Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego

w Warszawie

Instytut Inżynierii Mechanicznej

Mgr inż. Magda Kubuśka – Orłowska

Wpływ wybranych warunków pracy na intensywność zużycia krawędzi tnących ogniw piły łańcuchowej żłobikowej

Influence of selected operating conditions on wear intensity of cutting edges of a slotted chain saw

Rozprawa doktorska

Doctoral thesis

Rozprawa doktorska wykonana pod kierunkiem

dr hab Adama Maciaka

Katedra Inżynierii Biosystemów

Warszawa, 2024

Oświadczenie promotora rozprawy doktorskiej

Oświadczam, że niniejsza rozprawa została przygotowana pod moim kierunkiem i stwierdzam,
że spełnia warunki do przedstawienia jej w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora.

Data 23.04.2024 Czytelny podpis promotora Adam Mail

Oświadczenie autora rozprawy doktorskiej

Świadom/a odpowiedzialności prawnej, w tym odpowiedzialności karnej za złożenie fałszywego oświadczenia, oświadczam, że niniejsza rozprawa doktorska została napisana przez mnie samodzielnie i nie zawiera treści uzyskanych w sposób niezgodny z obowiązującymi przepisami prawa, w szczególności z ustawą z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (tj. z dnia 28 października 2022 r., Dz.U. z 2022 r. poz. 2509 ze zm.)

Oświadczam, że przedstawiona rozprawa nie była wcześniej podstawą żadnej procedury związanej z uzyskaniem stopnia naukowego doktora.

Oświadczam ponadto, że niniejsza wersja rozprawy jest identyczna z załączoną wersją elektroniczną.

Przyjmuję do wiadomości, że rozprawa doktorska poddana zostanie procedurze antyplagiatowej.

Data 23.04.2024 Czytelny podpis autora rozprawy Magda Kubaśka-Tańska

Spis treści

Streszczenia 7
Wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych w pracy 9
Określenia i definicje użyte w pracy 10
1. Wstęp 12
2. Przegląd literatury 13
2.1 Zastosowanie pil łańcuchowych 13
2.2 Obróbka drewna narzędziami skrawającymi 14
2.2.1 Teoria skrawania ostrzem elementarnym 18
2.3 Budowa piły łańcuchowej oraz jej elementów 23
2.3.1 Historia pił łańcuchowych 23
2.3.2 Budowa piły łańcuchowej żłobikowej 26
2.3.3 Budowa ogniwa tnącego 28
2.3.4 Urządzenie napinające piłę 32
2.4 Przebieg skrawania drewna piłami łańcuchowymi 34
2.5 Modele skrawania drewna piłami łańcuchowymi 37
2.6 Wpływ wybranych czynników na efekty skrawania 39
2.6.1 Typ ogniwa tnącego oraz geometria ostrzy 40
2.6.2 Zniżenie ogranicznika grubości wióra 42
2.6.3 Promień zaokrąglenia krawędzi tnącej 43
2.6.4 Napięcie wstępne 44
2.6.5 Wysokość rzazu 45
2.6.6 Siła posuwu 45
2.6.7 Prędkość liniowa piły łańcuchowej 46
2.7 Proces zużycia ostrzy skrawających 47
2.7.1 Wpływ różnych czynników na proces zużycia krawędzi tnących piły 52
2.8 Sosna jako najważniejszy gatunek drzew w Polsce 53
3. Hipoteza badawcza, cel i zakres pracy 56
4. Materiały i metody 59
4.1 Drewno wykorzystane w badaniach 59
4.2 Piła łańcuchowa i prowadnica użyta w badaniach 60
4.2.1 Sposób ustalania napięcia piły 61
4.2.2 Napęd piły 62
4.3 Metodyka badań kamerą do zdjęć szybkich 63

4.3.1 Stanowisko do rejestracji procesu skrawania kamerą do zdjęć szybkich 63
4.3.2 Sposób wykonywania pomiarów na stanowisku do rejestracji kamerą do zdjęć szybkich 66
4.4 Metodyka badań procesu zużycia ostrzy 69
4.4.1 Stanowisko do badań procesu tępienia piły 69
4.4.2. Przebieg badań procesu zużycia ostrzy 71
4.4.3 Sposób wykonywania pomiarów na stanowisku do badań procesu tępienia piły 72
4.5 Sposób opracowania danych pomiarowych 74
5. Wyniki 78
5.1 Wyniki pomiarów kąta odchylenia ogniw 78
5.2 Wartości powierzchniowej wydajności skrawania uzyskane podczas badań 82
5.3 Zależność promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej ostrza oraz wydajności skrawania od powierzchni wykonanego rzazu uzyskane dla poszczególnych przypadków 85
5.4. Porównanie wpływu powierzchni wykonanego rzazu na wartość promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej dla wszystkich badanych przypadków 96
5.5. Intensywność zużycia krawędzi tnących 105
5.6 Wpływ możliwości wychylenia ogniw tnących piły na intensywność zużycia krawędzi tnących 108
6. Dyskusja 110
7. Wnioski 114
8. Literatura 116
9. Załączniki 123

Streszczenie

Wpływ wybranych warunków pracy na intensywność zużycia krawędzi tnących ogniw piły łańcuchowej żłobikowej

Piła łańcuchowa jest narzędziem szeroko stosowanym w procesie pozyskania drewna. Jej ostrza w przeciwieństwie do innych pił mają możliwość odchylania się w płaszczyźnie rzazu. Szczególnie w przypadku pilarek spalinowych gdzie występują zmiany chwilowej wartości prędkości obrotowej wynikające z charakteru pracy silnika. Celem przedstawionej rozprawy było ustalenie wpływu zadanej siły posuwu oraz napięcia wstępnego na intensywność zużycia krawędzi tnących ogniw piły. W pracy badano również wpływ zużycia ostrzy na uzyskiwaną wartość powierzchniowej wydajności skrawania. Wykonano rejestrację procesu skrawania kamerą do zdjęć szybkich przy dwóch różnych wartościach siły posuwu i napięcia wstępnego, aby dokonać analizy wpływu tych czynników na możliwości odchylania się ogniw tnących podczas pracy. Na specjalnie skonstruowanym stanowisku przeprowadzono pomiary intensywności zużycia krawędzi tnących piły oraz powierzchniowej wydajność skrawania dla trzech różnych wartości siły posuwu oraz dwóch stopni napięcia piły. Stwierdzono, że spadek wartości siły posuwu i napięcia powoduje wzrost kąta odchylania i wzrost intensywności zużycia krawędzi tnących. Udowodniono hipotezę, że zmiana siły posuwu i napięcia wstępnego wpływa istotnie na intensywność zużycia krawędzi tnących ogniw piły.

Słowa kluczowe – piła łańcuchowa, pilarka, ogniwo tnące, zużycie ostrzy piły, wydajność skrawania, kąt odchylenia ogniw

Work summary

Influence of selected operating conditions on wear intensity of cutting edges of a slotted chain saw

The chainsaw is a tool widely used in the logging process. Its blades, unlike other saws, have the ability to deviate in the plane of the cut. Especially in the case of chainsaws where there are changes in the instantaneous value of the rotational speed resulting from the nature of the engine's operation. The cutting process was recorded with a high-speed camera at two different values of feed force and preload to analyze the impact of these factors on the possibility of deflection of the cutting links during operation. On a specially

constructed stand, measurements of the wear intensity of the cutting edges of the saw blade and the surface cutting efficiency were carried out for three different values of the feed force and two degrees of saw blade tension. It was found that the decrease in feed force and tension causes an increase in the deflection angle and an increase in the wear intensity of the cutting edges. The hypothesis has been proved that the change of the feed force and the initial tension significantly affects the wear intensity of the cutting edges of the saw links.

Keywords - chainsaw, sawing machine, cutting link, saw blade wear, cutting efficiency, link deflection angle

Wykaz ważniejszych oznaczeń stosowanych w pracy

A	powierzchnia wykonanego rzazu	m^2
A_i	całkowita powierzchnia rzazu wykonana do momentu i-tego pomiaru promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej	m^2
A_{i+1}	całkowita powierzchnia rzazu wykonana do momentu pomiaru i+1 promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej	m^2
I	chwilowa intensywność zużycia	$\mu m \cdot m^{-2}$
$I_{śr}$	średnia intensywność zużycia	$\mu m \cdot m^{-2}$
L	odległość pomiędzy osiami nitów	mm
P	prawdopodobieństwo testowe	-
T	czas skrawania	s
W	powierzchniowa wydajność skrawania	$cm^2 \cdot s^{-1}$
Y_1	odległość osi pierwszego nitu od bieżni prowadnicy	mm
Y_2	odległość osi drugiego nitu od bieżni prowadnicy	mm
α	kąt odchylenia ogniw tnących	°
$\Delta \rho$	przyrost średniego promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej pomiędzy kolejnymi pomiarami	µm
ΔA	powierzchnia wykonanego rzazu pomiędzy kolejnymi pomiarami promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej	m^2
Δ_ρ	współczynnik intensywności zużycia krawędzi tnącej	-
ΔY	różnice pomiędzy wartościami współrzędnych nitów w osi Y	mm
Δy	strzałka ugięcia piły łańcuchowej	mm
ρ	promień zaokrąglenia krawędzi tnącej	µm
ρ_i	średni promień zaokrąglenia krawędzi tnącej w i-tym pomiarze	µm
ρ_{i+1}	średni promień zaokrąglenia krawędzi tnących pomiaru i+1	µm

Określenia i definicje użyte w pracy

Dużą trudnością w omawianiu zależności występujących podczas skrawania drewna piłami łańcuchowymi jest brak pełnego jednolitego nazewnictwa w języku polskim
Aby uniknąć niejednoznaczności w opisywaniu zjawisk występujących w procesie skrawania oraz zużycia ostrzy pił łańcuchowych, przedstawiam określenia i definicje podstawowych pojęć, z których korzystam przy opisywaniu problemu przedstawionego w pracy. Pojęcia te w literaturze są często definiowane niejednoznacznie:

- Obróbka skrawaniem (skrawanie) - rodzaj obróbki ubytkowej polegający na usuwaniu poszczególnych warstw naddatku obróbkowego i zamianie go na wióry [Orlicz 1988].
- Piłowanie (piłą łańcuchową) – rodzaj obróbki skrawaniem, jeden ze sposobów mechanicznej obróbki drewna. Jego istotą jest zagłębianie się narzędzia (piły) w obrabiany element i tworzenie w nim szczeliny zwanej szczeliną rzazu [Orlicz 1988].
- Warunki skrawania – pojęcie, które obejmuje wszystkie czynniki mające wpływ na przebieg procesu skrawania i wielości charakteryzujące ten proces [Dmochowski 1981].
- Parametry eksploatacyjne – wchodzą w skład ogólnie rozumianych warunków skrawania ale na ich wartości ma wpływ operator w trakcie przygotowywania piły do pracy (np.: regulacja napięcia wstępnego) lub w trakcie pracy (np.: zastosowana wielkość siły posuwu).
- Rzaz – szczelina powstająca w drewnie w trakcie piłowania. Jego charakterystyczną cechą jest szerokość [Łukomski 1977].
- Dno rzazu – powierzchnia stanowiąca w danym momencie dno szczeliny rzazu [Górski 1993].
- Wysokość rzazu – długość dna rzazu, wielkość odpowiadająca długości prowadnicy znajdującej się w szczelinie rzazu przy założeniu że prędkość posuwu jest prostopadła do dna szczeliny rzazu.
- Powierzchnia boczna rzazu – powierzchnia ściany bocznej szczeliny tworzonej przez piłę.
- Ostrze pionowe piły żłobikowej – ostrze kształtujące bok szczeliny rzazu.
- Ostrze poziome piły żłobikowej – ostrze kształtujące dno rzazu.

- Siła posuwu – siła wywierana na narzędzie w kierunku równoległym do prędkości posuwu. W odniesieniu do pilarki łańcuchowej jest to siła jaką wywiera operator na prowadnicę [Górski 1993].
- Prędkość posuwu – prędkość tego z ruchów podstawowych który nie jest ruchem roboczym (w odniesieniu do piły łańcuchowej jest to prędkość z jaką piła wraz z prowadnicą zagłębia się w rzazie) [Orlicz 1988].
- Jednostkowa wydajność skrawania - powierzchnia boczna rzazu, która powstaje w jednostce czasu.
- Promień zaokrąglenia krawędzi tnącej – promień łuku łączącego powierzchnię natarcia z powierzchnią przyłożenia ostrza.
- Napięcie wstępne piły łańcuchowej – wstępna siła rozciągająca działająca na ogniwa piły łańcuchowej. Jej wartość jest regulowana przez operatora przed przystąpieniem do piłowania.
- Intensywność zużycia się ostrzy piły – w pracy rozumiany jako wzrost promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej odniesiony do wykonanej powierzchni rzazu.

1. Wstęp

Piła łańcuchowa żłobikowa jest to narzędzie za pomocą którego pozyskuje się praktycznie 100 % drewna w polskich lasach. Jest ona elementem roboczym małych maszyn jakimi są pilarki spalinowe oraz dużych maszyn jakimi są harwestery, których udział
w procesie pozyskania wzrasta. Za pomocą tego narzędzia dokonuje się ścinki, okrzesywania oraz przerzynki. Pilarki wykorzystywane są również w innych działach gospodarki. Dużą zaletą pilarek w porównaniu do harwesterów jest ich dostępność wynikająca z niskiej ceny zakupu, wadą zaś są zagrożenia związane z posługiwaniem się pilarkami. Przebieg skrawania piłami łańcuchowymi jest inny niż pozostałymi rodzajami pił.

W piłach taśmowych lub tarczowych ostrza nie mają możliwości zmiany swojego położenie względem innych ostrzy. Natomiast piła łańcuchowa składa się z ogniw połączonych nitami [Więsik 2005]. Jej konstrukcja sprawia, że podczas pracy poszczególne jej ogniwa mogą wychylać się w płaszczyźnie rzazu. Odróżnia to przebieg skrawania piłą łańcuchową od przebiegu skrawania innymi typami pił np. tarczowych, taśmowych lub pił traków ramowych. W przypadku pilarek zmienna jest również chwilowa prędkość piły wynikająca z charakterystyki pracy jednocylindrowego silnika dwusuwowego [Maciak 2013].

Konstruktorzy pił łańcuchowych wprowadzają coraz to nowsze rozwiązania techniczne, które poprawiają zarówno bezpieczeństwo pracy, ergonomię oraz zwiększające wydajność skrawania. Jednak nieodłącznym zjawiskiem towarzyszącym pracy każdego narzędzia skrawającego jest proces zużycia ostrzy zwany procesem tępienia [Maciak, Kubuśka 2018]. Jego przebieg zależy od wielu czynników związanych z konstrukcją ostrza. Do nich należeć będą kąt ostrza, materiał z którego jest wykonana krawędź tnąca oraz jej twardość. Do czynników mających wpływ na proces zużycia mogą mieć wpływ także warunki pracy. Na te czynniki ma niekiedy wpływ operator maszyny.

Do czynników na które ma wpływ operator pilarki należą między innymi siła posuwu oraz napięcie wstępne piły łańcuchowej. Jak wykazano w literaturze stępienie ostrzy tnących piły łańcuchowej ma istotny wpływ na wydajność skrawania drewna [Górski 1996b]. Ze względu na szerokie zastosowanie pił łańcuchowych żłobikowych

warto poznać jaki wpływ na zjawisko, które zmniejsza wydajność pracy mają czynniki zależne od operatora maszyny.

2. Przegląd literatury

2.1 Zastosowanie pil łańcuchowych

Piła łańcuchowa żłobikowa jest narzędziem tnącym wieloostrzowym. Stanowi narzędzie robocze w przenośnych pilarkach łańcuchowych oraz maszynach wielooperacyjnych służących do pozyskiwania drewna (harwester).

Budowa układu tnącego obu tych maszyn jest zbliżona. Różnią się sposobem wywierania siły posuwu oraz rodzajem napędu piły. W pilarkach siła posuwu nadawana jest przez operatora. Przebieg procesu skrawania zależy m.in. od parametrów układu operator – pilarka [Maciak 2013]. Natomiast w harwesterach siła posuwu wymuszana jest przez siłownik hydrauliczny. W pilarkach spalinowych do napędu piły wykorzystywany jest jednocylindrowy silnik spalinowy. Charakteryzuje się on dużą zmiennością chwilowej prędkości obrotowej [Gendek 2005]. Zmienność prędkości wpływa na zachowanie się piły w trakcie skrawania [Gendek 2006, Maciak 2013].

Istnieją też pilarki elektryczne (akumulatorowe lub sieciowe). Nie znajdują one jednak zastosowania przy pozyskaniu drewna. Są wykorzystywane głównie przez stolarzy lub cieśli, lub w celach amatorskich.

W harwesterach do napędu piły wykorzystywany jest silnik hydrauliczny wielotłoczkowy o stałym skoku. Silniki te pracują z prędkością około 11 000 obrotów na minutę. W przypadku tego typu silników nierównomierność spada wraz ze wzrostem prędkości obrotowej [Stryczek 1995]. Silnik ten cechuje większą stabilnością chwilowej wartości prędkości obrotowej niż silnik stosowany w pilarkach przenośnych.

Z każdym rokiem udział maszyn wielooperacyjnych wzrasta w pozyskiwaniu drewna w Polsce. Od 2006 roku do 2015 liczba harwesterów w Polsce wzrosła z 26 do 530 pracujących maszyn [Tomczak 2018]. Nie ma nowszych danych dotyczących liczby harwesterów w Polsce. Jednak zdecydowana większość drzew ścinanych w Polsce jest za pomocą pilarek spalinowych. Szacuje się że na początku XXI wieku ok 90% drewna w Polsce było pozyskiwane pilarkami spalinowymi [Kusiak i inni 2012, Wójcik 2014]. W chwili obecnej udział harwesterów wzrósł, ale jest trudny do oszacowania. W Skandynawii natomiast stosowanie harwesterów do pozyskiwania jest najbardziej

popularną metodą. ale szeroko stosowany jest również w innych krajach europejskich. W Finlandii, Irlandii czy Szwecji metoda sortymentowa stosowana jest do pozyskania 90−95% surowca [Dvořák, Walczyk 2013].

2.2 Obróbka drewna narzędziami skrawającymi

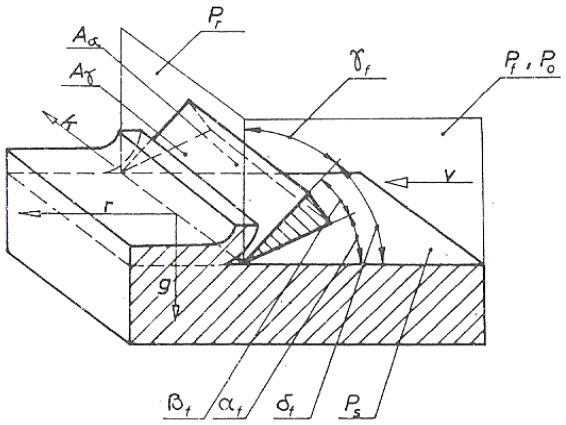
Drewno poddawane procesowi pozyskania lub procesowi jego dalszego przetwarzania zostaje poddane obróbce mechanicznej. Obróbka ta nazywana jest skrawaniem. Skrawaniem nazywana jest obróbka polegająca na usuwaniu warstwy materiału z przedmiotu obrabianego przy użyciu siły mechanicznej za pomocą narzędzia o kształcie klina, a warstwa ta jest w całej swojej objętości odkształcona plastycznie i przekształcona w wiór [Olczak 2009]. Proces ten natomiast zachodzi bez wpływu na właściwości chemiczne i fizykochemiczne obrabianego materiału [Górski 2005]. Proces skrawania zachodzi w wyniku powstających w drewnie odkształceń, przy istnieniu sił tarcia, zjawiska spęczania i utwardzania wióra, przy jednoczesnym tępieniu się ostrza [Storch 2001].

Metodami obróbki skrawaniem są m.in. frezowanie, piłowanie, struganie, szlifowanie, toczenie i wiercenie. Najbardziej popularną metodą, bo obecną nie tylko przy procesie przetwarzania drewna, ale również samego pozyskania, jest piłowanie [Górski 2005]. Piłowanie jest to skrawanie drewna wieloostrzowym narzędziem zwanym piłą [Orlicz 1988].

Podczas piłowania w obrabianym materiale powstaje na skutek działania narzędzia tnącego ubytek nazywany szczeliną rzazu. Szerokość tej szczeliny jest równa szerokości stosowanej piły. Natomiast materiał, który jest usuwany z rzazu podczas pracy narzędzia tnącego stanowi jego odpad i nazywany jest wiórem [Górski 2005].

W trakcie skrawania ostrza wykonują ściśle określone rodzaje ruchów [Staniszewska, Zakrzewski 2006]. Pierwszym z nich jest ruch główny (roboczy), który jest niezbędny do skrojenia jednego wióra, prędkością tego ruchu jest to prędkość skrawania. Drugim rodzajem jest ruch posuwowy, jest on niezbędny do powtórzenia procesu skrojenia kolejnego wióra przez ostrze narzędzia. Prędkość ruchu posuwowego nazywana jest prędkością posuwu. Ostatni ruch jest to ruch wypadkowy stanowi sumę geometryczną obu wyżej wymienionych. Niezależnie od rodzaju narzędzia tnącego, jego głównym elementem roboczym, jest klinowe ostrze skrawające [Więsik 1994].

Rysunek 1 przestawia przykład skrawania swobodnego. W tym przypadku ostrze jest szersze od obrabianego materiału [Orlicz 1988], a jego kierunek przemieszczania jest zgodny z przedstawionym wektorem **r**. W budowie ostrza klinowego podczas skrawania swobodnego można wyróżnić trzy charakterystyczne elementy: Powierzchnię $\mathbf{A_\gamma}$ - zwaną powierzchnią natarcia; powierzchnię $\mathbf{A_\alpha}$ – zwaną powierzchnią przyłożenia; oraz krawędź tnącą.



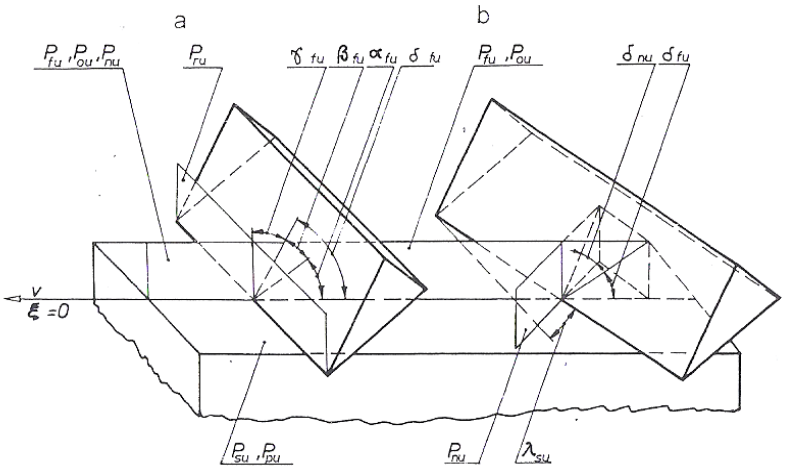
Rys. 1. *Płaszczyzny, wektory i kąty charakteryzujące położenie noża elementarnego względem obrabianego materiału. (podczas skrawania swobodnego)[* Staniszewska, Zakrzewski 2006*]*

Powierzchnia natarcia stanowi powierzchnię ostrza, po której podczas skrawania, spływa odpad inaczej zwany wiórem. Natomiast powierzchnia przyłożenia znajduje się od strony powierzchni obrobionego materiału. Krawędzią tnącą nazywamy miejsce styku powierzchni natarcia i przyłożenia.

Określenie położenia ostrza względem obrabianego materiału pomagają wyznaczone wektory kierunkowe: wektor krawędzi tnącej k i wektor grubości wióra g [Staniszewska, Zakrzewski 2006].

