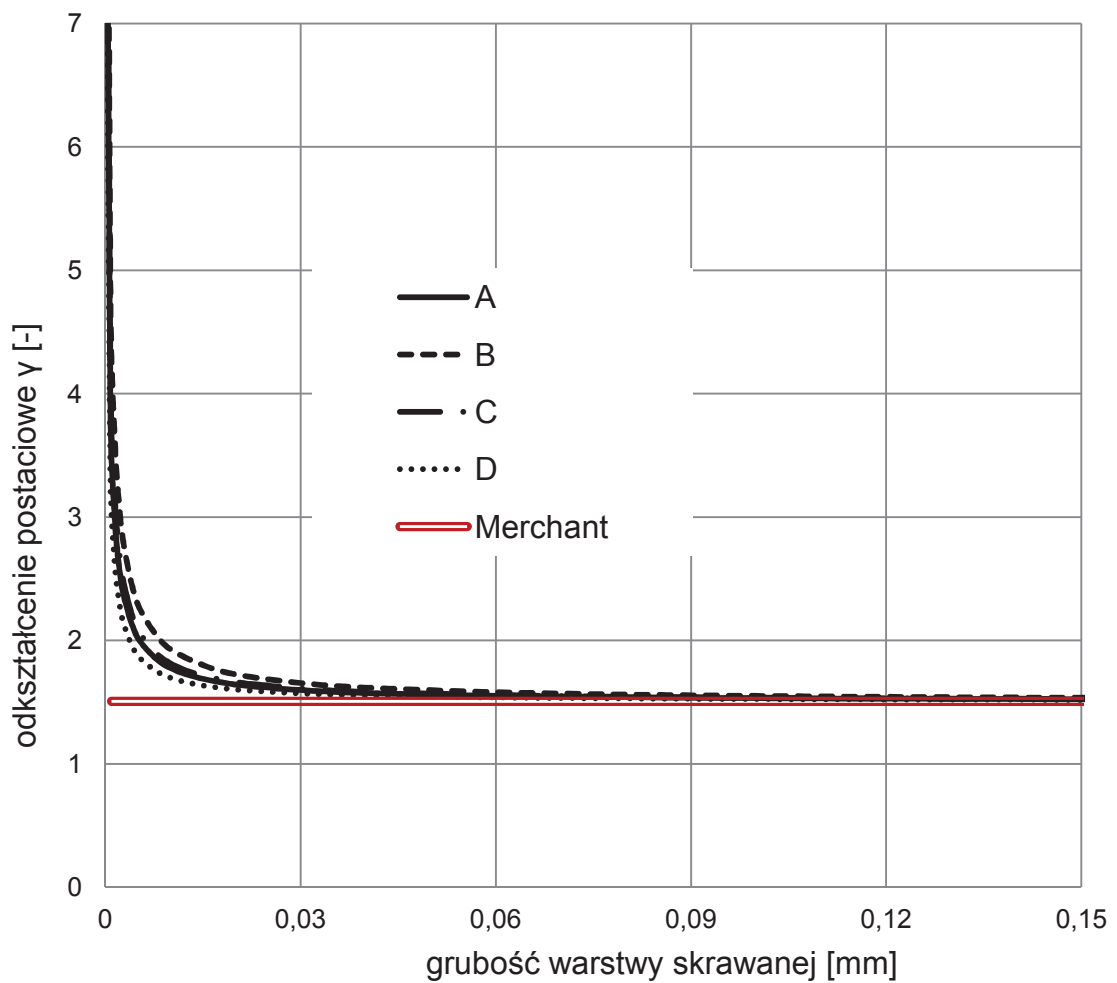
Rysunek B-3. Porównanie prognozowanych wartości kąta ścinania Φ_c dla drewna sosnowego różnych regionów Polski, uzyskanych z użyciem modelu zawierającego pracę rozdzielania materiału oraz pracę tarcia na powierzchni natarcia w funkcji grubości warstwy skrawanej h (f_2) z wartościami kąta ścinania wyznaczonymi wg zależności Ernsta – Merchanta. Wartości Φ_c uzyskane dla kąta natarcia $\gamma_f = 22^\circ$, $D_{cs} = 350$ mm, $a = 135$ mm, dla pilarki tarczowej PRW 422, firmy TOS Svitavy.