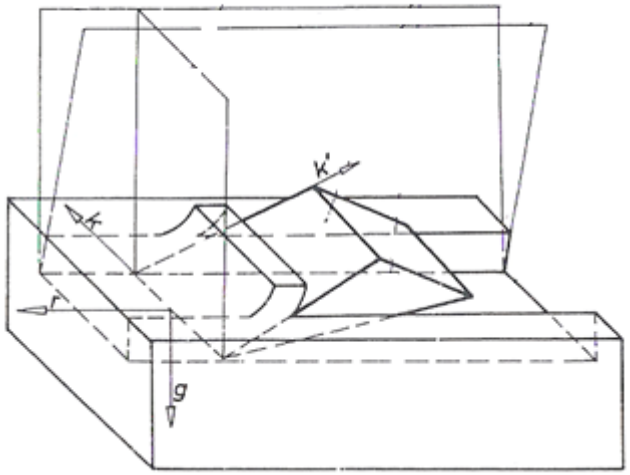
Na rysunku 1 krawędź tnąca jest prostopadła do kierunku ruchu roboczego (wektora r). Płaszczyzna krawędzi tnącej P_s wyznaczona jest przed prostopadłe względem siebie kierunki r oraz k. Natomiast kierunki r i g wyznaczają płaszczyznę kierunkową P_o. Płaszczyznę czołową P_r stanowią kierunki r oraz g. Ustawienie ostrza względem obrabianego drewna przy pomocy odpowiednich kątów pozwalają opisać wyznaczone w ten sposób płaszczyzny [Staniszewska, Zakrzewski 2006]. Można wyznaczyć kąt natarcia γ_f (zawarty między płaszczyzną czołową P_r a powierzchnią natarcia Aγ), kąt przyłożenia α_f (zawarty między powierzchnią przyłożenia Aα a płaszczyzną krawędzi tnącej P_s), kąt ostrza β_f (zawarty między powierzchnią natarcia Aγ a powierzchnią przyłożenia Aα), kąt

skrawania δ_f (zawarty między powierzchnią natarcia Aγ a płaszczyzną krawędzi tnącej P_s) oraz kąt pochylenia krawędzi względem kierunku skrawania λ (zawarty między krawędzią tnącą k a kierunkiem r). Kąt λ zaznaczony jest na rysunku 2.



Rys. 2. *Skrawanie swobodne nożem elementarnym w różnych układach: a – kąt λ_{su} = 0, b = kąt λ_{su} > 0 [*Staniszewska, Zakrzewski 2006*]*

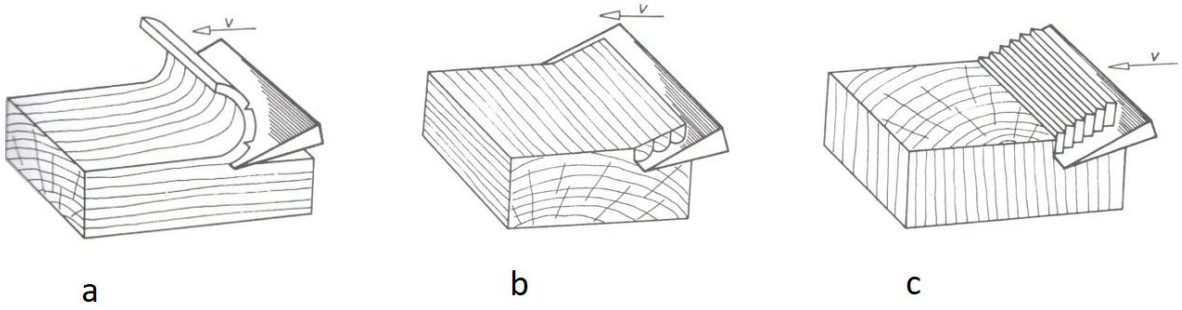
Gdy ostrze jest krótsze od szerokości obrabianego elementu występuje skrawanie w szczelinie przedstawione na rysunku 3. W tym przypadku proces skrawania wspierają dodatkowo boczne krawędzie tnące – oznaczone na rysunku jako k'.



Rys. 3. *Skrawanie ostrzem elementarnym – szczelinowe[*Staniszewska, Zakrzewski 2006*]*

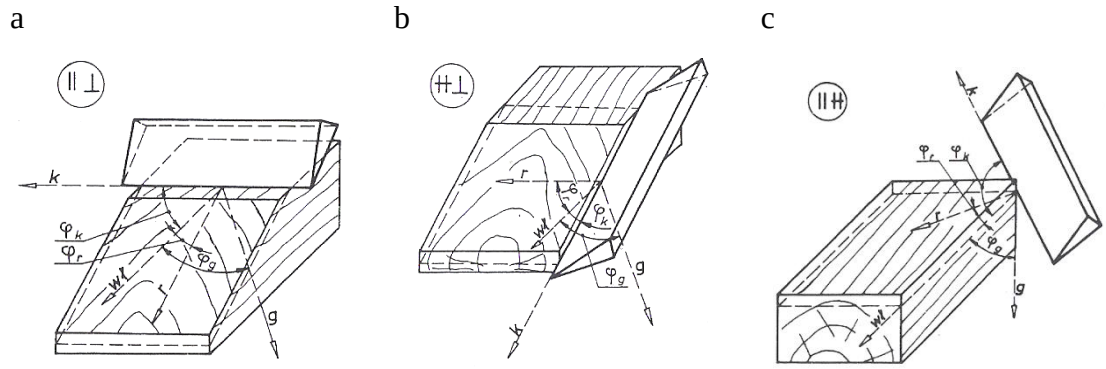
Ważnym aspektem w procesie skrawania drewna jest położenie noża oraz kierunek ruchu noża względem kierunku włókien drewna. Kierunki te mają wpływ na

właściwą siłę skrawania, gładkość powierzchni, oraz na sposób formowania się wióra. Na rysunku 4. przedstawiono podstawowe kierunki skrawania: poprzeczny, prostopadły oraz wzdłużny oraz sposób kształtowania wióra podczas skrawania w tych kierunkach.



Rys. 4. *Sposób kształtowania wióra w zależności od kierunku skrawania w stosunku do włókien a) skrawanie wzdłuż włókien, b) skrawanie poprzecznie do włókien, c) skrawanie prostopadle do włókien. [Orlicz 1988]*

W obróbce drewna skrawaniem wyróżniamy również trzy pośrednie położenia skrawania, przedstawione na rysunku 5 i są to : 5a – skrawanie wzdłużno-poprzeczne; 5b – skrawanie wzdłużno-prostopadłe; 5c – skrawanie poprzeczno-wzdłużno-prostopadłe.



Rys. 5. *Pośrednie położenia skrawania: a – wzdłużno-poprzeczne; b – wzdłużno-prostopadłe; c – poprzeczno-wzdłużno-prostopadłe[*Staniszewska, Zakrzewski 2006*]*

Istnieje wiele czynników mających wpływ na proces skrawania drewna ostrzem elementarnym. Związane są zarówno z obrabianym drewnem, ale też z samym narzędziem. Na proces ten zatem mają wpływ właściwości fizyczne drewna, ale też budowa oraz stan ostrza. Czynnikiem mającym wpływ na skrawanie jest też położenie

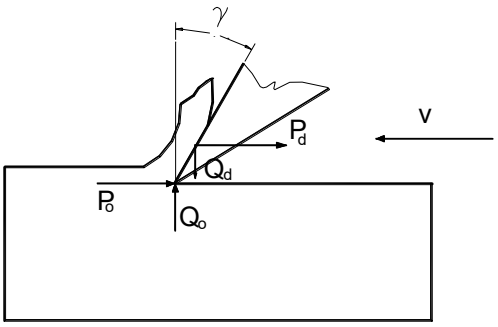
obrabianego materiału. Najważniejszymi czynnikami mającymi bezpośredni wpływ na przebieg skrawania oraz wielkość oporów skrawania drewna są: gatunek, wilgotność i temperatura drewna; szybkość skrawania; wymiary i kształt ostrza oraz stan jego krawędzi; tarcie noża i wióra o drewno w rzazie; nacisk wywierany na drewno przed nożem; grubość wióra; kąt skrawania i kąty kierunkowe obróbki skrawaniem [Górski 2005, Poradnik1960].

2.2.1 Teoria skrawania ostrzem elementarnym

Najbardziej znane modele skrawania drewna ostrzem elementarnym opracowali: Kivimaa [1950], Bierszadski [1967], Koch [1969] , Fischer [1978] oraz Liubczenko [1986]. Założeniem tych modeli skrawania było stabilne położenie zębów tnących względem obrabianego drewna. Teoria ta uzasadniona jest w przypadku pił, w których ostrza mają jednoznacznie określone położenie podczas pracy np. tarczowe czy taśmowe [Górski 2005]. Na rysunku 6 oraz 7 przedstawiono dwa rodzaje działania sił na ostrze skrawające według Kivimaa (1950) oraz Bierszadskiego (1967). Kivimaa na podstawie licznych badań stwierdził, że w przedziale najczęściej spotykanych w praktyce grubości wiórów
(od 0,025 do 0,300 mm), krzywe obrazujące zależności siły skrawania *P* od grubości wióra Δ_z, swym kształtem zbliżone są do linii prostej. Tym samym ukształtował obecny stan wiedzy na temat procesu skrawania drewna ostrzem elementarnym. Ponadto jeśli przedłużone zostaną krzywe siły skrawania P, żadna z nich nie przechodzi przez początek układu współrzędnych, ale przecina rzędną powyżej zera. Siłę P użytą do rozdzielana drewna można podzielić na dwie składowe:

- siłę skrawającą P_o, powodującą właściwe oddzielenie warstwy od drewna, tzw. wióra przy wykorzystaniu krawędzi tnącej ostrza,
- siłę deformującą P_d będącą przyczyną deformacji i odchylenia wióra powierzchnią natarcia ostrza.

Siły te oznaczono na rysunku 6.



Rys. 6. *Siły działające na ostrze skrawające wg Kivimaa (1950)*

Siła skrawająca P_0 nie zależy od grubości skrawanego wióra, zależy natomiast od stanu krawędzi tnącej, inaczej zwanego promieniem zaokrąglenia krawędzi tnącej. Siła deformująca P_d natomiast zależy właśnie głównie od grubości wióra Δ_z oraz kąta natarcia γ. Powyższe obserwacje pozwoliły Kivimaa stworzyć nastepujący wzór na siłę skrawania:

$$P = P_o + P_d = P_o + x_1 \cdot \Delta_z \qquad [N] \quad [1]$$

gdzie: x_1 – współczynnik odkształcenia zależny od kąta natarcia γ.

Dla małych promieni zaokrąglenia krawędzi tnącej, kiedy piła jest dobrze naostrzona wypadkową siłę odporu Q według Kivimaa można przyjąć jako zależność liniową od grubości wióra, tzn:

$$Q = Q_o + Q_d = Q_o + x_2 \cdot \Delta_z \qquad [N] \quad [2]$$

gdzie: x_2 – współczynnik zależny od kąta natarcia γ, dla przyjętego zwrotu siły Q_d dodatni dla małych wartości a ujemny dla dużych wartości kąta natarcia.

W praktyce jednak podział pracy między krawędzią tnącą a powierzchnią natarcia ostrza skrawającego może nie być aż tak wyraźny jak w przedstawionej wyżej teorii. Tą uwagę zastrzega sam Kivimaa. Stwierdził, że zależność pomiędzy siłą skrawania P i siłą odporu Q jest wprost proporcjonalna i można zapisać ją następująco:

$$Q = c \cdot P \qquad [N] \quad [3]$$

gdzie: c – współczynnik siły odporu zależny głównie od stanu krawędzi tnącej.

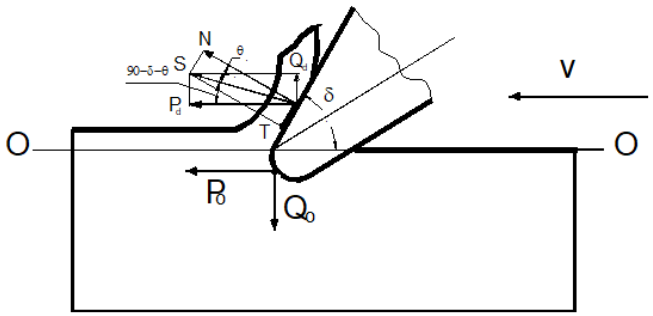
Kivimaa zauważył podczas badań zależności zapotrzebowania mocy od grubości wióra, że szybki wzrost mocy jednostkowej przy zmniejszaniu grubości wióra, najbardziej zauważalny jest poniżej 0,1 mm.

W 1982 roku Loth badając skrawanie różnych gatunków drewna w przedziale grubości wióra od 0,05 do 0,3 mm, zauważył, że siła odporu zależy od grubości wióra. Związek ten ma charakter prostoliniowy. Dla małych grubości wióra ostrze skrawające jest odpychane od drewna, przy wzroście grubości wióra siła odporu zmienia kierunek działania
i dla większych grubości wióra ostrze jest dociskane do drewna.

W 1967 roku Bierszadskij wyodrębnił dwa miejsca działania sił. Wykonał analizę sił działających w procesie skrawania drewna. Pierwsze miejsce znajduje się ponad linią rzeczywistego podziału drewna oznaczoną na rysunku 7 prostą OO. Siły w tym miejscu działają na powierzchnię natarcia ostrza skrawającego. Poniżej jest drugie miejsce, w którym siły oddziałują na powierzchnię przyłożenia ostrza skrawającego. Siły te po obu stronach są od siebie niezależne. Wartość siły odpychającej wiór Q_d może być obliczona
z zależności:

$$Q_d = P_d \cdot tg(90 - \delta - \theta) \qquad [N] \quad [4]$$

gdzie: θ – kąt tarcia przyjmujący wartości od 20 do 25^0.



Rys. 7. *Siły działające na drewno podczas skrawania wg Bierszadskiego*

Ze wzoru 4 wynika, że zależnie od wartości kąta skrawania δ, siła odpychająca wiór Q_d, może przyjmować wartości ujemne, wtedy skierowana jest do drewna. Jest to możliwe przy dużych wartościach kąta skrawania ($\delta > 65^0$) [Maciak 2001].

Powierzchnia przyłożenia ostrza skrawającego oddziałuje na drewno siłą nacisku Q_o, prostopadłą do kierunku skrawania i stałą co do wartości dla określonego ostrza skrawającego, lecz niezależną od grubości wióra.

W kierunku skrawania działa styczna siła oddziaływania powierzchni przyłożenia ostrza skrawającego na drewno:

$$P_o = Q_o \cdot \mu_1 \quad [N] \quad [5]$$

gdzie: μ_1 – kompleksowy współczynnik tarcia, uwzględniający zarówno tarcie, jak i sprężysto – plastyczne deformacje powierzchni drewna.

Bierszadskij przeanalizował wyniki badań różnych autorów, również Kivimaa z 1950 roku i podaje, że dla ostrych ostrzy skrawających (promień zaokrąglenia krawędzi tnącej

r = 4 ÷ 8 μm), wartość współczynnika (μ_1) wynosi 2.

Bierszadskij podczas analizy sił działających w kierunku skrawania, zgodził się z ustaleniami Kivimaa na temat zależności na całkowity opór skrawania drewna (wzór 1). Wyodrębnił jednak dwa zakresy zależności sił skrawania **P** od grubości wióra $\boldsymbol{\Delta_z}$:

a) gdy $\boldsymbol{\Delta_z} > 0{,}1$ mm (obszar makrowiórów), wtedy siła skrawania zależy liniowo od grubości wióra;
b) gdy $\boldsymbol{\Delta_z} < 0{,}1$ mm (obszar mikrowiórów), wtedy nie zachodzi proporcjonalność siły skrawania od grubości wióra.

Siła P opisana jest równaniem (gdy $\boldsymbol{\Delta_z} > 0{,}1$ mm):

$$P = p + k \cdot \Delta_z \quad [N] \quad [6]$$

gdzie: $k = tg\varphi_1$ (rys. 8),

p – parametr stały, wartość którego otrzymamy w rezultacie przedłużenia prostej AB do strefy mikrowiórów (rys. 8).

Następnie Bierszadskij ustalił zależność siły P_o:

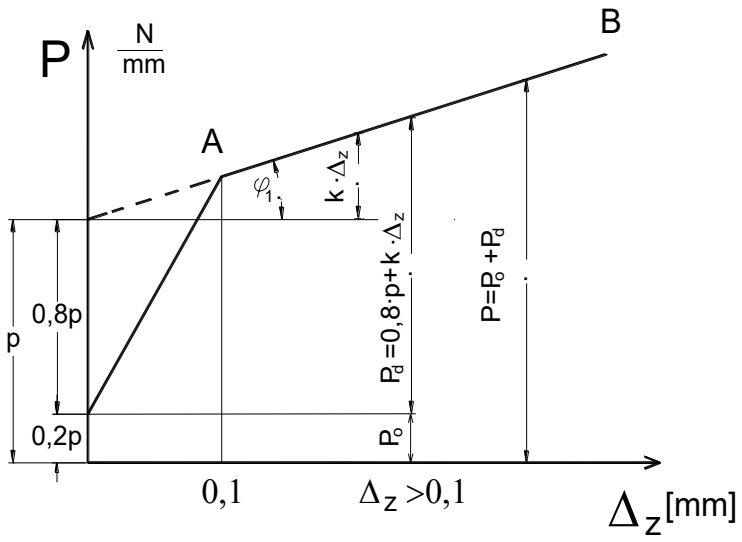
$$P_o = 0{,}2 \cdot p \quad [N] \quad [7]$$

a następnie biorąc pod uwagę 1 i 6:

$$P_d = 0{,}8\ p + k \cdot \Delta_z \quad [N] \quad [8]$$

Uzyskane w wyniku pomiarów wartości siły P dla różnych grubości skrawanego wióra Δ_z pozwalają wyznaczyć wartości parametrów p oraz k. Wartości te należy traktować jako parametry równania liniowego. Na podstawie zależności utworzonych przez

Bierszadskiego (od 4 do 8) można obliczyć wartości sił: P_o, P_d, Q_o, Q_d. Siły te działają podczas formowania wióra, co oznacza, że są to siły działające na elementarne ostrze skrawające.



Rys. 8. *Wykres zależności siły skrawania P od grubości wióra Δ_z wg Bierszadskiego*

W 1988 roku Orlicz podał kolejną wyrażającą opory skrawania:

$$P_s = k \cdot A = k \cdot b \cdot \Delta_z \qquad [N] \quad [9]$$

gdzie: P_s - siła skrawania, N;

k - jednostkowy opór skrawania, MPa;

A - powierzchnia przekroju poprzecznego wióra, mm^2;

Δ_z - grubość wióra, mm;

b - szerokość wióra, mm.

Jest to najprostszy sposób na szacowanie oporów skrawania. Jedyną trudnością przy zastosowaniu powyższego równania jest określenie dla danych warunków jednostkowego oporu skrawania.

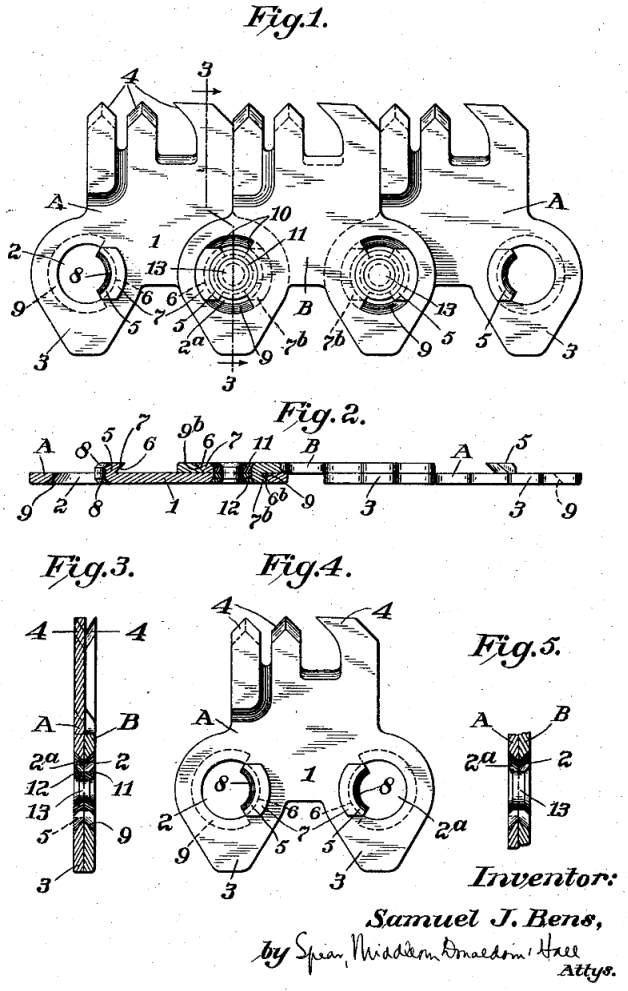
W 1978 roku Dmochowski zauważył, że występują znaczne różnice pomiędzy wynikami pomiarów bezpośrednich, a wartościami obliczonymi na podstawie teoretycznych zależności. Stwierdził, że te nieścisłości sprawiają, że w praktyce do wyznaczania sił działających na ostrze należy korzystać z danych doświadczalnych. Natomiast najbardziej dokładne wyniki uzyskane zostaną stosując wzory empiryczne, otrzymane w wyniku czasochłonnych badań laboratoryjnych uwzględniających wpływ wybranych czynników. Wzory te mają na ogół wąski zakres stosowania, ograniczony warunkami przeprowadzonych eksperymentów [Maciak 2001].

Skrawanie drewna ostrzem elementarnym posiada zweryfikowane podstawy teoretyczne, które można by stosunkowo łatwo odnieść do opisu narzędzi wieloostrzowych, ale o jednoznacznym położeniu zębów względem skrawanego drewna. Natomiast skrawanie drewna piłami łańcuchowymi jest procesem bardziej złożonym [Maciak 2013].

2.3 Budowa piły łańcuchowej oraz jej elementów

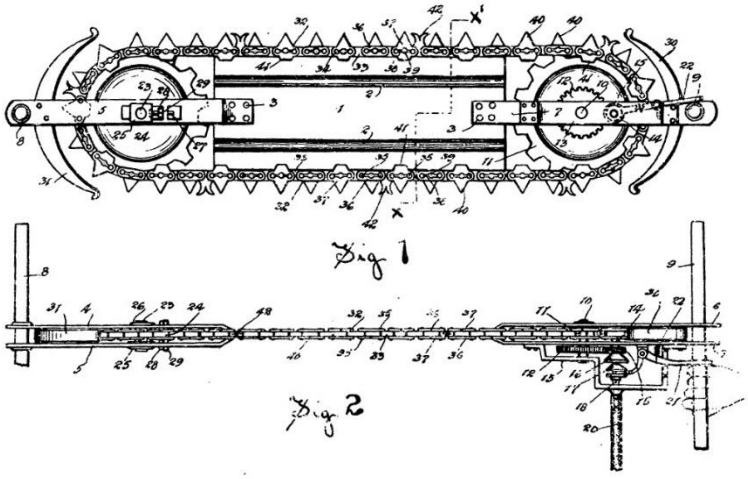
2.3.1 Historia pił łańcuchowych

Jako pierwszy patent na bezkońcową piłę łańcuchową (rys. 9) do cięcia drewna otrzymał Samuel J. Bens w 1905 roku. Jednak jego rozwiązanie nie zakładało wykorzystania przenośnej, ręcznej pilarki. Udało się to w 1918 roku Kanadyjczykowi James'owi Shand'owi, który opatentował piłę przenośną (rys. 10).



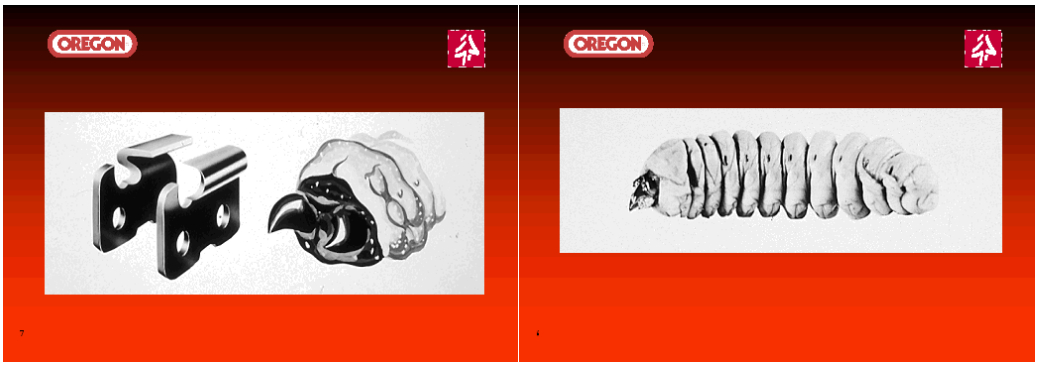
Rys. 9. *Rysunek piły łańcuchowej Bens'a [www.patents.google.com]*

Duży udział w rozwoju pił łańcuchowych miał Amerykanin Joseph Buford Cox. To on w 1947 roku wynalazł ogniwo tnące w obecnej formie w kształcie żłobika. Inspiracją dla wynalazcy był aparat tnący larw owadów – szkodników drewna z rodziny kózkowatych [www.oregon.pl] rys. 11. Do konstrukcji dodano dodatkową parę ogniw prowadzących
i łączących, dzięki czemu powstała współczesna trzyrzędowa piła łańcuchowa. Ogromną zaletą tego wynalazku jest umożliwienie skrawania drewna nie tylko poprzecznie, ale też wzdłuż włókien drewna [Tomczak, Jelonek, Grzywiński 2011].

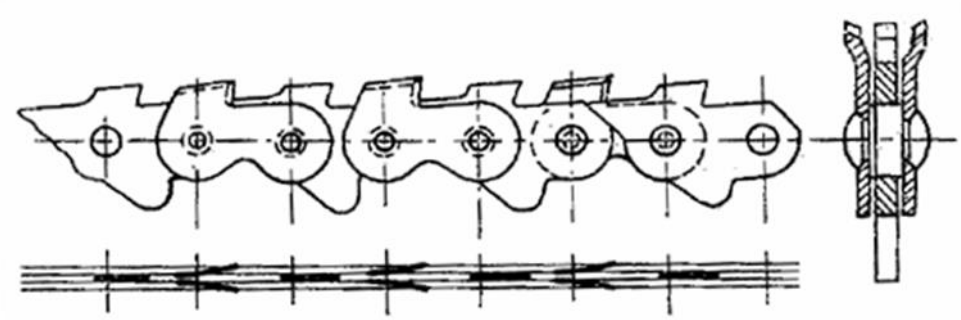


Rys. 10. *Schemat piły łańcuchowej Jamesa Shand'a [www.journals.lib.und.ca]*

Dawniej stosowano piły łańcuchowe z zębami klinowymi (rys 12). Jednak ich główną wadą było to, że umożliwiały skrawanie tylko poprzecznie do włókien drzewnych. Dlatego zostały wyparte przez piły z zębami typu żłobikowego. Budowa pił z zębami klinowymi w porównaniu do pił z zębami żłobikowymi jest bardziej złożona, a praca mniej wydajna [Strehlke 1976].

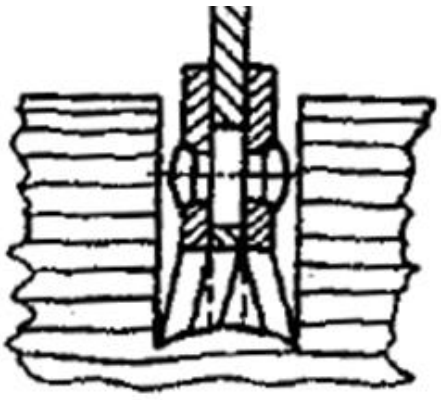


Rys. 11. *Larwa owada będąca inspiracją konstruktora ogniwa żłobikowego [Oregon]*

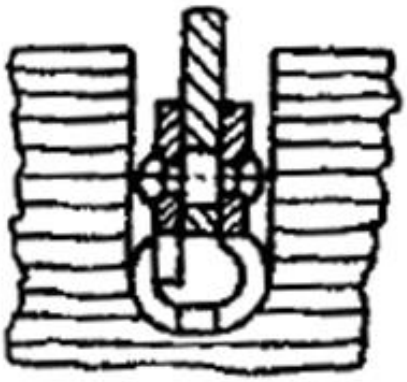


Rys. 12. *Piła łańcuchowa z zębami klinowymi rozmieszczonymi symetrycznie [Botwin 1979]*

Piła żłobikowa i klinowa różnią się rozmieszczeniem i ukształtowaniem zębów tnących. Piły z zębami klinowymi charakteryzują się profilem otwartym, a żłobikowe profilem zamkniętym. Na rysunku 13 i 14 przedstawiono różnice między profilami tych pił [Botwin 1979].



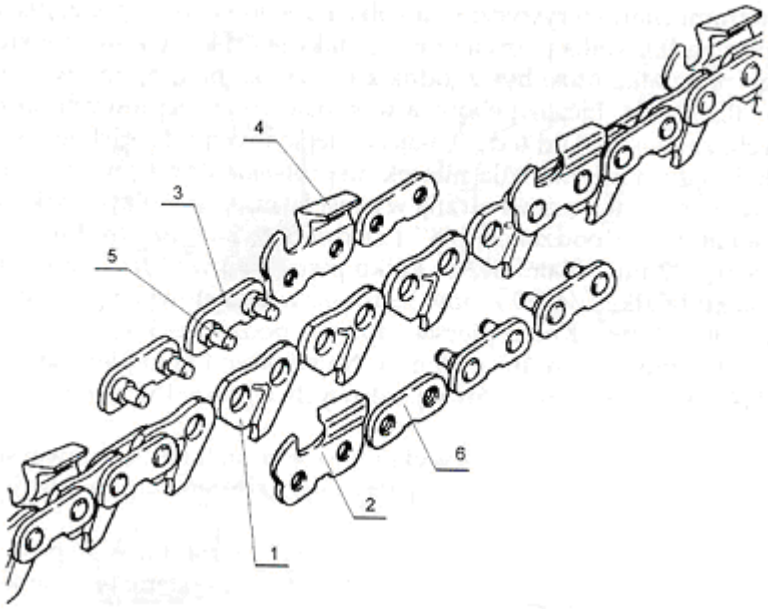
Rys. 13. *Profil otwarty zębów łańcuchowych tnących [Botwin 1979]*



Rys. 14. *Profil zamknięty zębów łańcuchowych tnących [Botwin 1979]*

2.3.2 Budowa piły łańcuchowej żłobikowej

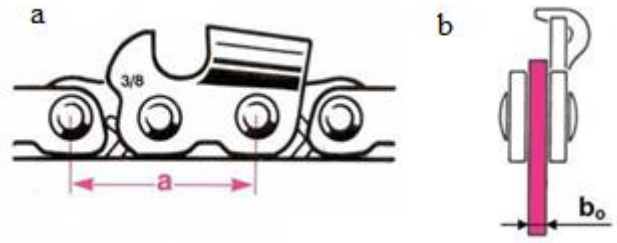
Na rysunku 15 przedstawiona jest ogólna budowa piły łańcuchowej. Piły łańcuchowe żłobikowe mają konstrukcję trzyrzędową. Piła łańcuchowa składa się z powtarzających się rzędów ogniw. Rząd środkowy zajmują ogniwa prowadzące, inaczej zwane napędowymi (1 rys. 15).



Rys. 15. *Budowa piły łańcuchowej: 1 – ogniwo prowadzące, 2 – ogniwo tnące lewe, 3 – ogniwo łączące prawe, 4 – ogniwo tnące prawe, 5 – nit, 6 – ogniwo łączące lewe [Więsik i inni 2005]*

Dolna część tych ogniw zazębia się z zębami kółka napędowego. Ogniwa te przenoszą siłę napędową na ogniwa tnące. Ich dodatkowym zadaniem jest zapewnienie równomiernego prowadzenia piły po prowadnicy, rozprowadzenia oleju smarującego na całej długości prowadnicy a także odpowiednie położenie podczas przerzynki. W rzędach zewnętrznych umieszczone są ogniwa tnące prawe i lewe (2 i 4 rys. 15) oraz ogniwa łączące (3 i 6 rys. 15) [Więsik i inni 2005]. Ze względu na kierunek wygięcia półki ogniwa tnące dzielimy na dwa rodzaje: ogniwo lewe z półką wygiętą w lewo natomiast ogniwo prawe w prawo. Między sąsiadującymi ze sobą ogniwami tnącymi znajdują się ogniwa łączące (3 i 6 rys. 15). Ich liczba zależy od rodzaju piły łańcuchowej. Dzielimy je na dwa typy: ogniwa łączące bez nitów oraz z nitami. Elementami łączącymi poszczególne elementy piły są nity (5 rys. 15). Wyróżniamy w nich część środkową oraz dwie części zewnętrzne, które podczas składania zostają zakuwane.

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi piły łańcuchowe są: podziałka *t* oraz grubość ogniwa prowadzącego b_0 (rys. 16).



Rys. 16. *Parametry piły: a- Odległość pomiędzy osiami co trzeciego nita, potrzebna do wyliczenia podziałki piły, b – grubość ogniwa prowadzącego [Maciak 2008]*

Podziałka piły łańcuchowej stanowi połowę odległości pomiędzy osiami co trzeciego nita. Można ją zapisać w postaci zależności:

$$t = \frac{a}{2} \qquad \text{[cale]} \quad [10]$$

gdzie: t – podziałka piły [cale],

a – odległość pomiędzy osiami co trzeciego nita [cal].

Wartość podziałki podawana jest w calach. W pilarkach przenośnych najczęściej stosowane są piły o podziałce 0,325 cala oraz 3/8 cala [www.oregon.pl]. Wartość grubości ogniwa prowadzącego podawana jest w milimetrach lub calach i zawiera się w granicach od 1,1 do 1,6 mm. Najczęściej stosowane grubości ogniwa prowadzącego:

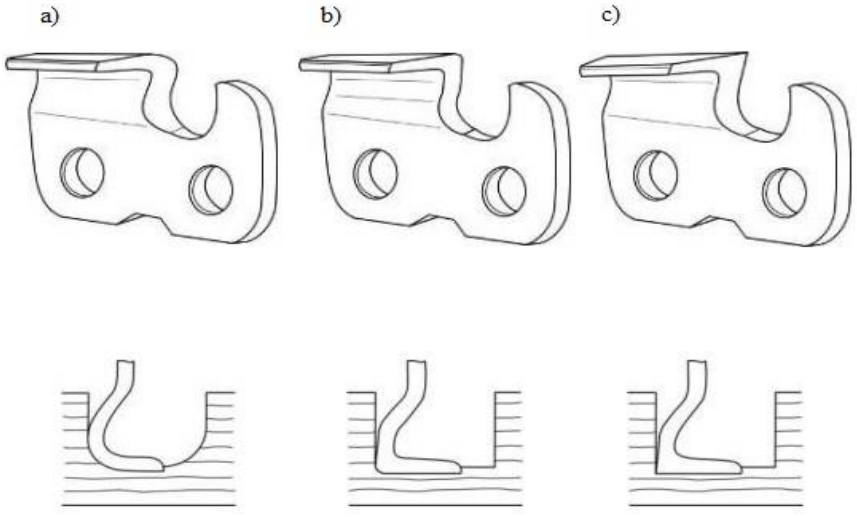
1,3 mm (0,050 cala), 1,5 mm (0,058 cala) oraz 1,6 mm (0,063 cala). Ogniwa o grubości 1,3 mm są stosowane w piłach niskoprofilowych.

Innym parametrem charakterystycznym piły jest szerokość ogniwa tnącego, jest on ważny ze względu na wartość siły skrawania i odpowiednie zapotrzebowanie mocy do napędu piły [Więsik J. i in. 2005].

Stop chromu, niklu i wanadu jest najczęściej stosowanym materiałem do produkcji ogniw pił łańcuchowych. Dodatkowa warstwa chromowana na zębach tnących, zwiększa trwałość elementów najbardziej narażonych na uszkodzenia [Więsik J i in. 2005, Tomczak, Jelonek, Grzywiński 2012].

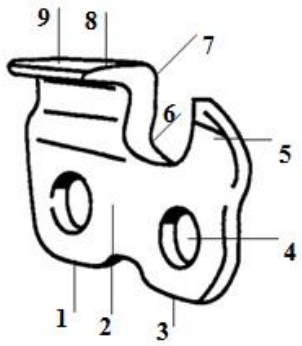
2.3.3 Budowa ogniwa tnącego

Skrawanie drewna wykonywane jest bezpośrednio przez ostrza pionowe i poziome umiejscowione w górnej części ogniwa tnącego [Więsik i inni 2005, Maciak 2013]. Wyróżniamy trzy rodzaje ogniw tnących: standard, półdłuto i dłuto (rys 17). Ich wyróżnikiem jest promień wygięcia półki zęba tnącego, który łączy ostrze pionowe z poziomym. Ogniwo tnące typu standardowego charakteryzuje się dużym promieniem łączącym ostrze pionowe z poziomym, który wynosi około 3,5 mm. W ogniwach typu półdłuto ostrza połączone są nieco mniejszym promieniem wynoszącym 1,4 mm. Ogniwo typu dłuto łączy ostrza narożem [Maciak 2001]. Więcej o wpływie typu ogniwa na wydajność skrawania w rozdziale 2.6.2.



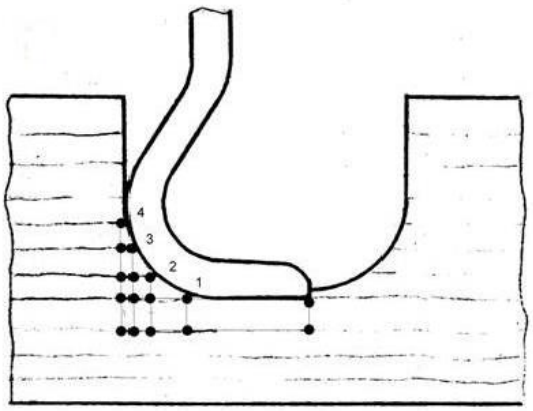
Rys. 17. *Trzy typy ogniw tnących oraz sposób skrawania drewna przez te ogniwa a) ząb typu standard, b)ząb typu półdłuto, c)ząb typu dłuto [www.atj-sc.pl]*

Na rysunku 18 przedstawiona jest ogólna budowa ogniwa żłobikowego. Konstrukcja żłobikowa to sposób połączenia ostrza pionowego (7 rys. 18), poziomego (8 rys. 18) oraz znajdującego się w przedniej części ogniwa ogranicznika grubości wióra. Ogranicznik grubości wióra (5 rys. 18) stabilizuje ogniwo tnące w rzazie. Pomiędzy ogranicznikiem a ostrzami znajduje się wrąb (6 rys. 18), który jest odpowiedzialny za gromadzenie wiórów.

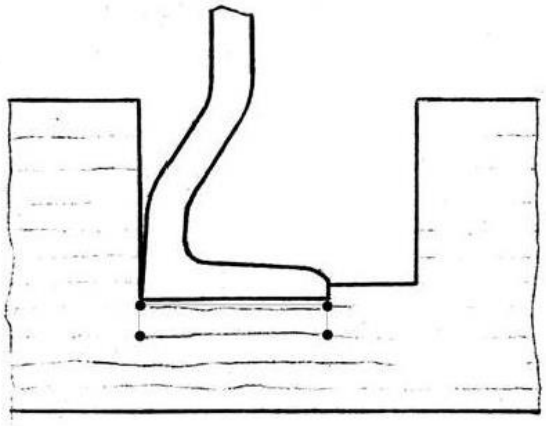


Rys. 18. *Budowa ogniwa żłobikowego: 1 – piętka ogniwa, 2 – korpus ogniwa, 3 – stopka ogniwa, 4 – otwór na nit, 5 – ogranicznik grubości wióra, 6 – wrąb, 7 – ostrze pionowe, 8 – ostrze poziome, 9 – półka [www.atj-sc.pl]*

W korpusie ogniwa tnącego znajdują się dwa otwory na nity (4 rys. 18) , a spód ogniwa jest zakończony stopką (3 rys. 18) oraz piętką (1 rys. 18). Współcześnie taki typ ogniwa stosowany jest najczęściej [Tomczak, Jelonek, Grzywiński 2012].



Rys. 19. *Sposób skrawania drewna przez ząb standardowy [Więsik i inni 2005]*

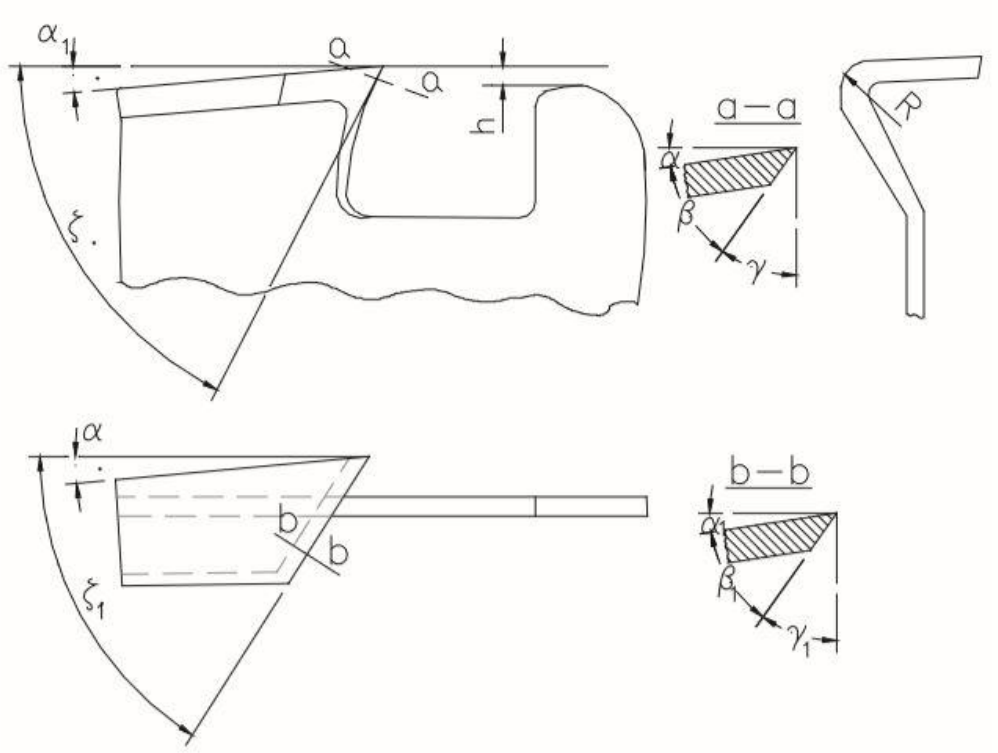


Rys. 20. *Sposób skrawania drewna przez ząb typu dłuto [Więsik i inni 2005]*

Największego nakładu energii podczas skrawania drewna wymagają ogniwa typu standardowego. Jest to skutkiem potrzeby kilkukrotnego przecinania tych samych włókien drewna, co wpływa negatywnie na wydajność skrawania. Podobnie dzieje się w przypadku skrawania zębami typu półdłuto, natężenie tego zjawiska jest jednak w tym przypadku mniejsze. Ogniwa typu dłuto przecinają włókna drewna tylko jeden raz [Więsik i inni 2005]. Natomiast ogniwa typu dłuto, są najbardziej podatne spośród innych typów ogniw na uszkodzenie przez zanieczyszczenia i zabrudzenia, np. piasek, występujące w przerzynanym drewnie lub w jego otoczeniu. Porównanie sposobu skrawania różnymi typami zębów przedstawiono na rysunku 19 i 20.

Jeden z wiodących producentów pił łańcuchowych firma Oregon zapewnia, że piły łańcuchowe typu dłuto wraz z ogniwami redukującymi odbicie zapewniają wysoką wydajność skrawania. Ze względu na profil ogniwa tnącego producent zaleca ją do cięcia czystego, niezabrudzonego piaskiem bądź ziemią drewna. Piły z ogniwami typu półdłuto są bardziej odporne na zanieczyszczenia pozostające na powierzchni drewna [www.oregon.pl].

W sprzedaży dostępne są również piły żłobikowe z krawędziami tnącymi wykonanymi z materiałów ceramicznych. Przeznaczone są one do cięcia drewna zanieczyszczonego piaskiem.



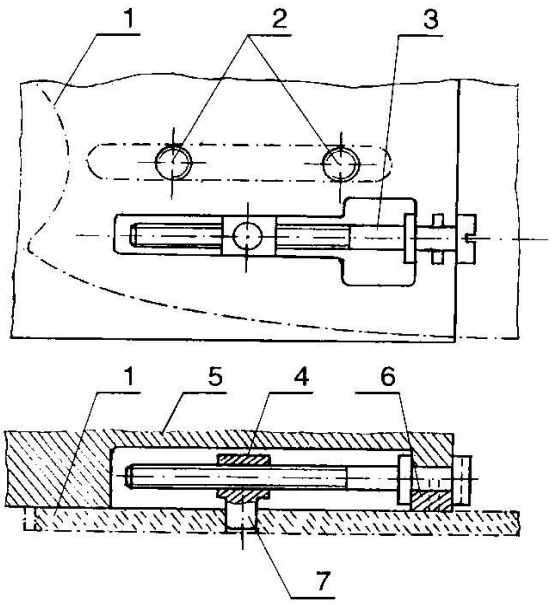
Rys. 21. *Geometria ogniwa żłobikowego:* ***h*** *− zniżenie ogranicznika,* ***R*** *– promień łączący krawędzie tnące ostrzy pionowego i poziomego,* ***α*** *− kąt przyłożenia ostrza pionowego,* ***β*** *− kąt ostrza pionowego,* ***γ*** *− kąt natarcia ostrza pionowego,* ***ξ*** *− kąt nachylenia krawędzi tnącej ostrza pionowego,* ***α₁*** *− kąt przyłożenia ostrza poziomego,* ***β₁*** *− kąt ostrza poziomego,* ***γ₁*** *− kąt natarcia ostrza poziomego,* ***ξ₁*** *− kąt nachylenia krawędzi tnącej ostrza poziomego [Maciak 2000]*

Krawędzie tnące pionowe oraz poziome posiadają charakterystyczne kąty (rys. 21). W geometrii każdej krawędzi tnącej wyróżniamy cztery charakterystyczne kąty: przyłożenia (α, α_1), zaostrzenia (β, β_1), natarcia (γ, γ_1) oraz nachylenia (ξ , ξ_1). Indeks $_1$ odnosi się do kątów ostrza poziomego. Symbolem h oznacza się wartość zniżenia ogranicznika posuwu. Kąt nachylenia ostrza pionowego ξ dla ogniwa typu dłuto wynosi 60º a półdłuta 85º. Kąt nachylenia ostrza poziomego ξ_1 dla dłuta wynosi 65º a dla półdłuta 55-60º. W obydwu przypadkach kąt natarcia γ i γ_1 ostrza pionowego wynosi 30º [Maciak 2000].

Istotnym parametrem ogniwa tnącego jest odległość w płaszczyźnie pionowej od krawędzi tnącej poziomej do najwyższego punktu ogranicznika grubości wióra h. Jest ona określana mianem zniżenia ogranicznika grubości wióra. Wartość ta powinna mieścić się w przedziale 0,5 mm÷0,7 mm dla ogniw tnących typu półdłuto oraz 0,65 mm dla ogniw tnących typu dłuto [Więsik 2001].

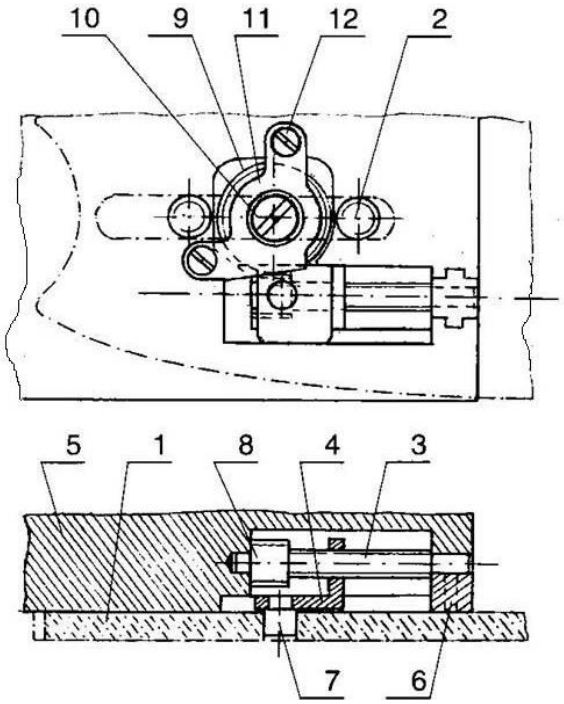
2.3.4 Urządzenie napinające piłę

Urządzenie napinające piłę ma za zadanie podniesienie wydajności skrawania poprzez odpowiednie napięcie wstępne piły łańcuchowej. Gdy piła łańcuchowa jest zbyt luźna następuje spadek powierzchniowej wydajności skrawania (więcej w rozdziale 2.6.4). Natomiast przy zbyt dużym napięciu powstają większe opory ruchu piły po prowadnicy [Maciak 2001].



Rys. 22. *Urządzenie napinające czołowe: 1- prowadnica, 2 – śruby mocujące prowadnicę, 3 - śruba napinająca 4 – nakrętka, 5 – korpus silnika, 6 – nakładka, 7 – zaczep [Więsik i inni 2005]*

W pilarkach stosowane są różne rodzaje urządzeń napinających. Dawniej najczęściej stosowano urządzenie czołowe przedstawione na rys 22. Obecnie coraz częściej spotyka się w pilarkach boczne urządzenie do napinania (rys. 23). Boczne usytuowanie śruby napinającej w tym urządzeniu ułatwia napinanie. W mniejszych pilarkach amatorskich niekiedy montowane jest urządzenie do napinania które nie wymaga użycia narzędzi a napinanie odbywa się ręcznie za pomocą pokrętła.