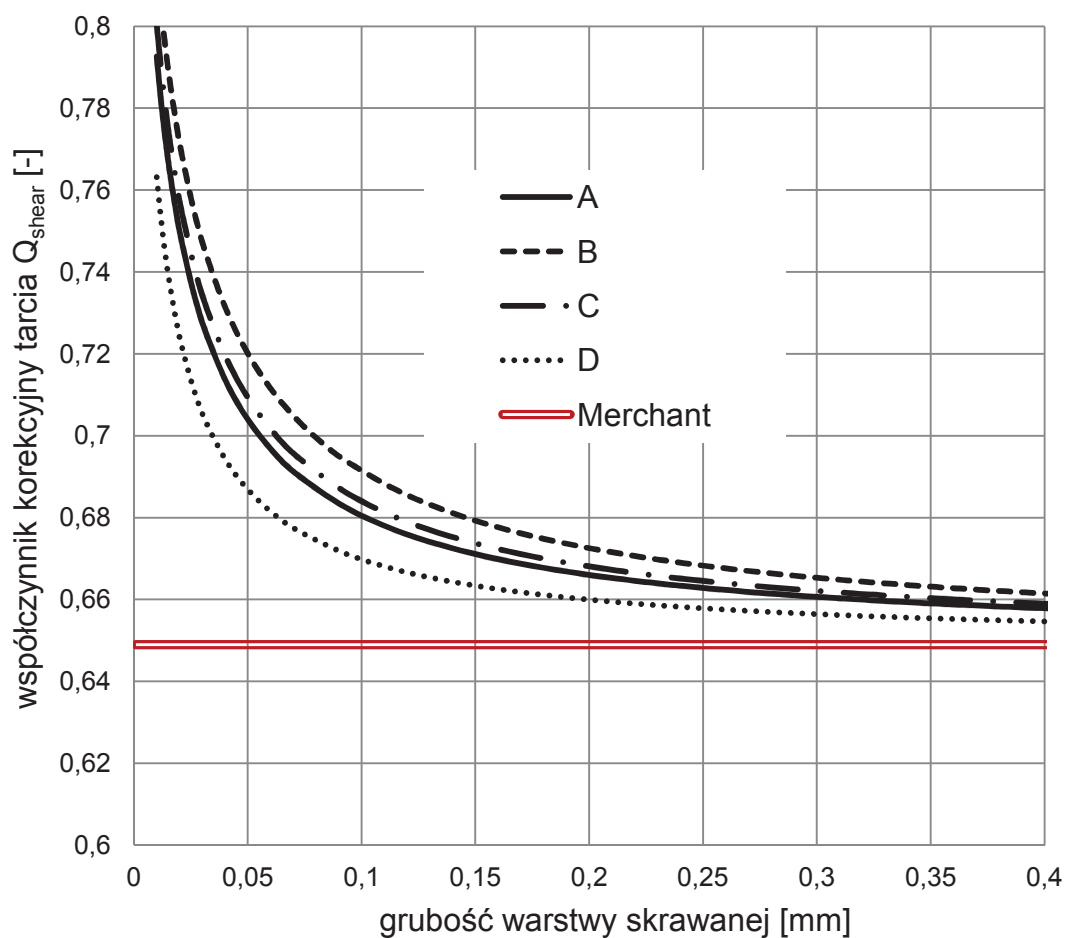
Rysunek B-4. Porównanie prognozowanych wartości odkształcenia postaciowego wzdłuż płaszczyzny ścinania γ dla drewna sosnowego różnych regionów Polski, uzyskanych z użyciem modelu zawierającego pracę rozdzielania materiału oraz pracę tarcia na powierzchni natarcia w funkcji grubości warstwy skrawanej h (f_z) z wartościami odkształcenia postaciowego uzyskanych w oparciu o zależność Ernsta – Merchanta. Wartości γ wyznaczano dla kąta natarcia $\gamma_f = 18^\circ$, dla pilarki ramowej DTRB-63, firmy FOD.