Rys. 23. *Urządzenie napinające boczne z przekładnią zębatą: 1 – prowadnica, 2 – śruby mocujące prowadnicę, 3 – śruba napinająca, 4 – nakrętka, 5 – korpus silnika, 6 – nakładka,*
7 – zaczep, 8 – koło zębate napędzane, 9 – koło zębate napędowe, 10 – wał koła napędowego, 11 – obsada koła napędowego, 12 – śruby mocujące obsadę [Więsik i inni 2005]

Ocenę prawidłowego napięcia piły musi dokonać operator. W instrukcjach napisane jest, że prawidłowo napięta piła powinna dać się odciągnąć na ok. 1 cm oraz dać się przesuwać ręką po bieżni prowadnicy [Husqvarna instrukcja obsługi]. Norma PN – ISO 6535 określa wymagania dotyczące prawidłowego napięcia piły łańcuchowej. W normie jest zapis, że piła jest napięta prawidłowo, wówczas gdy po zawieszeniu na pile w połowie długości prowadnicy, przy poziomym jej ustawieniu, masy 1 kg, odchylenie ogniw Δy od prowadnicy będzie wynosić $\Delta y \leq 0{,}017$ L (gdzie L – długość prowadnicy w mm). Jednak z doświadczeń badaczy wynika [Bieńkowski 1993, Górski 1996b, Maciak 2001, Gendek 2005] że, tak wyznaczone napięcie piły jest zbyt małe aby uzyskać optymalną wydajności skrawania drewna. Najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie się do instrukcji używanej piły [Więsik i inni 2005]. Podczas pracy w rzazie, napięcie piły ulega zmianie. Jest to spowodowane naturalnym zużywaniem się elementów układu tnącego, zmianą temperatury prowadnicy a także samej piły [Więsik i inni 2005]. Dlatego zastosowanie optymalnego napięcia piły jest zadaniem bardzo trudnym, które wymaga dużego doświadczenia od operatora.

2.4 Przebieg skrawania drewna piłami łańcuchowymi

Skrawanie drewna piłami łańcuchowymi jest procesem złożonym i nadal nie do końca poznanym. Piła łańcuchowa żłobikowa od innych narzędzi tnących różni się wieloostrzową budową ogniw tnących, sposobem połączenia zębów oraz ich prowadzenia w rzazie, sposobem przeniesienia napędu na urządzenie tnące jak również samym napędem urządzenia. Ostrza piły mają bardziej skomplikowaną budowę niż inne narzędzia wieloostrzowe.

Jedno z ostrzy ogniw piły łańcuchowej wykonuje skrawanie poprzeczne, natomiast drugie prostopadłe do włókien. Natomiast całe ogniwo, które jest elementem cięgna, podczas wykonywania procesu skrawania zmienia ustawienie kątowe w płaszczyźnie rzazu zależnie od działających na niego sił [Rulko, Matuszkin 1970, Uspienski 1973, Górski 1995]. Dowodem na to jest także szybsze zużywanie się piętki niż stopki ogniwa (nierównomierne zużycie dolnych elementów ogniwa tnącego) [Więsik 1990]. Wielkości kątów ustawienia ogniwa tnącego w rzazie zależą od wstępnego napięcia piły, stąd podejmowane przez badaczy próby ustalenia jego optymalnej wielkości [Botwin J. i Botwin M. 1979, Rulko i Matuszkin 1970, Uspienski 1973, Górski 1996b]. Zbyt mocne wstępne napięcie piły zwiększa straty tarcia piły po prowadnicy.

Wszystkie elementy piły mają swobodę ruchu względem osi nitów. Dzięki czemu podczas skrawania poszczególne ogniwa piły zachowują swobodę przemieszczania się w płaszczyźnie rzazu w pozycji pionowej i poziomej, która jest uwarunkowana przez różne warunki pracy [To, Doi, Yokoyama 1967]. Jest to istotna właściwość odróżniająca piły łańcuchowe od innych pił takich jak piły tarczowe lub taśmowe, które mają sztywną konstrukcję. Górski w 2001 roku stwierdził, że skrawanie drewna ma charaktery przerywany. Przebieg procesu zależy od wysokości rzazu i gatunku drewna [Górski 2001]. Skrawanie ciągłe występowało podczas skrawania drewna bukowego do 35 mm wysokości rzazu oraz sosnowego do 60 mm wysokości rzazu. Dla większych wartości skrawanie było przerywane [Górski 2001]. W trakcie skrawania pilarką spalinową, ogniwo tnące zmienia swoje położenie kątowe w bardzo dynamiczny sposób, a także chwilowo ogniwa tracą kontakt z bieżnią prowadnicy [Maciak 2013]. Nadal nie do końca poznano wpływ czynników mających wpływ na sposób pracy i wychylania się ogniw w płaszczyźnie rzazu. Wykazano, że na sposób pracy ogniw na pewno ma wpływ napięcie wstępne piły oraz zadana siła posuwu [Maciak 2013]. Wzrost siły posuwu zmniejsza

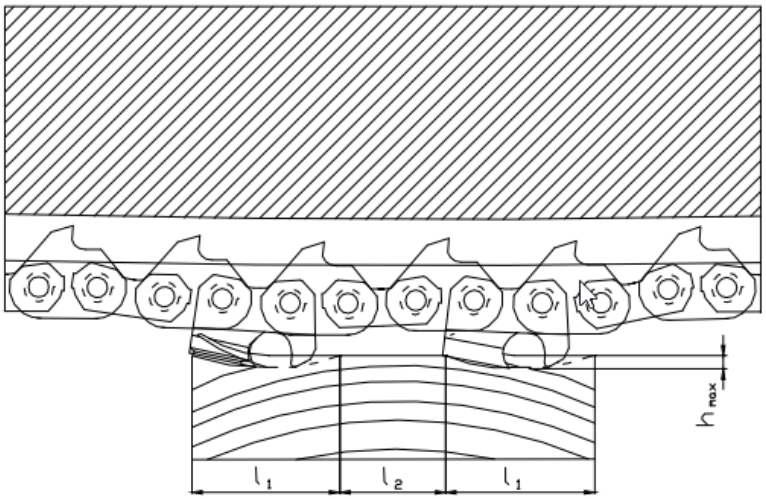
nieciągłość skrawania. Natomiast wraz ze zmniejszającą się siłą posuwu występuje więcej przerw w procesie skrawania. Nieciągłość procesu skrawania w znacznym stopniu wpływa na efektywność pracy pilarką spalinową. Czas faktycznego skrawania drewna piłą łańcuchową jest proporcjonalny do zadanej siły posuwu i odwrotnie proporcjonalny do prędkości obrotowej silnika pilarki [Maciak, Kubuśka, Moskalik 2018].

Dodatkowym czynnikiem jest fakt dużej zmienności chwilowej prędkości obrotowej wału silnika w różnych fazach jego pracy. W fazie spalania mieszanki prędkość ta będzie wzrastała. Natomiast podczas fazy wymiany ładunku będzie malała [Wajand 1993].

Rodzaj silnika napędowego ma istotny wpływ na przebieg procesu skrawania i jego efektywność. W przypadku zastosowania do napędu silnika elektrycznego to może być proces ciągły [Maciak 2013].

Przebieg procesu skrawania drewna piłą łańcuchową został przedstawiony na rysunku 24. Zgodnie z klasyfikacją Kaczmarka z 1970 roku jest to skrawanie przerywane. Skrawanie przerywane polega na tym, że ostrza tnące okresowo zagłębiają się i wygłębiają z obrabianego materiału. Ogniwo może zagłębić się w drewnie na maksymalną wysokość h_{max}, która jest jednocześnie maksymalną grubością wióra, powstającego podczas skrawania. Wysokość ta determinowana jest przez ogranicznik grubości wióra. Wszystkie ogniwa tnące podczas skrawania zagłębiają się w drewno jednocześnie oraz wszystkie jednocześnie wygłębiają się z rzazu. Rysunek 24 przedstawia pracę ogniwa zagłębionego w rzazie. Ich wygłębienie następuje po osiągnięciu pewnej maksymalnej grubości wióra h_{max}. Zagłębione ogniwo pokonuję drogę l_1 w dnie rzazu, która jednocześnie determinuje długość skrawanego wióra. Wartość l zależy od czasu skrawania oraz prędkości piły łańcuchowej [Maciak 2013].

Ogniwa podczas pracy w rzazie wychylają się w płaszczyźnie rzazu. Kąt wychylenia ogniw tnących piły łańcuchowej żłobikowej podczas skrawania drewna zawiera się w granicach od 1,2º do 3,4º. Wartość kąta jest mniejsza, im: większa jest odległość między ostrzami tnącymi a ogranicznikiem grubości wióra, niższa konstrukcja ogniwa, większa powierzchnia styku ogranicznika posuwu z drewnem i większa siła posuwu [Maciak 2001].



Rys. 24. *Przebieg procesu skrawania drewna piłą łańcuchową: hmax – maksymalne grubość wióra, l_1 – droga przebyta przez ogniwo zagłębione w drewnie, l_2 – droga przebyta przez ogniwo wgłębione [Maciak 2013]*

Nie do końca poznany jest też sposób kształtowania wiórów przez piłę łańcuchową. Każde z ogniw piły zajmuje nieco więcej niż połowę szerokości rzazu. Koczegarow w 1970 roku stwierdził, że zarówno lewe jak i prawe ogniwo tnące skrawa oddzielne wióry, ponieważ są one przesunięte względem siebie. Teorię tą w 1977 roku potwierdził także Łukomski. Dodatkowo zaobserwował, że skrawanie drewna piłą łańcuchową wymaga dostatecznej wartości siły posuwu. Ciągłość procesu skrawania może być zachwiana przez zbyt małą siłę posuwu, co jest wynikiem tego że proces skrawania przebiega w sposób nieustalony. Temu zjawisku sprzyja skrawanie przy dużej wysokości rzazu, gdzie zamiast skrawania następuje zgniatanie i rozrywanie włókien drewna, co jest przyczyną powstawania śladów zwęglania drewna i szybkiego tępienia się ostrzy tnących [Łukomski 1977].

Kolejną różnicą pił łańcuchowych w stosunku do innych pił jest to, że ogniwo tnące posiada ogranicznik grubości wióra niezbędny do prawidłowej pracy piły. Ogranicznik podczas pracy powoduje odkształcenie drewna [Górski 1996a]. Badania wpływu kształtu ogranicznika i jego wysokości na efekty procesu skrawania prowadziło wielu badaczy [Ciesielczuk 1973, Łukomski 1977, Górski 1996a, Maciak 2000]. Kształt oraz zniżenie ogranicznika grubości wióra ma bardzo duży wpływ na proces skrawania piłą łańcuchową. W 1973 roku Ciesielczuk stwierdził, że grubość skrawanego wióra przez ostrze poziome ogniwa tnącego jest równa zniżeniu ogranicznika. W późniejszych latach wielu badaczy zaprezentowało inną teorię [Łukomski 1977, Górski 1996a]. Łukomski w 1977 stwierdził, że wartość zniżenia ogranicznika nie określa wprost

grubości wióra, pomimo że z całkowitą pewnością wpływa na warunki pracy ostrza i efekty skrawania. Ostatecznie Górski (1996b) oraz Maciak (2000) potwierdzili, że kształt ogranicznika grubości wióra ma istotny wpływ na zagłębienie w drewno oraz na opory przemieszczania się po powierzchni drewna.

Wszystkie wyżej wymienione czynniki powodują, że powiązanie teorii skrawania ostrzem elementarnym ze skrawaniem piłą łańcuchową napędzaną silnikiem spalinowym jest niezwykle trudne.

Podczas analizy badań przebiegu zmian zauważono, że wartość siły skrawania okresowo spada do 0 N. Co potwierdza teorię o nieciągłości skrawania [Maciak 2013, Orłowski 2016]. Nieciągłość procesu skrawania opisywano współczynnikiem czasu zagłębiania ostrzy [Maciak 2013]. Współczynnik ten określa sumę rzeczywistych czasów zagłębienia ostrzy w rzazie do czasu całkowitego wykonania danej powierzchni. Wartość współczynnika czasu zagłębienia ostrzy dla piły z ogniwami typu dłuto rośnie wraz ze zwiększającą się siłą posuwu [Orłowski 2016].

2.5 Modele skrawania drewna piłami łańcuchowymi

Opracowane dotychczas modele skrawania piłą łańcuchową zakładają w większości, że jest to proces ciągły.

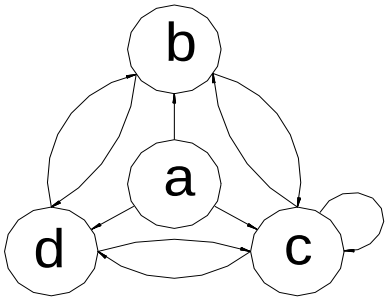
Prosty model, który umożliwiał obliczanie sił działających na piłę łańcuchową z posuwem mechanicznym oraz zapotrzebowania mocy do jej napędu opracował Toporov w 1991.

W 1994 roku Więsik opracował model symulacyjny, który stanowił próbę teoretycznego opisu procesu skrawania drewna pilą łańcuchową przy założeniu stałych warunków pracy, miał on na celu określić grubość wióra, obciążenie układu napędowego piły oraz wydajność skrawania. Graf stworzony przez Więsika był podstawą do stworzonych przez innych autorów modeli matematycznych.

Model ten oparty jest na czterech elementach, które są konieczne do przeprowadzenia procesu skrawania i są to: drewno a, piła b, układ napędowy piły c i układ sterujący d. W przypadku pilarek przenośnych rolę układu sterującego spełnia operator pilarki. Zbiór tych elementów jest następujący: $J = \{a, b, c, d\}$.

Na rysunku 25 przedstawiony jest schemat, który opisuje relacje pomiędzy poszczególnymi elementami modelu. Każdy z elementów opisany został określonymi

cechami. Relacje między nimi można opisać odpowiednimi wzorami matematycznymi, które umożliwiają obliczenie grubości wióra, wydajności czy mocy efektywnej niezbędnej
do wykonania procesu skrawania.



Rys. 25. *Graf modelu relacyjnego procesu skrawania drewna piłą łańcuchową [Więsik 1994]*

Jednak model ten nie został zweryfikowany przez autora. Aby zastosować go w praktyce należy uwzględnić istotne korelacje jak np. oporów ruchu ogranicznika grubości wióra i jego kształtu na zmianę oporów piłowania, czy zmiany napięcia piły podczas skrawania drewna [Górski 1996a].

W 1995 roku matematyczną formułę położenia ostrza tnącego piły łańcuchowej w rzazie przedstawił Górski. W swoim opisie matematycznym uwzględnił odkształcenie drewna przez ogranicznik grubości wióra, wykazując jego istotny wpływ na efekty skrawania. Swoje rozważania na ten temat sformułował w kolejnych badaniach rok później dokonując oceny wpływu właściwości drewna na wielkość jego zagłębiania i kształtowania grubości wióra przez ząb żłobikowy [Górski 1996a]. Ten model procesu skrawania drewna zawiera znaczne uproszczenia, np. nie uwzględnia charakterystyki układu napędowego, co powoduje że może być wykorzystany w ograniczonym zakresie. Górski opracował model matematyczny umożliwiający szacowanie wartości sił działających na piłę łańcuchową od drewna [Górski 1996b]. Model zakładał ciągłość procesu skrawania, a do jego sprawdzenia wykorzystał pilarkę elektryczną. Stwierdził, że założenie ciągłości skrawania jest wiarygodne tylko dla wysokości rzazu rzędu 40 mm oraz zauważył, że wraz ze wzrostem wysokości rzazu pojawiają się zjawiska dynamiczne zakłócające przebieg procesu skrawania [Górski 2001].

Maciak w 2001 roku stworzył model w którym zakładał, że ogniwa tnące w trakcie pracy odchylają się w płaszczyźnie rzazu. Obliczył, że kąt wychylenia ogniw tnących piły łańcuchowej żłobikowej podczas skrawania drewna zawiera się w granicach od 1,2° do 3,4°. Wartość kąta jest mniejsza, im: większa jest odległość między ostrzami tnącymi a ogranicznikiem grubości wióra, niższa konstrukcja ogniwa, większa powierzchnia styku ogranicznika grubości wióra z drewnem i większa siła posuwu [Maciak 2001]. Ustalił również, że wraz ze wzrostem napięcia wstępnego rośnie grubość wióra oraz wydajność. Te ostatnie ustalenia potwierdził po przeprowadzeniu badań skrawania na stanowisku badawczym. Jego model zakładał ciągłość procesu skrawania.

Przed przystąpieniem do analizy układu obrabiarka – przedmiot obrabiany-narzędzie (OPN) należy dokonać wyboru jednego z trzech rodzajów modeli [Gawlik, Harasymowicz 1990] Pierwszy rodzaj zakłada, że układ OPN złożony jest z ciał sztywnych, nie występują luzy i w każdej chwili spełnione są warunki równowagi statycznej. Kolejny rodzaj elementy składowe traktuje jako ciała odkształcalne ale zakłada, że w każdej chwili spełniony jest warunek statycznej równowagi. Większość autorów przyjmowała właśnie ten rodzaj modelu przy analizie pracy pił łańcuchowych. Jest jeszcze trzeci rodzaj modelu uwzględniający dynamiczne działanie sił bezwładności mas oraz drgania samowzbudne. Na podstawie najnowszych ustaleń związanych z przebiegiem procesu skrawania to właśnie ten ostatni rodzaj modelu należałoby przyjmować podczas analizy pracy piły łańcuchowej.

2.6 Wpływ wybranych czynników na efekty skrawania

Powierzchniowa wydajność skrawania jest głównym wskaźnikiem, który umożliwia ocenę efektywności pracy pił łańcuchowych [Orlicz 1988]. Parametr ten definiowany jest jako powierzchnia boczna rzazu, która powstaje w jednostce czasu [Górski 1993]. Obliczamy go jako iloraz powierzchni wykonanego rzazu do czasu jego wykonania. Najważniejszymi parametrami mającymi wpływ na powierzchniową wydajność skrawania piłą łańcuchową są: parametry silnika pilarki oraz jego zewnętrzna charakterystyka, typ i geometria ogniwa tnącego, stępienie krawędzi tnącej, właściwości obrabianego drewna, kierunek skrawania względem włókien, napięcie wstępne piły łańcuchowej oraz jej rodzaj, konstrukcja oraz wymiary piły, wartość zadanej siły posuwu oraz wysokość rzazu. Zarówno napięcie wstępne piły oraz wartość siły posuwu są

parametrami, na który wpływ ma operator [Maciak, Kubuśka 2018]. Przyjętą w literaturze jednostką powierzchniowej wydajności skrawania jest $cm^2 \cdot s^{-1}$. [Więsik i inni 2005].

W roku 1979 Botwin J. i Botwin M. określili, że zakres powierzchniowej wydajności skrawania wynosi od 20 do 90 $cm^2 \cdot s^{-1}$. W późniejszych publikacjach wartości tego parametru zmieniły się. Górski w 1993 otrzymał wydajności od 25 do 95 $cm^2 \cdot s^{-1}$. Na zmianę tę wpłynęły nowe rozwiązania zastosowane w konstrukcji pił. Obecnie pilarki osiągają wydajności skrawania maksymalnie do 120 $cm^2 \cdot s^{-1}$ [Maciak 2013]. Skrawając drewno gatunków miękkich osiągane są wyższe wydajności skrawania. Na twardość drewna bezpośredni wpływ ma masa właściwa i wilgotność [Laurow, Kubiak 1994].

Na uzyskiwane efekty skrawania bardzo duży wpływ ma operator pilarki. Podczas pozyskiwania drewna napotyka on na zróżnicowane warunki robocze. Powierzchniowa wydajność skrawania zależy także od jego umiejętności i decyzji m.in. jaką nada siłę posuwu pile, jaki poziom napięcia piły dobierze oraz jaką ustali wysokość rzazu. Wysoką wydajność uzyska tylko wówczas kiedy dobrze dobierze te elementy znając właściwości pilarki oraz mając doświadczenie w pracy z pilarką [Gendek 2006]. Negatywny wpływ na efekty skrawania może mieć zarówno zbyt małe jaki zbyt wysokie napięcie wstępne. Zbyt małe powoduje wzrost możliwości odchylania się ogniw w płaszczyźnie rzazu i efekcie spadek uzyskiwanej wartości powierzchniowej wydajności skrawania. Zbyt silne napięcie powoduje wzrost strat związanych z tarciem piły o prowadnice. Co stwierdzono podczas badań prowadzonych kamerą termowizyjną [Maciak 2009].

Pilarki profesjonalne mają możliwość regulacji intensywności smarowania układu tnącego, zależnie od długości prowadnicy, rodzaju drewna oraz temperatury otoczenia. To kolejny czynnik zależny od operatora pilarki. Wraz ze spadkiem intensywności smarowania, wzrasta temperatura układu tnącego [Nordfiell, Johanson 2007]. Co świadczy o zwiększonych stratach mocy na tarcie piły po prowadnicy. Badacze stwierdzili, że w przypadku niewłaściwego smarowania, zapotrzebowanie na moc wzrasta o 15 do 20% [Botwin J. i Botwin M. 1979].

2.6.1 Typ ogniwa tnącego oraz geometria ostrzy

Najważniejszymi parametrami geometrycznymi ogniwa tnącego są: zniżenie ogranicznika grubości wióra, promień łuku łączącego ostrze poziome z pionowym, charakterystyczne kąty ostrzy ogniwa tnącego a także stopień zaokrąglenia krawędzi

tnącej (określający stopień stępienia piły). Promień łuku łączącego ostrze poziome z pionowym zależy od rodzaju piły. Na zniżenie ogranicznika grubości wióra oraz kąty ostrzy użytkownik ma wpływ podczas obsługi i ostrzenia ogniw tnących piły [Maciak 2001]. Użytkownik ma również wpływ na stopień zaokrąglenia krawędzi tnącej poprzez odpowiednio częste ostrzenie piły.

Typ ogniwa tnącego jest dość znaczącym parametrem wpływającym na powierzchniową wydajność skrawania. Ogniwa typu dłuto charakteryzują się większą wydajnością skrawania w porównaniu do ogniw typu półdłuto dla gatunków drewna twardego o dużej gęstości. Natomiast ogniwa typu półdłuto osiągają lepszą wydajność niż ogniwa typu dłuto dla gatunków drzew miękkich o małej gęstości [Kozłowski 2003]. Spadek powierzchniowej wydajności skrawania, wraz ze zużywaniem się krawędzi tnących,
jest znacząco szybszy podczas skrawania piłą z ogniwami typu dłuto, niż z półdłuto [Maciak, Górska, Zach 2017]. Badania [Górski 1996b] potwierdziły, że piła łańcuchowa z ogniwami typu dłuto charakteryzuje się większą sprawnością podczas skrawania drewna niż piła z ogniwami typu półdłuto.

Na wydajność skrawania ma duży wpływ geometria ostrzy tnących. Zagadnieniem tym zajmowali się m.in. Łukomski w 1980 roku oraz Komorowski w 1987 roku. Zwiększenie wartości kąta natarcia ostrzy tnących piły łańcuchowej powoduje zwiększenie powierzchniowej wydajności skrawania [Komorowski 1987]. Przy zmianie wartości kątów w zakresie 70-60° oraz 50-40° wzrost wydajności jest wyraźny. Natomiast w zakresie 60-50° wzrost wydajności jest niewielki [Komorowski 1987]. Autor stwierdził także, że piła łańcuchowa o kącie natarcia 35° w trakcie pracy wykazała najmniejszy spadek powierzchniowej wydajności skrawania wraz ze wzrostem zużycia krawędzi tnących.

Stempski i Grodecki w 1998 przeprowadzali badania podczas których zmieniali kąt nachylenia poziomej krawędzi tnącej od 70 do 50°. Zauważyli, że wpływ zmiany wartości tego kąta na wydajność zależy od rodzaju ogniwa. Dla ogniw typu dłuto wpływ tego kąta jest nieistotny, natomiast w przypadku ogniw typu półdłuto zmiana tego kąta wpływa na wydajność. Największą wydajność uzyskali przy kącie nominalnym wynoszącym 60°. Autorzy wywnioskowali także, że zmiana wartości tego kąta wpływa na wydajność skrawania w miarę tępienia się piły.

Górski dokonał analizy wpływu na wydajność łukowego fragmentu krawędzi tnącej, które łączy ostrze pionowe z poziomym. Na jej podstawie zauważył, że

wyeliminowanie go może przyczynić się do zwiększenia wydajności o 20-30% [Górski 1996b]. Natomiast z badań Maciaka z 1998 roku wynika, że ostrze tnące żłobikowe o mniejszym promieniu łukowego fragmentu krawędzi tnącej wykazuje przy tej samej grubości wióra – niższe opory skrawania.

Zmniejszenie odległości punktu styku piętki ogniwa tnącego z prowadnicą względem osi tylnego nitu wpływa negatywnie na wydajność skrawania [Maciak 2001]. Jeśli odległość ta wynosi 0, wtedy wydajność spada o ok. 9% w porównaniu do ogniwa standardowego.

Udowodniono także, że rodzaj ogniwa tnącego wpływa na wymiary wiórów powstających w procesie skrawania. Dolny, Kusiak oraz Stempski w 2003 roku wykazali, że piła z ogniwami typu dłuto skrawa grubsze wióry niż ta z ogniwami typu półdłuto. Jest to związane z różnicami w przebiegu skrawania drewna pomiędzy dwoma rodzajami ogniw piły.

2.6.2 Zniżenie ogranicznika grubości wióra

Wydajność skrawania jest zależna od grubości wióra, która jest częściowo definiowana przez ogranicznik grubości wióra [Łukomski 1977]. Samo obniżenie ogranicznika nie ma decydującego wpływu na grubość wióra, ale wpływa na jego wartość,

co jest równoznaczne z wpływem na wydajność skrawania. Przy zachowaniu stałej siły posuwu, zwiększanie zniżenia ogranicznika grubości wióra w zakresie od 0 mm do 1,6 mm powoduje wzrost wartości osiąganej wydajności skrawania. Natomiast wzrost zniżenia ogranicznika grubości wióra powyżej 1,6 mm powoduje spadek wydajności skrawania [Kousman, Biełowzorow 1964]. Stwierdzenie to zostało potwierdzone także przez Łukomskiego w 1977 roku. Komorowski w swoich badaniach w 1987 roku także uzyskiwał wzrost wydajności zwiększając zniżenie ogranicznika. Tak duże wartości zniżenia ogranicznika nie są stosowane dla pił pilarek przenośnych, ponieważ wówczas istnieje potrzeba nadania pile bardzo dużej siły posuwu. Duża grubość wióra powoduje, że do napędu piły potrzebne są silniki o wiele większej mocy, niż te stosowane w pilarkach przenośnych. W pilarkach przenośnych optymalnym zniżeniem ogranicznika jest wartość w przedziale 0,5 do 0,8 mm. Większe wartości zniżenia stosowane są w piłach łańcuchowych przeznaczonych do układów tnących harwestwerów i wynoszą one od 0,75 do 1,8 mm [www.oregonchain.eu, Windsor 2007].

Inni badacze również potwierdzili, że zmniejszenie wartości zniżenia ogranicznika grubości wióra skutkuje obniżeniem wydajności skrawania. Jednak po przekroczeniu pewnej górnej wartości optymalnej efektywność skrawania również spadnie [Górski 2001]. Dzieje się tak z powodu zbyt dużego obciążenia silnika siłą skrawania. Powoduje to spadek jego prędkości obrotowej.

Maciak [2001] analizował przy pomocy modelu matematycznego wpływ geometrii ogniwa tnącego na efekty skrawania. Stwierdził, że wysunięcie ogranicznika grubości wióra do przodu zęba tnącego nie ma wpływu na wydajność skrawania [Maciak 2001]. Skutkuje to jednak zwiększeniem powierzchni styku z drewnem, co zmniejsza wartość siły posuwu przy której osiągana jest maksymalna wydajność skrawania [Maciak 2001]. Przy stałym zniżeniu ogranicznika grubości wióra na wydajność skrawania ma wpływ wysokość profilu ogniwa tnącego. Przy zastosowaniu tej samej siły posuwu ogniwa o niskim profilu skrawają wióry o 20% mniejszej grubości niż ogniwa standardowe, a przy zastosowaniu mniejszych sił posuwu różnice te są jeszcze większe. Ogniwa niskoprofilowe podczas skrawania wychylają się w mniejszym stopniu niż standardowe [Maciak 2001].

2.6.3 Promień zaokrąglenia krawędzi tnącej

Stępienie ostrzy tnących wpływa przede wszystkim negatywnie na powierzchniową wydajność skrawania drewna. Ostrze jest zawsze zaokrąglone, a jego „ostrość" charakteryzuje promień zaokrąglenia krawędzi tnącej. Promień zaokrąglenia krawędzi tnącej zwiększa się wraz ze stopniem stępienia się piły. Bardzo duży wpływ na spadek wydajności ma zwiększanie się tego promienia. Im krawędź jest bardziej zaokrąglona, tzn. tępe są krawędzie ostrzy poziomych i pionowych ogniw tnących tym niższa jest efektywność skrawania. Przyjęto ogólnie w literaturze, że ostra krawędź tnąca ma promień zaokrąglenia w zakresie od 8 μm do 12 μm [Górski 1996b, Maciak 2001].

Wraz ze wzrostem stopnia stępienia ostrza, promień zaokrąglenia krawędzi tnącej zwiększa się, przez co drewno zamiast być rozcinane, zaczyna być rozrywane [Górski 2005].

Górski stwierdził, że wzrost promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej od 10 μm do 35 μm powoduje spadek uzyskiwanej wydajności skrawania o 30%. Tak znaczący spadek wydajności wywołany stępieniem ostrzy tnących, jest powodem do przerwania pracy i konieczności naostrzenia ostrzy. Wzrost stępienia piły powoduje zmniejszenie grubości

skrawanych wiórów, jest to przyczyną spadku powierzchniowej wydajności skrawania [Bieńkowski 1993, Maciak 1994, Górski 1996b].

Podczas pracy piłą luźno napiętą przy rosnącym wciąż promieniu zaokrąglenia krawędzi tnącej, szybciej zmniejsza się wydajność skrawania, aniżeli przy pracy piłą napiętą [Maciak, Kubuśka 2018].

Stempski [2001] porównywał proces stępienia oraz uzyskiwane wydajności skrawania pił o różnych kątach nachylenia poziomej krawędzi tnącej. Autor jako kryterium stępienia przyjął spadek wydajności skrawania do połowy wartości uzyskiwanej piłą po naostrzeniu. Nie mierzył parametrów geometrycznych ostrza. Stwierdził że, wzrost kąta nachylenia poziomej krawędzi tnącej powoduje wzrost wydajności skrawania ale powoduje też szybsze tępienie ogniw piły. Stwierdził również, że ogniwa typu dłuto ulegają szybszemu stępieniu niż ogniwa typu półdłuto.

2.6.4 Napięcie wstępne

Napięcie wstępne piły łańcuchowej jest kolejnym czynnikiem mającym znaczący wpływ na wydajność skrawania [Maciak, Kubuśka 2018].

Zmiana napięcia wstępnego piły łańcuchowej powoduje zmianę oporów przemieszczania się piły po prowadnicy. Zmianie ulega także swoboda wychylania się ogniw piły podczas ich pracy. Zbyt niskie napięcie wstępne piły łańcuchowej powoduje uzyskiwanie mniejszych wydajności [Maciak 2001]. Wniosek ten wysunięto podczas skrawania drewna o różnych twardościach. Wydajność skrawania uzyskiwana piłą zbyt luźno napiętą jest o 50% mniejsza od wydajności skrawania uzyskiwanej piłą napiętą prawidłowo [Górski 1996b]. Natomiast energochłonność przy braku napięcia wzrasta o 1/3, co autor tłumaczy zwiększeniem możliwości odchylania się ogniw podczas pracy w rzazie, a to z kolei skutkuje spadkiem grubości skrawanego wióra. Teoria ta została potwierdzona przez Maciaka w 2001 roku.

Zbyt mocne napięcie piły powoduje duży spadek wydajności [Trzeciak 2003]. Wzrost napięcia wstępnego piły powoduje zwiększenie strat mocy związanych z tarciem piły o prowadnicę. Jego tezę potwierdziła w 2009 roku Małożewska. Podczas skrawania piłą prawidłowo napiętą maksymalna moc skrawania występuje przy sile posuwu wynoszącej
97 N, a przy wyższych wartościach sił zwiększają się straty mocy [Małożewska 2009].

Spadek napięcia wstępnego piły powoduje wzrost kąta odchylenia ogniw podczas skrawania [To, Doi, Yokoyama 1967], co oznacza więcej przerw w procesie skrawania. Zależność ta powoduje pogorszenie się sprawności pilarki a także spadek wydajności. Podczas pracy napięcie piły może ulegać dynamicznym zmianom. Spowodowane to jest niejednostajnością prędkości przyspieszenia kątowego wału korbowego [Maciak 2013]. Zjawisko to jest szczególnie widoczne w przypadku silników jednocylindrowych [Gendek 2006]. W tym typie silników występuje duża zmienność wartości chwilowej prędkości obrotowej silnika w trakcie jednego obrotu wału korbowego. Powoduje to występowanie dużej wartości przyspieszeń piły łańcuchowej, które są przyczyną wystąpienia dużych sił bezwładności, które niejednokrotnie kilkakrotnie przewyższają wartość czynnych sił skrawania [Więsik 2007].

2.6.5 Wysokość rzazu

Wzrost wysokości rzazu, zwiększa zapotrzebowanie na siłę posuwu, co powoduje szybsze zmęczenie operatora [Ciesielczuk 1973]. Jego twierdzenie potwierdziła w 2005 roku Fryza. Dodała również, że uzyskanie wysokiej wydajności skrawania przy małej wysokości rzazu (umożliwiającej skrawanie jednym zębem), wymaga od operatora użycia znacznie większej siły posuwu [Fryza 2005].

Przy większych wysokościach rzazu wydajność skrawania jest wyższa [Przywózki 1993]. Jednak po przekroczeniu pewnej wysokości rzazu, która jest zależna m.in. od gatunku drewna wartość uzyskiwanej wydajności skrawania ulegnie spadkowi [Górski 2001]. Dla dużych sił posuwu (powyżej 50 N) zmiana wysokości rzazu powoduje wzrost, a następnie spadek wydajności skrawania [Łukomski 1977]. Jest to potwierdzeniem istnienia optymalnej ze względu na wydajność wysokości rzazu. Przy zadaniu siły posuwu mniejszej niż 50 N wydajność spada wraz ze wzrostem wysokości razu [Łukomski 1977].

Przy zachowaniu stałej prędkości posuwu, zwiększenie wysokości rzazu wymaga użycia większej siły posuwu [Ciesielczuk 1973, Janczo 1965].

2.6.6 Siła posuwu

Siła posuwu definiowana jest jako siła docisku wywierana na pilarkę przez jej operatora. Im większą wartość siły posuwu operator nadaje pilę tym większe uzyskuje

wartości powierzchniowej wydajności skrawania. Jednak zwiększa to zapotrzebowanie na moc niezbędną do napędu piły [Maciak 2001].

Wydajność skrawania wzrasta wprost proporcjonalnie do siły posuwu [Piest 1962]. Wartość siły posuwu jest jednak ograniczona mocą silnika pilarki, ponieważ przy zachowaniu stałej prędkości skrawania zapotrzebowanie na moc wzrasta proporcjonalnie do siły posuwu.

Po przekroczeniu pewnej wartości siły posuwu, grubość wiórów wzrasta znacznie, przez co siła skrawania wzrasta, a prędkość piły maleje – co wpływa na zmniejszenie wydajności skrawania [Sztyber 1963].

Stwierdzenie Piesta potwierdzają inni badacze m.in. Łukomski (1977), Bieńkowski (1993), Górski (1993), Maciak (2001). Przy zadanej stałej wartości siły posuwu średnia grubość wióra maleje wraz ze wzrostem liczby jednocześnie skrawających ogniw [Przywózki 1993]. Proporcjonalnie do siły posuwu wzrastają takie wielkości jak: siła skrawania, wydajność skrawania i grubość wióra [Łukomski 1977]. Większa wysokość rzazu wymaga zastosowania większej siły posuwu przy zachowaniu stałej prędkości posuwu [Ciesielczuk 1973]. Od zadanej siły posuwu zależy wysokość rzazu, przy której można uzyskać maksymalne wartości wydajności [Uspienskij 1967]. Przy zastosowaniu małych sił posuwu, maleje wydajność skrawania wraz z zwiększeniem wysokości rzazu. Przy wzroście wysokości rzazu i dla większych sił posuwu wydajność skrawania najpierw wzrasta a następnie po osiągnięciu maksymalnej wartości maleje [Łukomski 1980].

Wartość siły posuwu decyduje o prędkości obrotowej silnika [Sztyber 1963, Ciesielczuk 1973, Górski 1996b, Maciak 2001, Gendek 2005]. Zmiana siły posuwu determinuje zmianę oporów skrawania i obciążenia silnika pilarki. To wpływa na zmianę prędkości obrotowej silnika, która zależy od przebiegu jego charakterystyki zewnętrznej. Zbyt duża wartość siły posuwu powoduje spadek prędkości obrotowej silnika pilarki, mogący mieć negatywny wpływ na uzyskiwane wartości powierzchniowej wydajności skrawania [Maciak 2001].

2.6.7 Prędkość liniowa piły łańcuchowej

Liniowa prędkość piły łańcuchowej jest czynnikiem, który wpływa na wydajność skrawania. Przy dostatecznie dużej mocy silnika i stałej sile posuwu, wydajność wzrasta

proporcjonalnie wraz ze wzrostem prędkości skrawania [Dmochowski 1981, Piest 1962, Janczo 1965]. Wydajność skrawania jest tym większa im większa jest grubość wióra i prędkość skrawania [Orlicz 1988]. Spadek prędkości skrawania w pilarce spalinowej, wynika z charakterystyki zewnętrznej silnika i związany jest z zmniejszeniem się prędkości obrotowej wraz ze wzrostem jego obciążenia [Niewiarowski 1983]. Prędkość skrawania zależy od prędkości obrotowej silnika pilarki spalinowej oraz od średnicy kółka napędowego. W przypadku pilarek im większa liczba zębów kółka napędowego tym większa jest jego średnica. Największe wydajności skrawania osiągane są w zakresie prędkości obrotowych odpowiadających największemu momentowi obrotowemu osiąganemu przez silnik [Gendek 2006].

W przypadku pilarek średnich jest to zakres od 8500 obrotów·min^{-1} do 9500 obrotów·min^{-1}.

2.7 Proces zużycia ostrzy skrawających

Polska norma [PN-67/M-04301] wyróżnia siedem rodzajów zużycia: ścieranie, wykruszanie, sczepianie, powierzchniowe odkształcenie plastyczne, łuszczenie, utlenianie i pitting. Zużycie ścierne polega na połączeniu skrawania, zużycia zmęczeniowego oraz przemieszczania się (ubytku) materiału. Zużycie może tworzyć się na skutek działań mechanicznych pojedynczych lub powtarzających się. Powtarzające się dzielą się na zmęczenie materiału poprzez dużą liczbę cykli (sprężyste) lub małą liczbą cykli (plastyczne).

W wyżej wymienionej polskiej normie zużycie definiowane jest jako „ciągłe, niszczące zmiany pierwotnego stanu masy, składu chemicznego, struktury i stanu naprężenia podpowierzchniowej warstwy materiału części maszyn, spowodowane oddziaływaniem na jej powierzchnię środowiska i ciał współpracujących”.

Nie istnieją ogólne mierniki procesu zużycia. Najczęściej przyjmuje się jako miernik zużycia zmianę masy, objętości lub wymiarów liniowych narzędzia. Intensywność zużycia określa prędkość z jaką następuje zużywanie się narzędzia. Określa się ją względem czasu lub drogi tarcia [Solski, Ziemba 1969]. Biorąc pod uwagę czas, intensywność zużycia można określić z następującej zależności:

$$I = \frac{dZ}{dt} \qquad [kg \cdot s^{-1}], [m^3 \cdot s^{-1}], [m \cdot s^{-1}] \qquad [11]$$

W przypadku określania intensywności względem drogi tarcia korzystamy z zależności

$$I = \frac{dZ}{dL} \qquad [kg \cdot m^{-1}] \qquad [12]$$

gdzie: Z – zużycie;

t – czas;

L – droga tarcia.

Jeżeli prędkość zużycia jest stała to intensywność zużycia I wyznacza się jako:

$$I = \frac{Z}{L \cdot S_n} \qquad [kg \cdot m^{-3}] \qquad [13]$$

gdzie: S_n – pole nominalnej powierzchni styku.

Miarą odporności na zużycie J jest odwrotność intensywności zużycia:

$$J = \frac{1}{I} \qquad [m^3 \cdot kg^{-1}] \qquad [14]$$

Na rysunku 26 przedstawiona jest typowa krzywa zużycia, zwana krzywą Lorenza. Krzywa ta przedstawia typowy przebieg zużywania się powierzchni trących w warunkach tarcia suchego [Gawlik 1988]. Przebieg ten składa się z trzech typowych okresów: zużycia wstępnego, zużycia normalnego, zużycia końcowego [Kuryjański 2011]. W pierwszym krótkotrwałym okresie od 0 do A obserwujemy szybkie zużycie narzędzia, co jest spowodowane docieraniem się powierzchni trących. W przypadku skrawania następuje wyrównanie mikro-nierówności powierzchni ostrza. Wielkość zużycia zależy głównie od stopnia gładkościowego wykończenia powierzchni ostrza oraz w pewnym stopniu od jego geometrii. Drugi okres od A do B jest najdłuższy, gdzie narzędzie pracuje w swoim normalnym trybie pracy. Ten okres charakteryzuje się najmniejszym przyrostem zużycia narzędzia. Drugi okres charakteryzuje się stałą

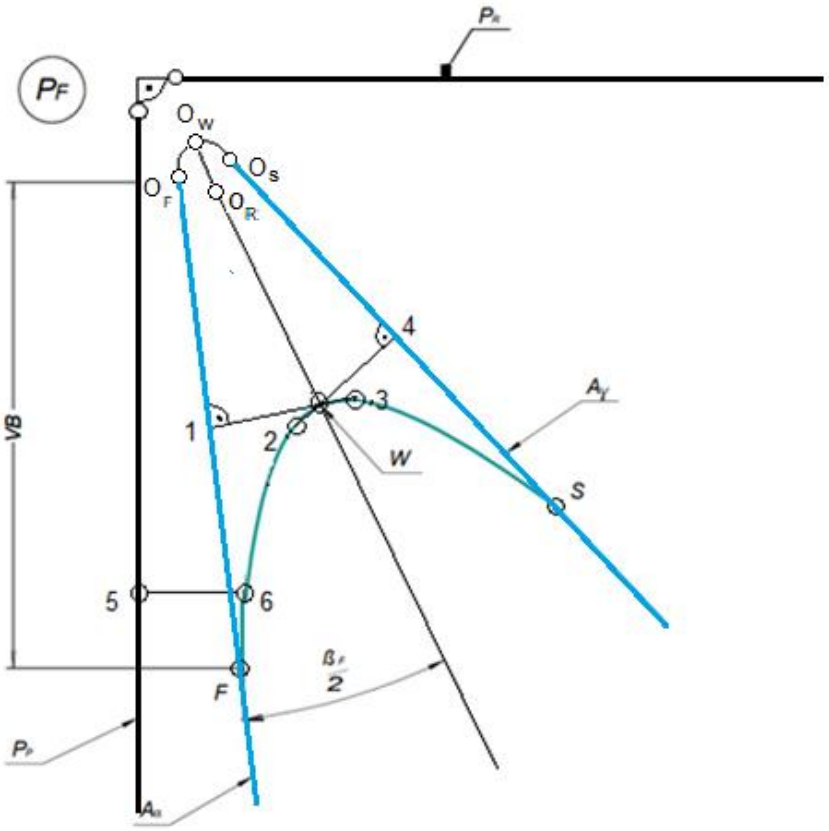
intensywnością zużycia, zależną od warunków współpracy. Okres ten trwa tak długo, aż ulegną zmianie ustalone przy końcu pierwszego okresu warunki tej współpracy. Szybkość zużycia wzrasta intensywnie w okresie od B do C. W tym okresie znacząco maleje wydajność narzędzia. Na odcinku od C do nieskończoności następuje gwałtowny wzrost intensywności zużycia, podczas którego praca narzędzia jest niemożliwa lub narzędzie jest zniszczone. Okres ten prowadzi do całkowitej utraty przez ostrze możliwości skrawania. Dzieje się to na skutek osiągnięcia przez parametry zużycia określonych wielkości i zmiany dzięki temu dotychczasowych, ustalonych warunków współpracy [Gawlik 1988]. Utrata zdolności eksploatacyjnej może następować wskutek zmian właściwości fizycznych warstwy wierzchniej wywołanych tarciem, prowadzących do wzrostu oporu ruchu bez wcześniejszego wyraźnego ubytku materiału. W większości przypadków jest ona skutkiem zmniejszania wymiarów liniowych elementów trących. Dlatego stosowane powszechnie w tribologii definicje zużycia sprowadzają się do liniowego ubytku materiału [Szczerek, Wiśniewski 2000].

Rys. 26. *Przebieg typowej krzywej zużycia [Kuryjański 2011]*

Zużycie ostrza piły łańcuchowej charakteryzuje się zmianami jego kształtu na skutek jego pracy podczas skrawania drewna. Proces tępienia ostrza wiąże się z jego zmianami geometrycznymi, które następują podczas jego eksploatacji [Duchnowski 1997]. Wskutek tarcia promień zaokrąglenia krawędzi tnącej wzrasta. Jego zmiany geometryczne spowodowane są ubytkiem materiału z ostrza piły łańcuchowej które znacznie pogarszają jego zdolność do skrawania drewna. Zmiany właściwości ostrza powodowane są poprzez obciążenie mechaniczne oraz cieplne ostrza piły. Ten proces nazywany jest zużyciem ostrza i oznacza postępującą w czasie utratę właściwości ostrza

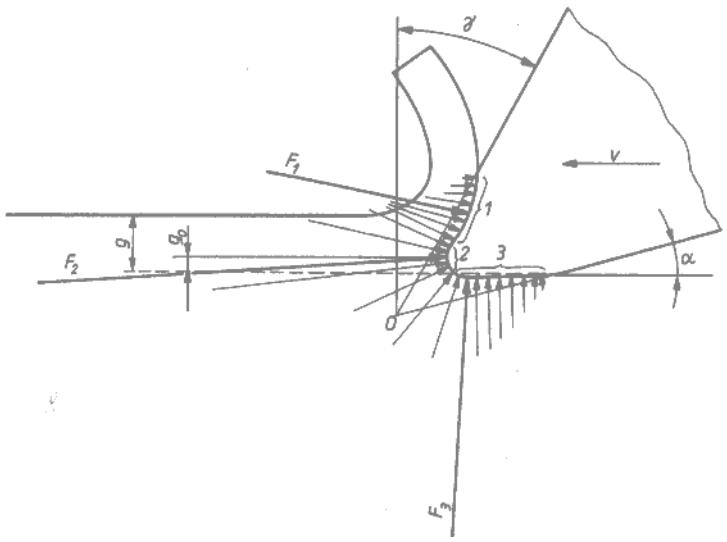
umożliwiających skrawanie. Na rysunku 27 przedstawiony jest schemat zmiany zaokrąglenia krawędzi tnącej. W wyniku pracy promień zaokrąglenia krawędzi tnącej rośnie. Na początku krawędź tnąca jest ostra i zakończona w punkcie Ow, po procesie tępienia się w miarę upływu czasu znajduje się w położeniu W. Zużycie powierzchni natarcia następuje na odcinku O_s S. Na początku powierzchnia natarcia rozpoczyna się w punkcie O_s, po stępieniu powierzchnia natarcia rozpoczyna się w punkcie S. Analogicznie zużycie powierzchni przyłożenia następuje na odcinku O_FF.

Stan ostrza, który je czyni nieprzydatnym do dalszej pracy nazywamy stępieniem ostrza [Jemielniak 2012].



Rys. 27. *Parametry mikrogeometrii stępienia ostrza po skrawaniu drewna***.** *Parametry stereometrii ostrza przyjęto zgodnie z PN-ISO 3002-. Gdzie:*
A_α–powierzchnia przyłożenia (oraz powierzchnię nad którą przechodzi powierzchnia ukształtowana na przedmiocie obrabianym nosi nazwę),
A_γ – powierzchnia natarcia (Powierzchnię po których spływa wiór),
VB – skrócenie wzdłuż powierzchni przyłożenia,
P_F – płaszczyzna boczna (pracy),
P_R – płaszczyzna podstawowa (czołowa),
P_p – płaszczyzna tylna [Staniszewski, Porankiewicz 1978]

Kilku badaczy stworzyło modele skrawania z uwzględnieniem stępienia krawędzi tnącej. Między innymi w 1945 roku Merchant przedstawił prosty model, w którym siły działały tylko na styku wióra z narzędziem, czyli na powierzchni natarcia oraz w płaszczyźnie ścinania, rozwiązał równania dla tych sił. Pominął jednak siły działające na krawędzi skrawającej oraz na powierzchni przyłożenia [Merchant 1945].