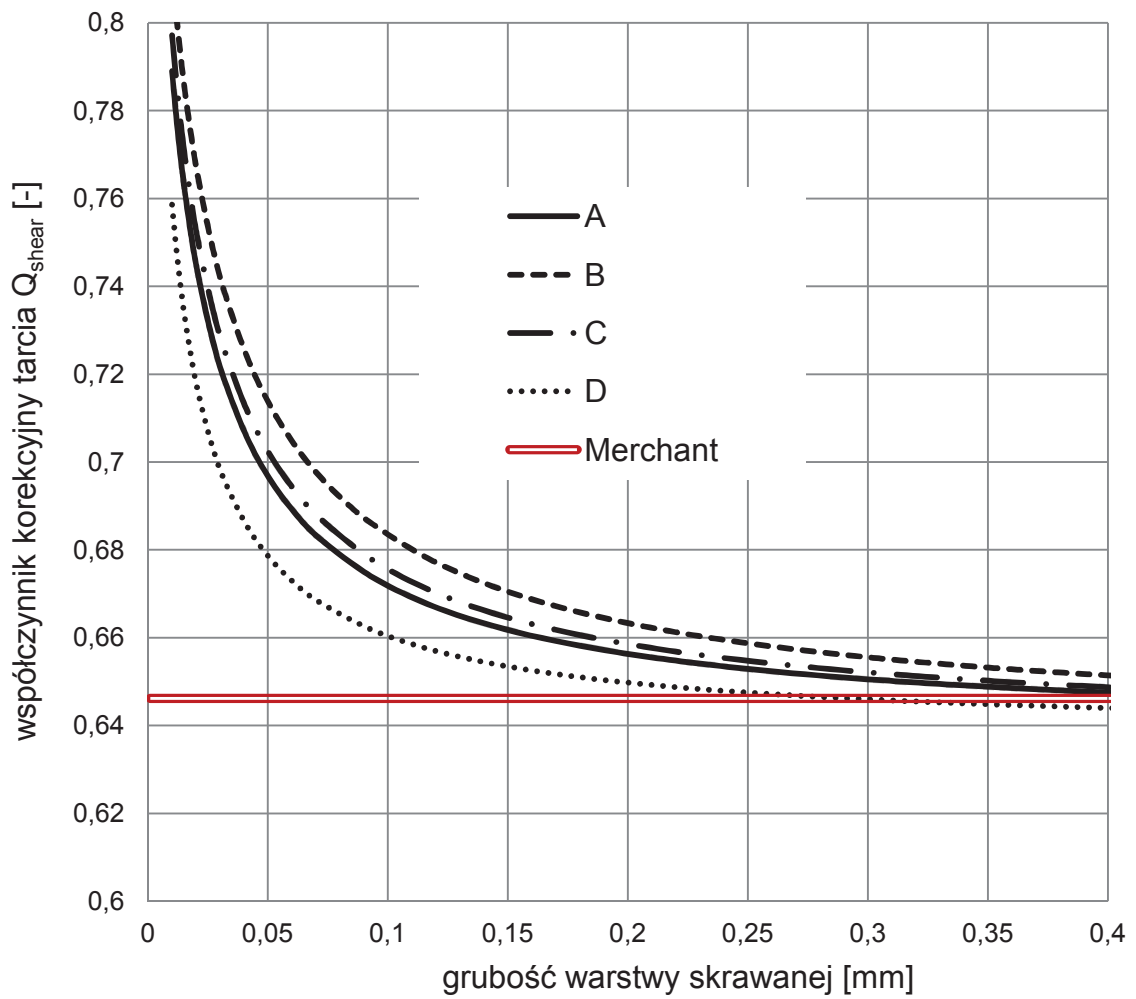
Rysunek B-5. Porównanie prognozowanych wartości odkształcenia postaciowego wzdłuż płaszczyzny ścinania γ dla drewna sosnowego różnych regionów Polski, uzyskanych z użyciem modelu zawierającego pracę rozdzielania materiału oraz pracę tarcia na powierzchni natarcia w funkcji grubości warstwy skrawanej h (f_2) z wartościami odkształcenia postaciowego uzyskanych w oparciu o zależność Ernsta – Merchanta. Wartości γ wyznaczano dla kąta natarcia $\gamma_f = 20^\circ$, dla pilarki taśmowej ST – 100R, firmy Stenner.



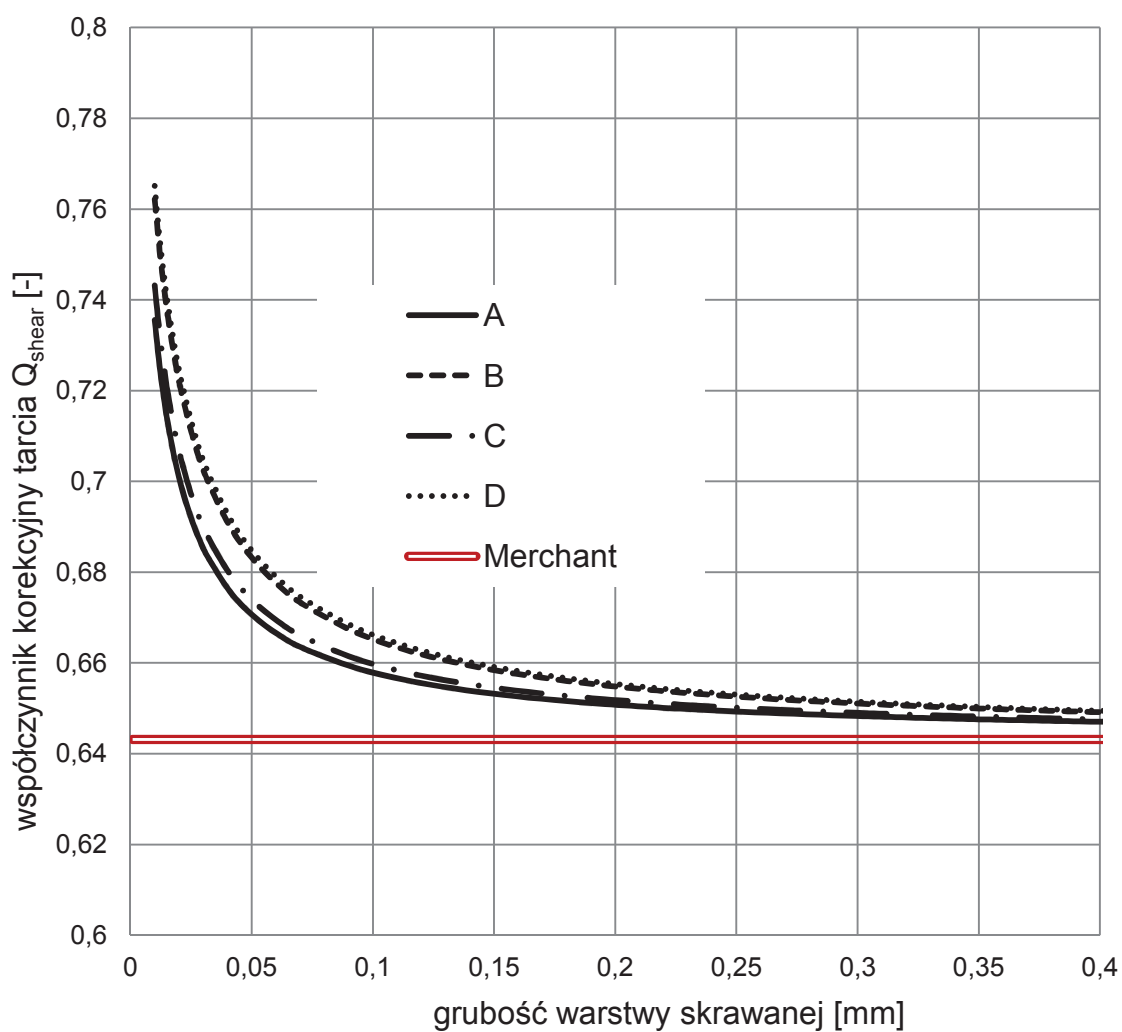
Rysunek B-6. Porównanie prognozowanych wartości odkształcenia postaciowego wzdłuż płaszczyzny ścinania γ dla drewna sosnowego różnych regionów Polski, uzyskanych z użyciem modelu zawierającego pracę rozdzielania materiału oraz pracę tarcia na powierzchni natarcia w funkcji grubości warstwy skrawanej h (f_2) z wartościami odkształcenia postaciowego uzyskanych w oparciu o zależność Ernsta – Merchanta. Wartości γ wyznaczano dla kąta natarcia $\gamma_f = 22^\circ$, $D_{cs} = 350$ mm, $a = 135$ mm, dla pilarki tarczowej PRW 422, firmy TOS Svitavy.