Rys. 28. *Opory działające na nóż przy uwzględnieniu stępienia krawędzi ostrza: 1 - opory wióra, F_1 – wypadkowa siła oporów wióra, 2 – opory ścinania, F_2 – wypadkowa siła oporów ścinania, 3 – opory reakcji zgniatanego drewna, F_3 – wypadkowa siła oporów zgniatanego drewna, g – grubość skrawanego wióra, g_0 – najmniejsza grubość skrawanego wióra przy danym stępieniu [Duchnowski 1997]*

Na rysunku 28 przedstawiony jest schemat sił działających na ostrze przy uwzględnieniu zaokrąglenia krawędzi ostrza [Duchnowski 1997]. Można na nim wyróżnić trzy grupy oporów. Opory pochodzące od wióra działające na powierzchnię natarcia. Opory ścinania działające na krawędź tnącą oraz opory od zgniatanego drewna działające na powierzchnię przyłożenia. Z analizy oporów przedstawionych na rysunku 28 wynika, że zwiększanie grubości skrawanego wióra zwiększa naciski na powierzchnię natarcia. Przy dużej grubości wióra mogą one spowodować, że suma składowych pionowych będzie skierowana ku dołowi, czyli ostrze będzie wciągane w głąb drewna. Duże stępienie krawędzi tnącej ma również wpływ na to zjawisko ponieważ zmienia opory działające na powierzchnię przyłożenia. Wzrost promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej powoduje również ograniczenie możliwości uzyskania odpowiedniej grubości skrawanego wióra.

2.7.1 Wpływ różnych czynników na proces zużycia krawędzi tnących piły

Napięcie oraz twardość drewna istotnie wpływa na intensywność zużycia się ostrzy piły łańcuchowej. Miarą zużycia geometrycznego ostrza jest wartość promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej. Promień zaokrąglenia krawędzi tnącej wzrasta szybciej podczas skrawania drewna o większej twardości piłą luźno napiętą [Maciak, Kubuśka 2018]. Im większa powierzchnia rzazu zostanie wykonana piłą łańcuchową, tym ogniwa ulegają bardziej nierównomiernemu tępieniu się [Maciak, Górska, Zach 2017]. Zróżnicowanie stępienia poszczególnych ogniw piły zależy od napięcia oraz gatunku skrawanego drewna [Maciak, Kubuśka 2018]. Podczas pracy piłą luźną rozrzut promienia jest większy niż w przypadku piły napiętej. Jest to prawdopodobnie spowodowane zjawiskiem większego wychylania się ogniw tnących w płaszczyźnie rzazu w przypadku piły luźnej [Maciak 2013].

Istotny wpływ na przebieg procesu zużycia ma napięcie wstępne piły łańcuchowej [Maciak, Kubuśka 2018]. Przy skrawaniu drewna piłą prawidłowo napiętą proces ten może zachodzić nawet dwukrotnie wolniej niż w przypadku skrawania piłą luźną. Praca z piłą prawidłowo napiętą pozwala na wykonanie większej powierzchni rzazu z większą wydajnością skrawania. Zjawisko to zachodzi tak samo zarówno podczas skrawania drewna miękkiego jak i twardego. Może to być spowodowane tym, że podczas pracy piłą luźną ogniwa piły bardziej wychylają się w płaszczyźnie rzazu [Maciak 2013]. Inni badacze też stwierdzili, że niewłaściwe napięcie piły ma wpływ na szybkość tępienia się ostrzy piły łańcuchowej [Lewandowski 2011].

Występuje znacząca różnica w szybkości tępienia się poszczególnych zębów piły. Ogniwa typu dłuto charakteryzują się mniejszą trwałością niż ogniwa typu dłuto. Pomimo faktu, że ogniwami typu dłuto można osiągnąć wyższą wydajność skrawania [Maciak 2015].

Rodzaj oraz stan zaostrzenia ostrzy tnących piły ma także wpływ na ilość zużywanego paliwa [Maciak 2007].

Autorzy [Maciak, Kubuśka 2018] zauważyli, że brak jest długotrwałych badań przebiegu procesu stępienia ogniw tnących przy stałej sile posuwu. Siła posuwu istotnie wpływa na efekty skrawania drewna piłą łańcuchową. Większość poznanych przebiegów zmiany promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej znajdowało się w pierwszym i drugim

okresie opisywanym w typowej krzywej zużycia Lorenza (rys. 26), które charakteryzują się stałą intensywnością zużycia. Nie poznano dotąd trzeciego okresu zużycia ogniw tnących. Inni badacze zauważyli również, [Maciak, Górska, Zach 2017] że aby poznać dobrze proces tępienia się piły należy wykonać bardzo dużą liczbę powtórzeń przy użyciu tej samej piły.

2.8 Sosna jako najważniejszy gatunek drzew w Polsce

Drewnem, które najczęściej jest pozyskiwane w Polsce jest drewno sosnowe. Dlatego też w badaniach wykorzystano drewno sosny.

Sosna zwyczajna (Pinus silvestris) (rys. 29) jest podstawowym gatunkiem lasotwórczym na terenie Polski. Jej udział wśród wszystkich gatunków drzew rosnących na terenie Lasów Państwowych zajmuje ok. 70% [Białobok i inni 1993]. Jej gałęzie rosną okółkowo, a korona w młodości przyjmuje kształt stożka. Rośnie do 45 metrów wysokości. Gatunek ten nie wymaga żyznych gleb, rośnie tworząc bory mieszane lub często bory sosnowe.

Budowę mikroskopową drewna sosny przedstawiono na rys. 30. Słoje roczne są bardzo dobrze widoczne, widoczna jest też granica drewna wczesnego i późnego. Wczesne, pełni funkcję przewodzącą, a późne strukturalną. Właściwości mechaniczne zależą w dużej mierze od warunków wzrostowych. Przy korzystnych warunkach glebowych drewno jest szeroko słoiste. Im trudniejsze warunki wzrostowe tym słoje są węższe. W tym wypadku jednak szerokosłoistość wpływa negatywnie na właściwości mechaniczne drewna, gdyż zwiększa się udział drewna wczesnego.

Drewno sosnowe charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami technicznymi, które wykorzystywane są w licznych gałęziach gospodarki. Poza tym drewno to posiada dużo ilości substancji żywicznych. Drewno sosnowe wykorzystywane jest m.in. jako materiał konstrukcyjny tzw. tarcica, ale także elementy o gorszych właściwościach wykorzystywane do wytwarzania masy celulozowej lub do produkcji płyt wiórowych oraz pilśniowych. Poza drewnem z drzew sosny pozyskiwane jest także igliwie, kora i żywica. Igliwie służy do produkcji olejków eterycznych i zapachowych. Kora wykorzystywana jest przede wszystkim w ogrodnictwie jako element dekoracyjny lub kompostowy. Żywica natomiast jest jednym z podstawowych składników produkcji kalafonii oraz terpentyny.

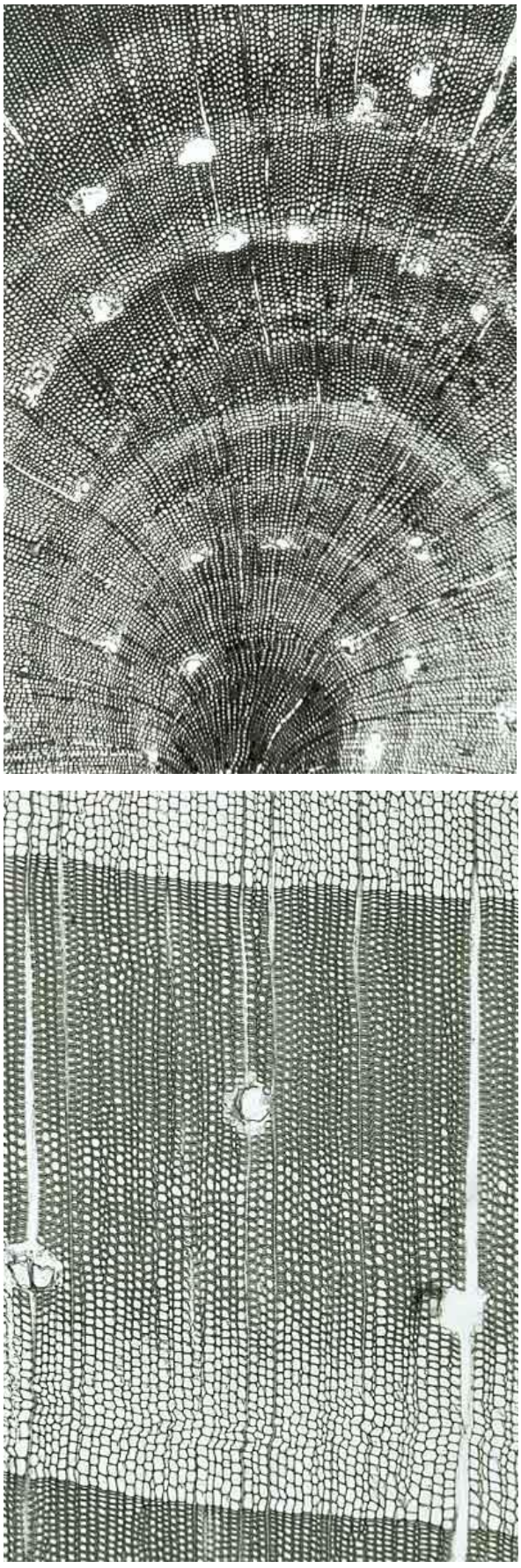
a)

b)

c)

Rys. 29. *Sosna zwyczajna (Pinus sylvestris L) a). kwiatostany i szyszki [www.posterlounge.com] b) Sosna zwyczajna pokrój drzewa [www.poznan.lasy.gov.pl] c) Sosna zwyczajna szyszki oraz igły [www. gardeneo.pl]*

Drewno sosny zbudowane jest z drewna miękkiego o barwie jasnożółtej oraz twardzieli charakteryzującej się barwą różowej do brunatnoczerwonej. Twardziel wytwarzana jest dopiero po 15-20 latach życia drzewa. Przyrosty roczne są bardzo wyraźnie widoczne na pniu, podobnie jak w przypadku innych drzew iglastych. W niektórych przypadkach i na niektórych regionach gęstość może osiągać wartości minimalne nawet do 0,30 $g \cdot cm^{-3}$ i maksymalne aż do 0,86 $g\ cm^{-3}$, jednak średnia wartość dla tego gatunku wynosi 0,49 $g\ cm^{-3}$. Odczyn drewna wynosi ok . 4-5 pH [Krzysik 1974].



Rys. 30. *Budowa mikroskopowa sosny [*www.woodanatomy.ch*]*

3. Hipoteza badawcza, cel i zakres pracy

Podczas analizy dostępnych źródeł literaturowych zajmujących się zagadnieniem skrawania drewna piłami łańcuchowymi nie znaleziono dokładniejszych informacji jaki wpływ na proces zużycia krawędzi tnących mają warunki jej pracy takie jak: zastosowana siła posuwu oraz napięcie wstępne piły. Prowadzono wprawdzie badania wpływu napięcia wstępnego na intensywność zużycia. Były one jednak prowadzone w warunkach uniemożliwiających zachowanie stałej wartości siły posuwu, co nie pozwalało na wyeliminowanie wpływu siły posuwu na intensywność zużycia. Znaleziono jedynie informacje o wpływie tych czynników na powierzchniową wydajność skrawania. Na podstawie analizy literatury stwierdzono, że od napięcia wstępnego oraz zastosowanej wartości siły posuwu zależy możliwość odchylania się ogniw w płaszczyźnie rzazu.

Większość pozycji z przeglądu literatury pochodzi z lat 1970-2010. Jednak obecnie nie jest mi wiadomo o podobnych badaniach, których wyniki byłyby ogólnodostępne. Większość badań prowadzona jest obecnie w laboratoriach firm produkujących piły, a ich wyniki nie są udostępniane.

Przygotowując się do przeprowadzenia badań przyjęto następującą hipotezę badawczą:

w warunkach umożliwiających większą swobodę odchylania się ogniw tnących zwiększa się intensywność zużycia krawędzi tnących piły.

Na podstawie hipotezy badawczej sformułowano następujący cel główny pracy:

Określenie wpływu siły posuwu oraz napięcia wstępnego piły na intensywność zużycia się krawędzi tnących ogniw piły łańcuchowej, a także zależności powierzchniowej wydajności skrawania od zużycia geometrycznego krawędzi tnących piły łańcuchowej żłobikowej.

Określenia wpływu napięcia wstępnego piły łańcuchowej dokonano jedynie dla jednej wartości siły posuwu. Badania takie były już prowadzone wcześniej w warunkach terenowych [Maciak, Kubuśka 2018]. Chodziło o potwierdzenie ich ustaleń w warunkach laboratoryjnych.

Założono, że osiągnięcie powyższego celu badawczego może mieć miejsce przy osiągnięciu odpowiedzi na następujące cele szczegółowe:

- Określenie wpływu zastosowanego napięcia wstępnego i zadanej siły posuwu na zachowanie się ostrzy piły łańcuchowej żłobikowej przy pomocy analizy zdjęć wykonanych kamerą do zdjęć szybkich.
- Określenie wpływu zastosowanego napięcia wstępnego i zadanej siły posuwu na intensywność zużycia geometrycznego krawędzi tnących ogniw piły łańcuchowej żłobikowej.
- Określenie wpływu zużycia geometrycznego krawędzi tnących ogniw piły łańcuchowej na uzyskiwaną powierzchniową wydajność skrawania w badanych warunkach.

Zakres pracy obejmuje:

- Przegląd literatury dotyczącej tematu pracy.
- Rejestracje procesu skrawania drewna sosnowego kamerą do zdjęć szybkich Badania te zostaną wykonane przy dwóch różnych stopniach napięcia wstępnego piły: pile prawidłowo napiętej i pile luźno napiętej. W każdym przypadku będzie wykonany pomiar przy dwóch wartościach siły posuwu: 15 N i 70 N. Dla każdego przypadku zostanie wykonanych pięć powtórzeń.
- Analiza uzyskanych zdjęć oraz określenie kątów odchylenia ogniwa od bieżni prowadnicy w zadanych warunkach pracy.
- Analiza statystyczna uzyskanych wyników kątów odchylenia. Ustalenie związku pomiędzy warunkami pracy a możliwością odchylania się ogniw piły łańcuchowej.
- Skonstruowanie stanowiska badawczego do pomiarów zużycia geometrycznego oraz wydajności skrawania umożliwiającego utrzymanie zadanej siły posuwu.
- Badania na stanowisku pomiarowym w trakcie których będzie mierzona wydajność skrawania oraz będą pobierane odciski krawędzi tnących ogniw piły. Badania zostaną przeprowadzone przy trzech wartościach zadawanej siły posuwu: 15 N, 35 N oraz 70 N przy prawidłowym stopniu napięcia piły. Dla siły 35 N badania zostaną wykonane także dla piły o luźnym wstępnym napięciu. Badania dla piły luźno napiętej wykonane zostaną tylko przy tej wartości napięcia wstępnego. Ponieważ wpływ napięcia wstępnego na intensywność zużycia oraz wydajność skrawania jest już znany. Celem tych pomiarów będzie potwierdzenie wniosków uzyskanych przez innych badaczy.

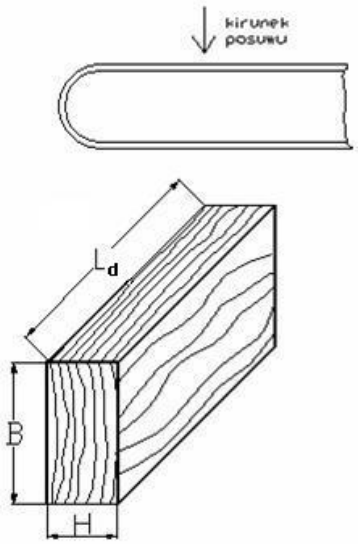
Dla każdego wariantu wykonane zostaną po trzy powtórzenia. Za każdym razem wykorzystując naostrzoną piłę. W każdym przypadku badania prowadzone będą do momentu aż, cięcie w danych warunkach będzie niemożliwe.

- Analiza mikroskopowa uzyskanych odcisków.
- Opracowanie wyników pomiarów promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej piły łańcuchowej żłobikowej oraz powierzchniowej wydajności skrawania wraz
  z analizą statystyczną
- Porównanie uzyskanych wyników w różnych zadanych warunkach pracy oraz ustalenie zależności matematycznych wydajności skrawania od zużycia krawędzi tnącej ogniw piły łańcuchowej dla badanych warunków pracy piły łańcuchowej.
- Określenie związku pomiędzy możliwością odchylania się ogniw a zużyciem krawędzi tnących ogniw piły łańcuchowej.

4. Materiały i metody

4.1 Drewno wykorzystane w badaniach

W badaniach przebiegu skrawania wykonywanych kamerą do zdjęć szybkich wykorzystano drewno sosnowe o przekroju prostokątnym i wymiarach 14 cm x 24 cm. Gdzie wysokość rzazu H wynosiła 14 cm (rys. 31). Duża szerokość rzazu B umożliwiała dłuższy czas rejestracji kamerą. Długość tych próbek L_d wynosiła 80 cm. Długość wynikała z ograniczeń stanowiska. W przypadku badań intensywności zużycia krawędzi tnących wykorzystano próbki o przekroju kwadratowym o boku długości 14 cm. Długość próbek wynosiła 200 cm. Wszystkie próbki pochodziły od jednego dostawcy. Słoistość drewna wyniosła średnio 4,15 cm^{-1} przy odchyleniu standardowym 1,63 cm^{-1}. Gęstość drewna wynosiła od 0,48 do 0,51 $g \cdot cm^{-3}$.



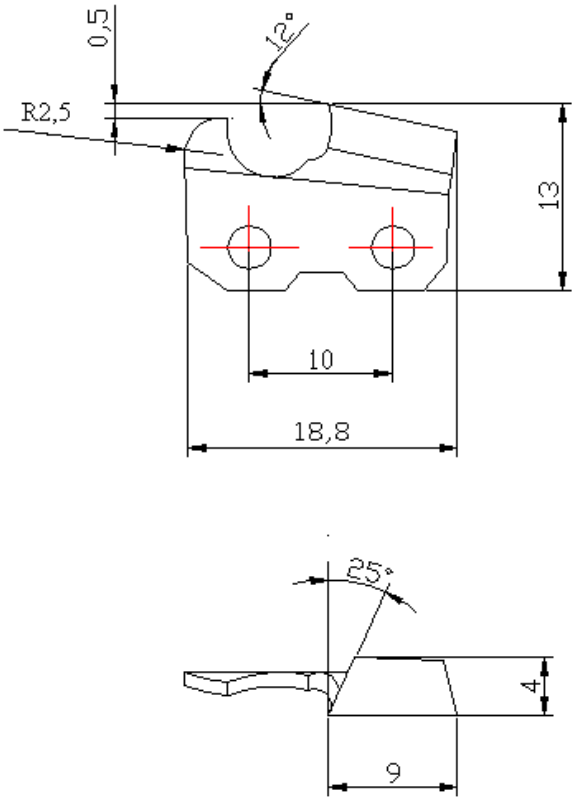
Rys. 31. *Sposób określania wymiarów oraz kierunek piłowania próbki: H – wysokość rzazu, B – szerokość rzazu, L_d – długość próbki [Maciak 2013]*

Wilgotność bezwzględna próbek wynosiła od 49,6% do 57,2%. Wilgotność próbek określano metodą suszarkowo – wagową. Do określenia masy początkowej i końcowej zastosowano wagę laboratoryjną RADWAG WPS210S o dokładności do 0,001 g. Suszenia próbek dokonywano w suszarce laboratoryjnej z wymuszonym obiegiem powietrza Heraus UT6120.

Średnia twardość sosny wynosiła 23,7 MPa przy odchyleniu standardowym 1,3 MPa. Twardość badanego drewna określono metodą Brinella, na powierzchni czołowej [Kubiak, Laurow 1994]. Dla każdej próbki wykonywano 12 pomiarów twardości w losowo wybranych miejscach na jej powierzchni czołowej. Podane wyżej wartości twardości są wartościami średnimi dla wszystkich wykorzystanych do badań próbek.

4.2 Piła łańcuchowa i prowadnica użyta w badaniach

Dla każdej serii pomiarowej wykorzystywano nową piłę łańcuchową. Piły nie były ostrzone w trakcie serii pomiarowej. Producentem pił łańcuchowych jak i prowadnic na której były montowane była firma Oregon. Prowadnica oznaczona była numerem katalogowym 5089141-56 miała długość 15 cali oraz rowek o szerokości 1,5 mm. Prowadnica posiadała na końcu kółko gwiazdkowe o liczbie zębów 11. Długość całkowita prowadnicy wynosiła 443 mm, szerokość maksymalna wynosiła 67 mm, grubość prowadnicy 4,6 mm, promień końcówki prowadnicy 28 mm.



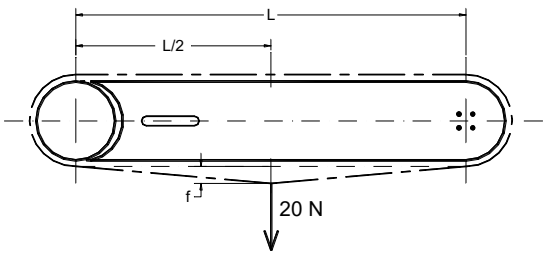
Rys. 32. *Ogniwo tnące zastosowane w badanych piłach o podziałce 3/8"(wymiary podano w mm; na rysunku umieszczono tylko wymiary istotne ze względu na przebieg procesu piłowania)[Żołek 2005]*

Badania przeprowadzono przy użyciu pił łańcuchowych o podziałce 3/8 cala, szerokość ogniwa prowadzącego wynosiła 1,5 mm, kąt nachylenia poziomych krawędzi tnących 65^{o} a zniżeniu ograniczników grubości wióra ogniw tnących 0,5 mm. Piła posiadała ogniwa typu dłuto. Promień połączenia ostrza poziomego z pionowym wynosił 0,2 mm. Piły te posiadały 56 ogniw napędowych i 26 tnących. Wymiary ogniw tnących przedstawiono na rysunku 32.

4.2.1 Sposób ustalania napięcia piły

Badania przeprowadzono dla dwóch stanów napięcia piły: napiętej i luźnej. Napięcie piły ustalane było przed każdą serią pomiarową (rys 33).

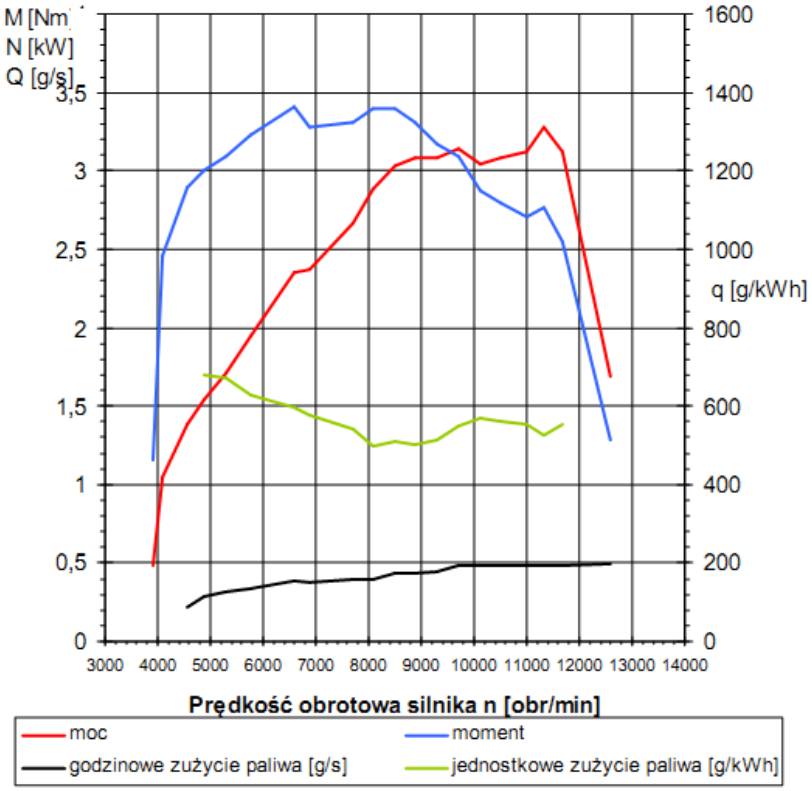
W połowie długości prowadnicy zawieszono obciążnik o ciężarze 20 N, następnie poprzez napinacz regulowane było napięcie wstępne piły. W trakcie regulacji mierzono odległość pomiędzy bieżnią prowadnicy, a stopką ogniwa piły. Odległość ta nazywana jest strzałką ugięcia piły Δy. Jeśli wartość Δy wynosiła 8 mm wtedy piłę uznawano za luźną, jeśli natomiast wartość Δy wynosiła 5 mm wtedy piłę uznawano za normalnie napiętą. Taką metodę ustalania wstępnego napięcia piły stosowano tez w innych badaniach [Bieńkowski 1993, Górski 1996a; Maciak 2001, Gendek 2005]. Z badań Maciaka [2001] wynika, że przy 15 calowej prowadnicy, w przypadku gdy strzałka ugięcia wynosi 5 mm to siła rozciągająca piłę wynosi 50,8 N. Przy wzroście wielkości strzałki ugięcia do 8 mm siła rozciągająca spada do wartości 0 N. Po uzyskaniu oczekiwanego napięcia, pilarkę uruchamiano i utrzymywano, przez ok. 60 s pracę silnika na wysokich obrotach. Po rozgrzaniu piły łańcuchowej ponownie sprawdzano jej napięcie wstępne.



Rys. 33. *Sposób pomiaru napięcia piły łańcuchowej [Maciak 2013]*

4.2.2 Napęd piły

Do napędu piły łańcuchowej żłobikowej wykorzystano pilarkę spalinową Husqvarna 357XP z silnikiem dwusuwowym o objętości skokowej 57 cm^3, mocy maksymalnej 3,2 kW oraz masie 5,5 kg (bez układu tnącego i z pustymi zbiornikami). Pilarka wyposażona jest w zbiornik paliwa o pojemności 0,68 dm^3 i zbiornik oleju o pojemności 0,38 dm^3. Na rysunku 34 przedstawiono charakterystykę silnika spalinowego pilarki wykorzystanej do badań.



Rys. 34. *Charakterystyka zewnętrzna silnika pilarki Husqvarna model 357XP[Gendek 2005]*

4.3 Metodyka badań kamerą do zdjęć szybkich

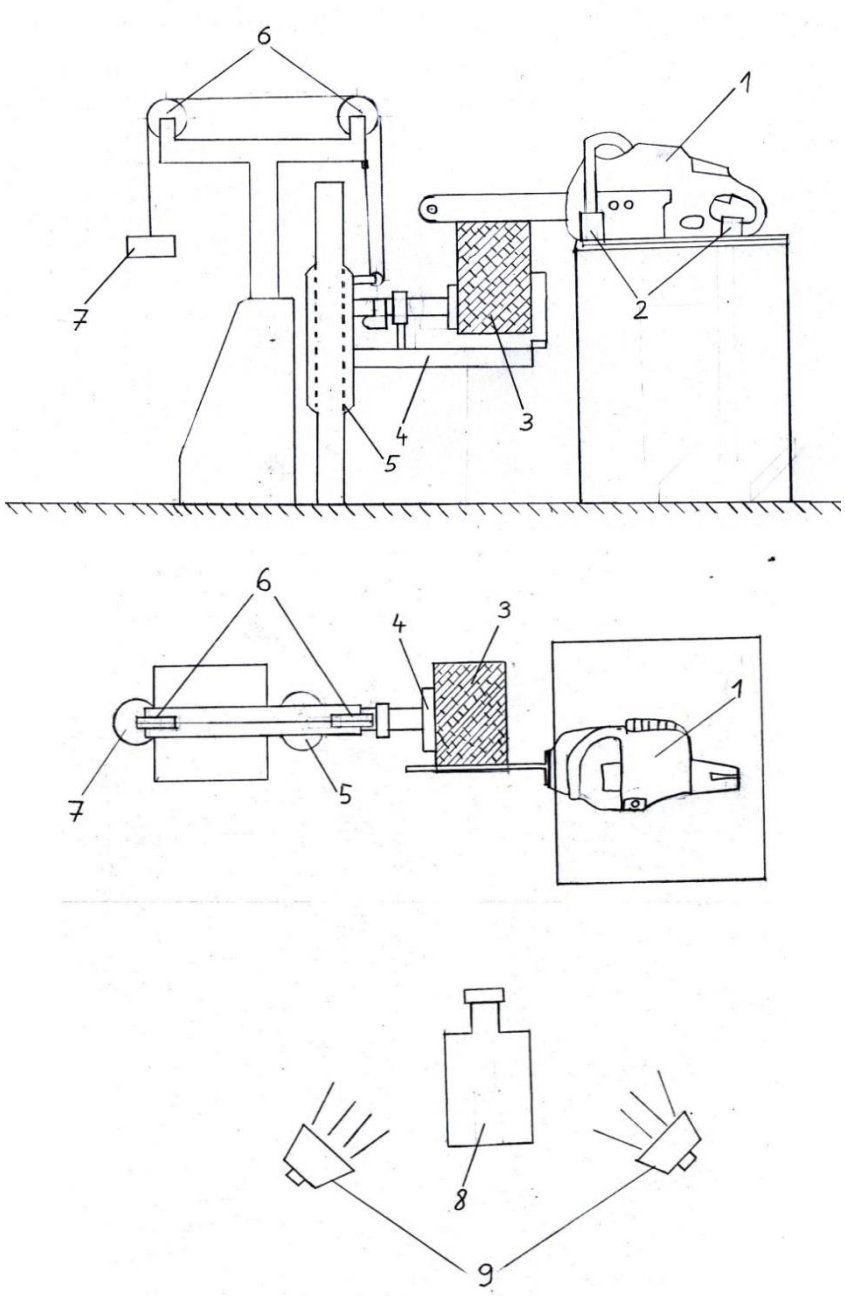
W badaniach wykonanych kamerą do zdjęć szybkich wykorzystano jeden zestaw tnący składający się z piły i prowadnicy. W ramach opisywanych badań wykonano rejestrację procesu skrawania drewna przy pomocy kamery do zdjęć szybkich w czterech różnych wariantach pomiarowych. Badania wykonano przy dwóch stopniach napięcia wstępnego piły: pile prawidłowo napiętej i luźnym stopniu napięcia piły. W każdym przypadku wykonywano pomiar przy dwóch wartościach siły posuwu: 15 N i 70 N. Dla każdego przypadku wykonano pięć powtórzeń.

4.3.1 Stanowisko do rejestracji procesu skrawania kamerą do zdjęć szybkich

Rejestracji procesu skrawania dokonano na stanowisku przedstawionym na rysunku (rys 35). Podczas badań pilarka (1 rys. 35) zamontowana była na stanowisku nieruchomo. Drewno umieszczone było w imadle (4 rys. 35) poziomo w stosunku do pilarki oraz prostopadle do płaszczyzny bocznej prowadnicy. Siła posuwu zadawana była za pomocą obciążników (7 rys. 35). Masa założonych obciążników decydowała o wartościach siły posuwu. Obciążniki oddziaływały na imadło za pomocą stalowej linki opasanej na rolkach prowadzących (6 rys. 35), co powodowało pionowy ruch imadła wraz z drewnem. Wielkość zadanej siły posuwu kontrolowano wykorzystując dynamometr cyfrowy.

a)

b)



Rys. 35. *Stanowisko pomiarowe: a – widok z boku, b – widok z góry, 1- pilarka, 2 – mocowanie pilarki, 3 – drewno, 4 – imadło, 5 – suwak, 6 – rolki prowadzące, 7 – obciążnik, 8 – kamera, 9 – oświetlacz*

Do oświetlenia rejestrowanego obszaru użyto dwóch zespołów oświetlających składających się z dwóch reflektorów (9 rys. 35) led o temperaturze barwowej światła wynoszącej 6000 - 6500 K. Ustawione były one w taki sposób aby jak najlepiej oświetlony został rejestrowany obszar. Barwa widmowa reflektorów dobrana została na podstawie wstępnych prób, przy bardziej ciepłym świetle o niższej temperaturze barwowej były słabo widoczne szczegóły ogniw tnących. Przed prowadnicą ustawiono

kamerę do zdjęć szybkich (8 rys. 35), która rejestrowała cały proces. Na rysunku 36 przedstawiono zdjęcia rzeczywistego stanowiska.

a)

b)

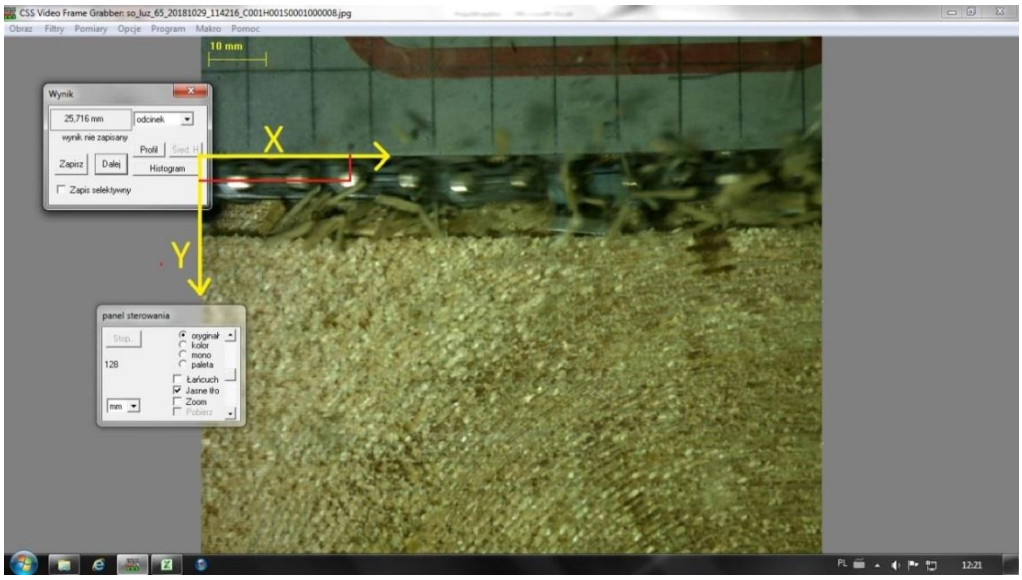
Rys. 36. *Stanowisko do rejestracji pomiarów kamerą do zdjęć szybkich a) widok z przodu,*
b) widok z boku

Rejestracja procesu skrawania została dokonana kamerą do zdjęć szybkich Photron Fastcam SA1.1 (rys. 36), której producentem jest firma Photron [User's Manual 2009] przy szybkości zapisu 12 000 kl·s^{-1}. Kamera ta charakteryzuje się wysoką odpornością na kurz oraz wilgoć. Maksymalna prędkość zapisu przy pełnej rozdzielczości (1024 x 1024 pikseli) to 5400 kl·s^{-1}, przy zredukowanej rozdzielczości (64 x 16 pikseli) maksymalna prędkość zapisu to 675 000 kl·s^{-1}. Kamera posiada sensor 12-bitowy z pikselem 20 μm. Aby umożliwić analizę zachowania się ogniw w trakcie pracy, skrawania dokonywano możliwie najbliżej powierzchni czołowej skrawanej próbki.

4.3.2 Sposób wykonywania pomiarów na stanowisku do rejestracji kamerą do zdjęć szybkich

Przed wykonaniem każdego pomiaru ustalano wartość siły posuwu przy pomocy obciążników (7 rys. 35). Wartość siły posuwu mierzono i kontrolowano w trakcie badań dynamometrem Lutron FG 100 KG o dokładności względnej ± 0,2 N. Sprawdzano również napięcie wstępne piły łańcuchowej. Mocowano drewno w ten sposób aby skrawanie odbywało się na brzegu próbki, co umożliwiało rejestrację tego procesu kamerą. Po uruchomieniu pilarki blokowano manetkę gazu w położeniu maksymalnych obrotów. Po zwolnieniu obciążników drewno (3 rys. 35) unosiło się pionowo ku górze i następowało skrawanie. Skrawanie następowało poprzecznie do włókien. Każdorazowo po wykonaniu rzazu pilarka była wyłączana i przygotowywana do wykonania kolejnych powtórzeń. Dalszej analizie poddawano tylko ogniwa znajdujące się po wewnętrznej stronie rzazu które w całości brały udział w procesie skrawania.

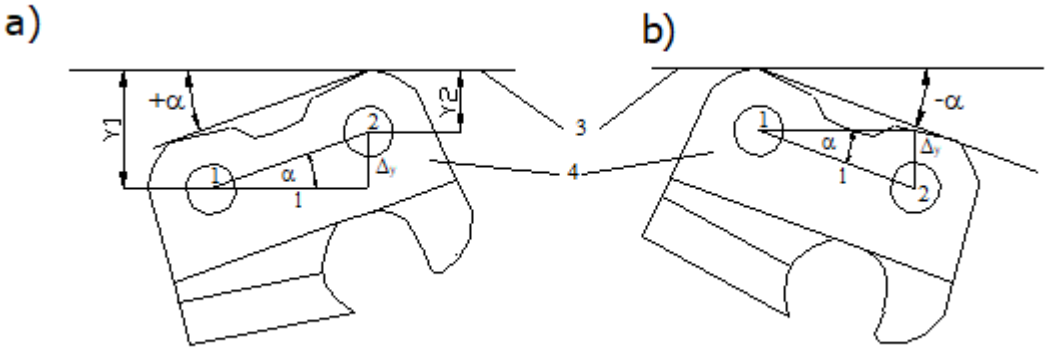
Do przekonwertowania wykonanych filmów na pojedyncze klatki wykorzystano program Photron FASTCAM Viewer [User's Manual 2009]. Analizę zdjęć wykonano w programie CSS Video Frame Grabber (rys 37) [Instrukcja obsługi 2010].



Rys. 37. *Sposób pomiaru odległości osi nitów od bieżni prowadnicy oraz przyjęty układ współrzędnych*

Mierzonym parametrem była odległość osi nitów od bieżni prowadnicy (współrzędna Y). Punkt zerowy osi Y przyjmowano na bieżni prowadnicy. Analizie poddano każdą klatkę filmu dla każdej serii pomiarowej. Czas między ujęciami wynosił 12000 s^{-1}.

Następnie na podstawie ustalonych współrzędnych Y osi obu nitów obliczano kąt odchylenia ogniw α.



Rys. 38. *Sposób wyznaczania kąta odchylenia ogniwa od bieżni prowadnicy. a - wartość kąta α jest dodatnia, b – wartość kąta α jest ujemna, 1 – pierwszy nit, 2 – drugi nit, 3 – bieżnia prowadnicy (zakładamy, że jest linią prostą), 4 – korpus ogniwa tnącego, l – odległość między osiami nitów, α – kąt pomiędzy linią łączącą osie nitu, a prostą równoległą do bieżni prowadnicy, Y1 – odległość pierwszego nita od bieżni prowadnicy, Y2 kąt pomiędzy osią drugiego nitu a bieżnią prowadnicy, ΔY- różnica pomiędzy wartościami współrzędnych osi nitów*

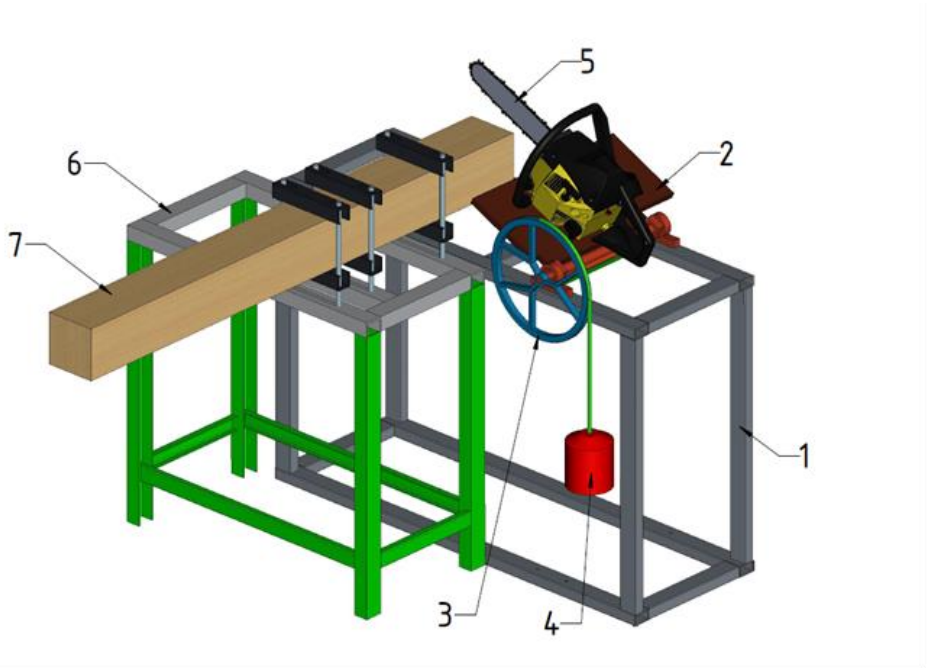
Poszczególne kąty i odległości zaznaczono na rysunku 38. Jeżeli nit numer 1 był dalej od bieżni prowadnicy niż nit 2, wtedy przyjęto, że wartość kąta α jest dodatnia (rys 38a).

W przypadku, gdy dalej bieżni był nit 2 wartość kąta α przyjęto jako ujemną (rys 38b). Numeracja nitów wynika ze sposobu pomiaru odległości i przyjętego układu współrzędnych (rys. 37).

4.4 Metodyka badań procesu zużycia ostrzy

4.4.1 Stanowisko do badań procesu tępienia piły

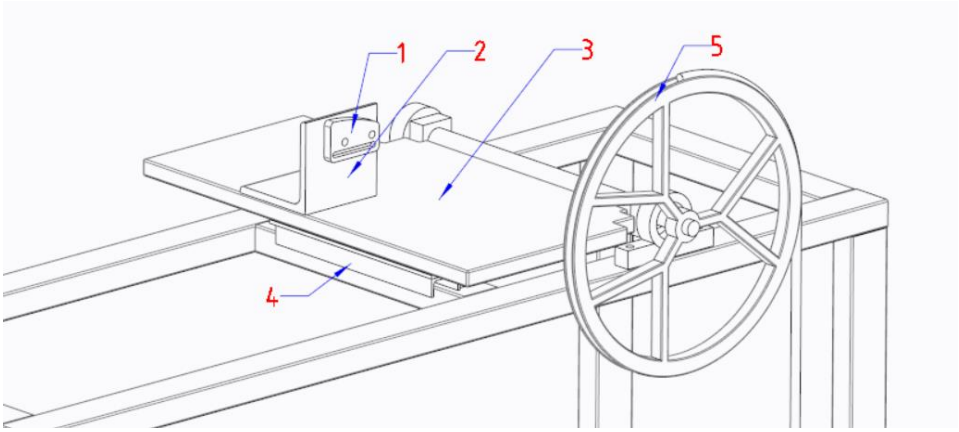
Badania procesu tępienia się ostrzy tnących ogniw piły łańcuchowej wykonano na stanowisku (rys. 39), które umożliwia zachowanie stałej siły posuwu. Stanowisko badawcze umożliwia przeprowadzenie powtarzalnych prób przerzynki drewna przy użyciu pilarki spalinowej. Stanowisko to zostało specjalnie zaprojektowane i wykonane na potrzeby tych badań. Ogólny widok stanowiska przedstawiono na rys 39.



Rys. 39*. Stanowisko badawcze. 1 – rama stanowiska, 2 – podstawa pilarki, 3 – koło linowe, 4 – obciążnik, 5 – pilarka, 6 – uchwyt drewna, 7 – drewno*

Rama stanowiska (1 rys. 39) została wykonana z profili stalowych o przekroju prostokątnym 30 x 50 mm. Podstawę pilarki (2 rys. 39) zaprojektowano, tak aby pasowała do większości popularnych modeli pilarek. Umożliwi to wykorzystanie stanowiska również

w przyszłości do innych badań. Do stanowiska przymocowano stojak na drewno ze specjalnym uchwytem (6 rys. 39), który utrzymuje drewno w pozycji nieruchomej podczas cięcia. Pilarkę umieszczono na ruchomej podstawie (2 rys. 39), która może wykonywać ruch wahadłowy.



Rys. 40. *Schemat budowy zespołu montażu pilarki: 1 – podkładka dystansowy, 2 – kątownik stalowy, 3 – blat drewniany, 4 – rama blatu, 5 – koło linowe*

Pilarkę zamontowano na wysokości 860 mm, co sprawia że operator pilarki nie musi schylać się podczas pomiarów, a jednocześnie nie wymaga podnoszenia pilarki powyżej poziomu bioder. Jest to ważne biorąc pod uwagę długotrwałość badań.

Pilarkę przykręcano (1 rys. 40) przy użyciu nakrętek montażu pokrywy sprzęgła. Do blatu (3 rys. 40) przykręcony był stalowy kątownik (2 rys.40), a do niego zamocowano podkładkę dystansową (1 rys. 40), podkładka jest jedynym elementem wymagającym wymiany przy badaniach innego modelu pilarki. Całość jest oparta na spawanej ramie (4 rys.40) wykonanej ze stalowych ceowników. Rama połączono bezpośrednio z wałem, który z kolei połączono z kołem linowym (5 rys.40). Do koła przymocowano linkę, na końcu której znajduje się obciążnik, który może być wieszany po jednej lub drugiej stronie kółka linowego. Umożliwia to regulację siły posuwu. Umieszczenie obciążników za pilarką (tak jak pokazano na rys. 39) wykonywano wtedy gdy ciężar pilarki wywoływał zbyt dużą wartość siły posuwu niż to było założone w badaniach. Był on tak umieszczany dla wartości siły posuwu wynoszącej 15 N. Rzeczywisty widok stanowiska przedstawiono na rysunku 41.

a) b) c)

Rys. 41 . *Stanowisko do badań intensywności zużycia ogniw tnących piły łańcuchowej a) widok z lewej strony operatora, b) widok od strony operatora, c) widok z prawej strony operatora*

4.4.2. Przebieg badań procesu zużycia ostrzy

Badania zostały przeprowadzone przy trzech różnych wartościach siły posuwu: 15, 35 i 70 N przy prawidłowym stopniu napięcia piły. W przypadku siły posuwu wynoszącej 35 N badania wykonano także przy luźnym wstępnym napięciu piły łańcuchowej. Przy pozostałych wartościach zadawanej siły posuwu badania prowadzono jedynie dla piły prawidłowo napiętej. (Wpływ napięcia wstępnego na intensywność zużycia krawędzi tnących jest już znany. Badania piłą o luźnym napięciu prowadzono jedynie w celu potwierdzenia ustaleń dokonanych w trakcie innych badań) Dla każdego wariantu wykonano trzy powtórzenia. Za każdym razem wykorzystując naostrzoną piłę.

W badaniach zużycia ostrzy wykorzystano cztery zestawy składające się z jednej prowadnicy oraz trzech pił łańcuchowych. Każda piła współpracowała z przypisaną do niej prowadnicą. Każdy zestaw wykorzystywano do pomiarów przy jednej tylko wartości siły posuwu lub napięcia. Zarówno piły łańcuchowe jak i prowadnice były nowe. Przed właściwymi pomiarami przy pomocy każdego zestawu „piła – prowadnica" wykonano 50 rzazów. Miało to na celu wzajemne dotarcie piły łańcuchowej i prowadnicy. Ponadto pozwoliło uniknąć w trakcie właściwych badań zmniejszania się napięcia piły w trakcie pracy. Zjawiska to spowodowane jest rozciąganiem się fabrycznie nowej piły w początkowym okresie jej użytkowania. Następnie przed właściwymi pomiarami piły zostały naostrzone. Aby zachować powtarzalność geometrii ostrzy, ostrzenie

wykonywano na specjalnej szlifierce. Badania prowadzono do momentu aż przy zadanej wartości siły posuwu piła przestawała skrawać.

4.4.3 Sposób wykonywania pomiarów na stanowisku do badań procesu tępienia piły

Intensywność zużycia krawędzi tnących ogniw piły łańcuchowej żłobikowej określano za pomocą zużycia geometrycznego. Porównywanym parametrem był promień zaokrąglenia krawędzi tnącej ogniwa. Promień zaokrąglenia krawędzi tnących wyznaczono na podstawie odcisków krawędzi tnących zebranych w trakcie badań. Odciski krawędzi tnących wykonywano na ołowianych płytkach grubości 0,6 mm i wymiarach 18 mm x 15 mm (rys. 42). Z każdego ogniwa tnącego piły (piła posiadała 26 ogniw), wykonywano po trzy odciski. Krawędź płytki przykładano pod kątem 90° do krawędzi tnącej. Analizie pod mikroskopem poddawano tylko jeden z nich. Ten który był najbardziej wyraźny pod dużym powiększeniem.