Rysunek B-7. Porównanie prognozowanych wartości współczynnika korekcyjnego tarcia Q_{shear} dla drewna sosnowego różnych regionów Polski, uzyskanych z użyciem modelu zawierającego pracę rozdzielania materiału oraz pracę tarcia na powierzchni natarcia w funkcji grubości warstwy skrawanej h (f_z) z wartościami odkształcenia postaciowego uzyskanych w oparciu o zależność Ernsta – Merchanta. Wartości γ wyznaczano dla kąta natarcia $\gamma_f = 18^\circ$, dla pilarki ramowej DTRB-63, firmy FOD.



Rysunek B-8. Porównanie prognozowanych wartości współczynnika korekcyjnego tarcia Q_{shear} dla drewna sosnowego różnych regionów Polski, uzyskanych z użyciem modelu zawierającego pracę rozdzielania materiału oraz pracę tarcia na powierzchni natarcia w funkcji grubości warstwy skrawanej h (f_z) z wartościami odkształcenia postaciowego uzyskanych w oparciu o zależność Ernsta – Merchanta. Wartości γ wyznaczano dla kąta natarcia $\gamma_f = 20^\circ$, dla pilarki taśmowej ST – 100R, firmy Stenner.



Rysunek B-9. Porównanie prognozowanych wartości współczynnika korekcyjnego tarcia Q_{shear} dla drewna sosnowego różnych regionów Polski, uzyskanych z użyciem modelu zawierającego pracę rozdzielania materiału oraz pracę tarcia na powierzchni natarcia w funkcji grubości warstwy skrawanej h (f_z) z wartościami odkształcenia postaciowego uzyskanych w oparciu o zależność Ernsta – Merchanta. Wartości γ wyznaczano dla kąta natarcia $\gamma_f = 22^\circ$, $D_{cs} = 350$ mm, $a = 135$ mm, dla pilarki tarczowej PRW 422, firmy TOS Svitavy.