Rys. 42. *Pobieranie odcisków z ostrzy piły*

Przed przystąpieniem do pomiarów ustawiano żądaną wielkość siły posuwu przy pomocy obciążników. Zastosowanie obciążników do zadawania określonej siły posuwu, sprawia, że wykonywane pomiary są powtarzalne i eliminują czynnik ludzki jaki wprowadza operator pilarki. Przed wykonaniem każdej serii pomiarowej wykonywano odciski krawędzi tnących, aby ustalić promień zaokrąglenia krawędzi tnących piły ostrej. Następnie przystępowano do wykonania pomiarów. Każdy pomiar rozpoczynano od

uruchomienia pilarki przez operatora oraz odchylenia pilarki do góry (wraz z podstawą do której jest przymocowana). Następnie operator blokował manetkę gazu. W tym czasie drugi uczestnik badań przesuwał drewno pod prowadnicę. Operator opuszczał swobodnie uruchomioną pilarkę, która opadała na drewno ze stałą siłą posuwu zadaną przez obciążnik. Pilarka była opuszczana z możliwie najmniejszej możliwej wysokości w celu uniknięcia gwałtownego uderzenia układu tnącego o drewno. W tym momencie piła łańcuchowa wykonująca ruch po bieżni prowadnicy zaczęła skrawać drewno. W ten sposób wykonywany był jeden rzaz. Po wykonaniu pierwszych 50 rzazów silnik pilarki wyłączano i po ostygnięciu układu tnącego pobierano odciski krawędzi tnących wszystkich ogniw piły. Ponownie pobierano odciski po wykonaniu 100 rzazów, a następnie wykonywano co 100 kolejnych rzazów. Za każdym razem po wykonaniu odcisków uzupełniano paliwo i olej w pilarce oraz kontrolowano stopień napięcia wstępnego piły. Badania przeprowadzono do momentu aż piła przy zadanej sile posuwu przestawała skrawać. Wtedy po zakończeniu serii pomiarowej wykonywano odciski ostatni raz dla danej piły. Przyjęto, że w zadanych warunkach skrawanie piłą o tak zużytych krawędziach tnących jest niemożliwe.

Rys. 43. *Pomiar promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej*

Podczas badań mierzono również czas skrawania. Pomiary te wykonywano w celu późniejszego obliczenia wartości powierzchniowej wydajności skrawania. Czas skrawania mierzono stoperem cyfrowym Casio z dokładnością do 0,01 s.

Aby z zebranych odcisków odczytać zmierzony promień zaokrąglenia, najpierw wykonano zdjęcia odcisków pod mikroskopem optycznym Nikon ALPHASHOT-2. Mikroskop ten wyposażony jest w oświetlacz halogenowy OH 1 do obserwacji w świetle odbitym. Obraz z mikroskopu przekazywany jest na ekran komputera przy pomocy kamery cyfrowej. W celu wykonania zdjęć płytkę z wykonanym odciskiem umieszczano na stoliku mikroskopu, a następnie przy 400 – krotnym powiększeniu zapisywano uzyskany obraz na dysku komputera za pomocą programu CYBERLINK POWER DIRECTOR v7.

Analizę zdjęć z mikroskopu wykonano w programie CSS Video Frame Grabber. Pomiar promienia zaokrąglenia odcisku ostrza wykonywano poprzez nałożenie na odcisk krawędzi okręgu o odpowiadającym tej krawędzi promieniu (rys. 43). Promień zaokrąglenia krawędzi tnącej mierzono μm.

4.5 Sposób opracowania danych pomiarowych

Wyniki pomiarów wykonanych kamerą do zdjęć szybkich umożliwiły obliczenie wartości kąta odchylenia ogniw tnących przy pomocy poniższego wzoru:

$$\alpha = arcsin\frac{\Delta Y}{l} \qquad [°] \quad [15]$$

gdzie: ΔY – różnice pomiędzy wartościami współrzędnych nitów w osi Y [mm],

l – odległość pomiędzy osiami nitów [mm] (w przypadku badanych ogniw wynosi 10 mm).

Różnice pomiędzy wartościami współrzędnych osi nitów określono z zależności:

$$\Delta Y = Y_1 - Y_2 \qquad [mm] \quad [16]$$

gdzie: Y_1 – odległość osi nitu nr 1 od bieżni prowadnicy [mm],

Y_2 – odległość osi nitu nr 2 od bieżni prowadnicy[mm].

Sposób pomiaru odległości opisano w rozdziale 4.4.2 oraz na rysunku 38.

W obliczeniach średnich wartości posługiwano się bezwzględną wartością kąta.

Na podstawie czasu mierzonego stoperem z dokładnością do 0,01s oraz powierzchni wykonanego rzazu obliczono powierzchniową wydajność skrawania:

$$W = \frac{A}{t} \qquad [cm^2 \cdot s^{-1}] \quad [17]$$

gdzie: W - powierzchniowa wydajność skrawania [$cm^2 \cdot s^{-1}$]

A – powierzchnia rzazu [cm^2],

t – czas skrawania [s].

Jednostka $cm^2 \cdot s^{-1}$ nie jest jednostką układu SI, ale była wykorzystywana w podobnych badaniach [Górski 1996, Maciak 2001, Gendek 2006, Botwin 1965] przypuszczalnie dlatego, że daje wartości liczbowe łatwe do interpretacji i zapisu. W przypadku zastosowania jednostki $m^2 \cdot s^{-1}$ zgodnej z układem SI uzyskane wartości liczbowe były by trudne do praktycznej interpretacji.

Ustalone wartości promieni zaokrąglenia krawędzi tnącej oraz obliczona powierzchnia wykonanego rzazu wykorzystano do obliczenia średniej intensywności zużycia krawędzi tnących $I_{śr}$:

$$I_{śr} = \frac{\rho_k - \rho_0}{A} \qquad [\mu m \cdot m^{-2}] \quad [18]$$

gdzie: ρ_0 – średni promień zaokrąglenia krawędzi tnącej po naostrzeniu piły [µm];

ρ_k – średni promień zaokrąglenia krawędzi tnącej po zakończeniu serii pomiarowej [µm];

A – całkowita powierzchnia wykonanego rzazu [m^2].

Ponieważ w badaniach intensywność zużycia próbki miały przekrój 14 cm x 14 cm

to powierzchnia przekroju pojedynczego rzazu wynosiła 196 cm^2.

Wyznaczono też intensywności chwilowe I pomiędzy kolejnymi pomiarami stępienia wykorzystując zależność 19:

$$I = \frac{\Delta\rho}{\Delta A} \qquad [\mu m \cdot m^{-2}] \quad [19]$$

gdzie: $\Delta\rho$ – przyrost średniego promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej pomiędzy kolejnymi jej pomiarami [µm];

ΔA – powierzchnia rzazu wykonana pomiędzy kolejnymi pomiarami promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej [m^2].

Przyrost średniego promienia zaokrąglenia ostrzy wyznaczono z zależności 20:

$$\Delta_\rho = \rho_{i+1} - \rho_i \quad [\mu m] \quad [20]$$

gdzie: ρ_i – średni promień zaokrąglenia krawędzi i- tego pomiaru [μm];

ρ_{i+1} – średni ostatni promień zaokrąglenia krawędzi tnącej pomiaru i +1 [μm].4

Powierzchnię rzazu wykonaną pomiędzy kolejnymi pomiarami promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej wyznaczono z zależności 21:

$$\Delta A = A_{i+1} - A_i \quad [m^2] \quad [21]$$

gdzie: A_i – całkowita powierzchnia rzazu wykonana do momentu i-tego pomiaru promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej [m^2];

A_{i+1} - całkowita powierzchnia rzazu wykonana do momentu pomiaru i+1 promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej [m^2].

Na potrzeby opisywanych badań wprowadzono współczynnik intensywności zużycia krawędzi tnącej Δ_ρ. Zastosowany on będzie do oceny i porównania wpływu zmian siły posuwu oraz napięcia wstępnego na intensywność wzrostu promienia krawędzi tnącej. Jest to tangens kąta pochylenia linii trendu w stosunku do osi odciętych. Wartość liczbowa tego współczynnika odpowiada wartości współczynnika kierunkowego linii trendu. Im większe wartości przyjmuje ten współczynnik tym intensywniej wzrasta promień zaokrąglenia krawędzi tnącej. Jest to współczynnik bezwymiarowy.

Współczynnik intensywności zużycia krawędzi tnących można określić następującą zależnością:

$$\Delta_\rho = tg\rho \quad [22]$$

gdzie: ρ – kąt nachylenia linii trendu zmiany promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej w stosunku do osi odciętych.

W pracy będzie analizowana również intensywność spadku wartości powierzchniowej wydajności skrawania wraz ze wzrostem promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej. Definiowana ona będzie jako spadek uzyskiwanej wartości powierzchniowej wydajności skrawania wraz z przyrostem promienia krawędzi tnącej o 1 μm.

Obróbkę danych oraz obliczanie wartości z wyżej wskazanych wzorów wykonywano w programie Microsoft Excel. Przy jego pomocy wykonano również niektóre wykresy.

Analizę uzyskanych wyników przeprowadzono przy pomocy programu Statistica wersja 13.3. Obliczano średnie i wartości odchylenia standardowego. W przypadku pomiarów intensywności stępienia oraz kąta odchylenia ogniw sprawdzono normalność rozkładu oraz równość wariancji uzyskanych zbiorów danych z porównywanych serii pomiarowych,

a następnie, wykonywano test t-studenta istotności różnic między średnimi dla prób niezależnych. W przypadku, gdyby stwierdzono, że wariancje zbiorów danych nie są jednorodne zastosowano by test Welcha [Wątroba 2009, Sobczyk 2007]. Testowano dwie hipotezy alternatywne: H_0 - różnica między średnimi nie jest istotna statystycznie oraz H_1 – różnica pomiędzy średnimi jest istotna statystycznie. Jeśli poziom istotności $p<0,05$ oznaczało to, że hipotezę H_0 należy odrzucić, a przyjąć H_1. Natomiast jeśli poziom istotności $p>0,05$ wtedy było brak podstaw aby odrzucić hipotezę H_0. Przyjmowano wtedy,

że występują istotne różnice statystyczne między zbiorami danych.

Zależności pomiędzy powierzchnią wykonanego rzazu a promieniem zaokrąglenia oraz wydajnością skrawania analizowano wyznaczając równania regresji oraz analizując wartości współczynników korelacji liniowej Pearsona [Bruchwald 1997].

5. Wyniki

5.1 Wyniki pomiarów kąta odchylenia ogniw

W rozdziale tym przedstawiono opracowanie wyników pomiarów kątów odchylenia ogniw. Opracowano je na podstawie filmów wykonanych kamerą do zdjęć szybkich. Analizowano wartości bezwzględne kątów. Na rysunku 44 przedstawiono przykładowy przebieg procesu skrawania. Klatki pochodzą z filmu ze skrawania piłą napiętą z siłą posuwu 70 N. Dla lepszego zobrazowania zmian odchylenia ogniwa przedstawiono co dziesiątą klatkę filmu. Odstęp czasowy między przedstawionymi ujęciami wynosi 0,00083 s. Prześledźmy zachowanie się ogniwa zakreślonego elipsą. Na rys. 44a stopka ogniwa dotyka bieżni prowadnicy, natomiast jego piętka zaczyna się oddalać od bieżni prowadnicy. Ogniwo jest odchylone w stosunku do bieżni prowadnicy. Ogniwo rozpoczyna proces skrawania drewna. Na rys. 44b widać wyraźnie, że ogniwo skrawa. Piętka i stopka ogniwa straciły kontakt z bieżnią prowadnicy. Ogniwo straciło kontakt z bieżnią prowadnicy. Jest odsunięte od bieżni. Na rys 44c piętka ogniwa odzyskała kontakt z bieżnią prowadnicy, stopka w dalszym nie ma kontaktu z bieżnią prowadnicy. Ogniwo jest odchylone w przeciwną stronę niż na rys. 44a.

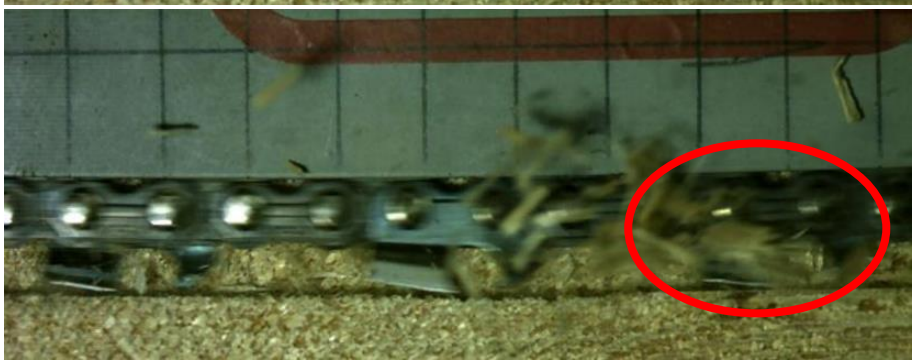
Na ostatnim ujęciu (rys. 44d) ogniwo odzyskało kontakt z bieżnią prowadnicy, ale przestało skrawać. Widoczne na kolejnych ujęciach wióry przemieszczają się zgodnie z kierunkiem przemieszczania ogniw piły na skutek ruchu piły. Analiza filmów wykazała, że podczas pracy występują przerwy w procesie skrawania. Kiedy żadne z ogniw nie jest zagłębione w rzazie. Ogniwa wychylają się pod różnym kątem. Są momenty, że bardziej odchylona od bieżni prowadnicy jest piętka ogniwa, a bywają momenty, że bardziej odchylona jest przeciwległa część ogniwa.

a)

b)

c)

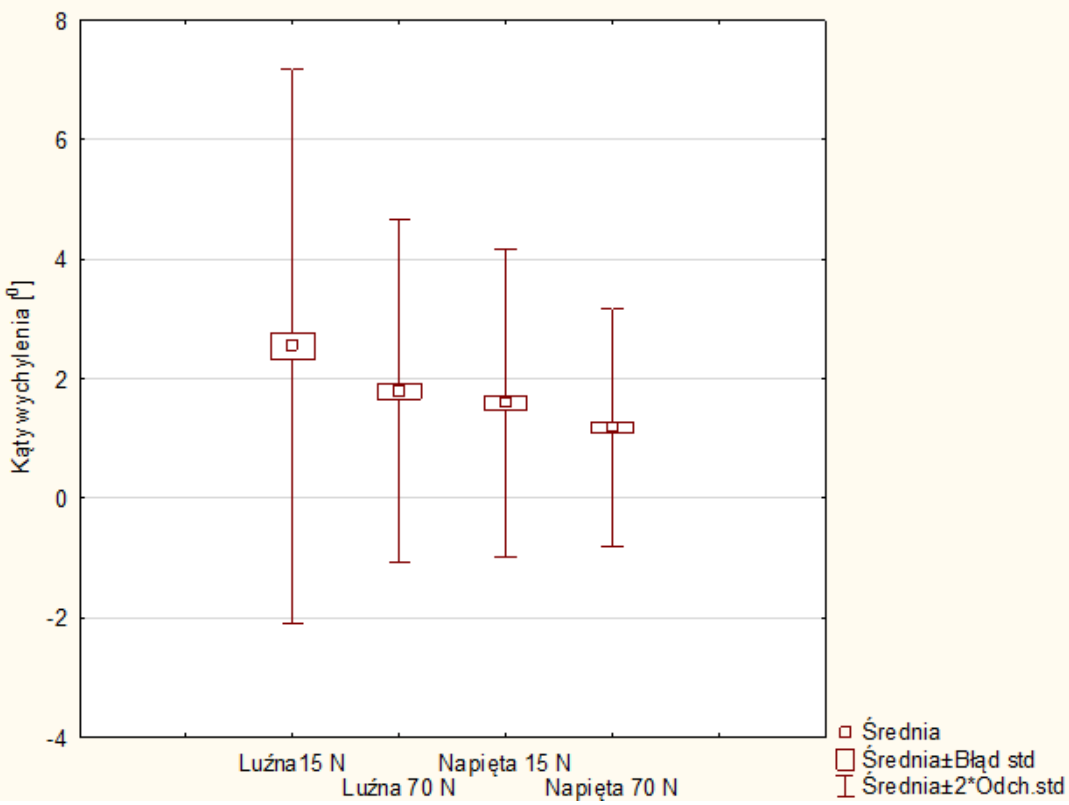
d)



Rys. 44. *Zachowanie się ogniw piły podczas procesu skrawania*

W tabeli 1 oraz na rys 45 przedstawiono porównanie wartości średniej, wartości maksymalnej oraz odchylenia standardowego kąta odchylenia ogniw piły łańcuchowej. Największą średnią i maksymalną wartością bezwzględną kąta odchylenia ogniwa uzyskano przy skrawaniu zadaną siłą posuwu o wartości 15 N oraz luźnym wstępnym napięciu piły. W tym przypadku średnia wartość kąta odchylenia ogniwa wynosi 2,55º. Maksymalna wartość tego kąta wyniosła 9,10º. Wartość odchylenia standardowego

wynosiła 2,32°. Przy skrawaniu piłą luźną ale z większą zadaną siłą posuwu wynoszącą 70 N, średnia wartość kąta wyniosła 1,79°, a maksymalna wartość 6,68° przy odchyleniu standardowym 1,43°.



Rys. 45. *Bezwzględne wartości kąta odchylenia ogniwa od bieżni prowadnicy w badanych przypadkach*

Tab. 1. *Zestawienie uzyskanych bezwzględnych wartości kąta odchylenia ogniwa od bieżni prowadnicy*

Rodzaj napięcia i siły posuwu	Kąt odchylenia ogniwa od bieżni prowadnicy [°]			
	Średnia wartość	Minimum	Maksimum	Odchylenie standardowe
Piła luźna 15 N	2,55	0,00	9,10	2,32
Piła luźna 70 N	1,79	0,00	6,68	1,43
Piła napięta 15 N	1,59	0,00	6,00	1,29
Piła napięta 70 N	1,18	0,00	3,92	0,10

Można zauważyć, że wraz ze wzrostem wartości siły posuwu zmniejsza się średnia wartość kąta odchylenia ogniw piły. Przy skrawaniu piłą prawidłowo napiętą z siłą posuwu 15 N średnia wartość kąta wyniosła 1,59°, a maksymalna 6° przy odchyleniu standardowym wynoszącym 1,29°. Natomiast przy tym samym napięciu i sile

posuwu 70 N wykazano najmniejszą stwierdzoną w opisywanych badaniach średnią wartość kąta odchylenia wynoszącą 1,18°, a jego maksymalna wartość wynosiła 3,92° przy odchyleniu standardowym wynoszącym 0,10°. Ponieważ analizowano wartości bezwzględne w każdym przypadku najmniejsza wartość kątów wynosiła 0°. Można zauważyć, że w każdym przypadku wartość odchylenia jest wyższa dla mniej napiętej piły i mniejszej wartości sił posuwu. Przy zadanej sile posuwu o wartości 15 N i pile luźnej wartość odchylenia standardowego wynosi 2,32° przy wzroście napięcia spada do 1,29°. Podobnie jest dla piły pracującej z siłą 70 N. Dla piły luźnej wartość odchylenia standardowego wynosi 1,43°, a dla napiętej 1,0°. Wartości prawdopodobieństwa testowego pomiędzy analizowanymi wariantami przedstawiono w tabeli 2. Wykazano istotną różnicę wartości średnich kątów pomiędzy badanymi przypadkami. W przypadku skrawania piłą luźno napiętą, średni kąt odchylenia ogniw jest istotnie mniejszy w przypadku większej wartości siły wynoszącej 70 N (p=0,0033). Podobnie jest w przypadku pracy piłą napiętą prawidłowo. Wtedy średni kąt odchylenia jest istotnie niższy również podczas pracy z siłą posuwu o wartości wynoszącej 70 N (p=0,0063). Porównując średnie kąty odchylenia ogniw przy tej samej wartości siły posuwu ale różnym napięciu wstępnym, można stwierdzić, że dla bardziej napiętej piły uzyskiwano istotnie mniejsze wartości kąta odchylenia ogniw. Dla badanych stanów napięcia wstępnego przy zadanej wartości siły posuwu o wartości 15 N istotnie mniejszą wartość średniego kąta odchylenia ogniw uzyskano w przypadku piły prawidłowo napiętej (p= 0,0001). Podobnie przy skrawaniu z zadaną siłą posuwu wynoszącą 70 N istotnie mniejszą wartość średniego kąta odchylenia ogniw uzyskano w przypadku piły prawidłowo napiętej (p= 0,0002). Podsumowując można stwierdzić, że spadek napięcia wstępnego piły oraz zmniejszenie wartości zadanej siły posuwu istotnie zwiększa możliwości odchylania się ogniw piły w płaszczyźnie rzazu.

Tab. 2. *Zestawienie wartości prawdopodobieństwa testowego p pomiędzy analizowanymi wariantami pracy*

Napięcie i siła posuwu	Napięcie i siła posuwu	Poziom istotności p
Luźna 15 N	Luźna 70 N	0,0033
Luźna 15 N	Napięta 15 N	0,0001
Luźna 15 N	Napięta 70 N	0,0000
Luźna 70 N	Napięta 70 N	0,0002
Napięta 15 N	Napięta 70 N	0,0063

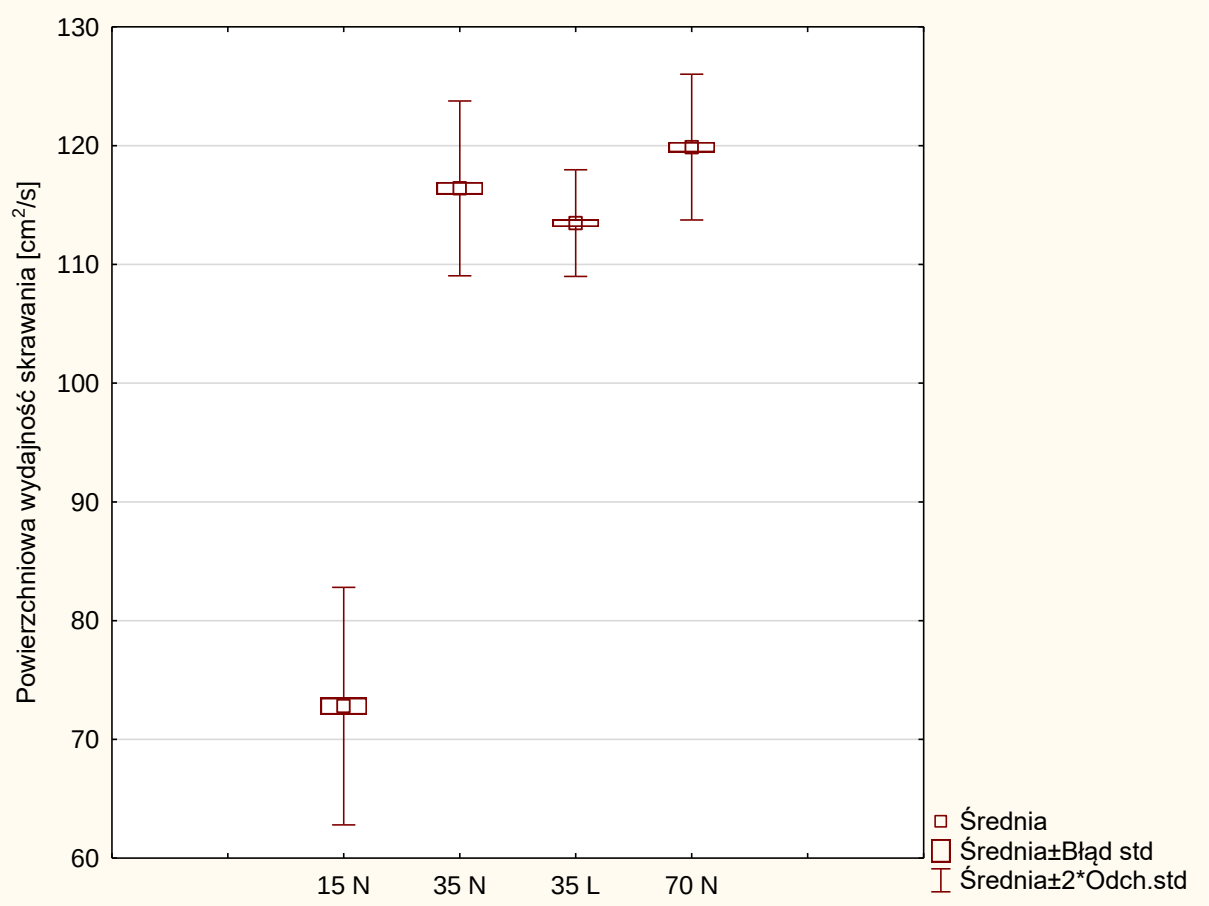
5.2 Wartości powierzchniowej wydajności skrawania uzyskane podczas badań

Aby sprawdzić jaka jest w każdym badanym przypadku warunków skrawania powierzchniowa wydajność skrawania piły po naostrzeniu obliczono średnią wydajność z 50 pierwszych rzazów. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 3 oraz na rys 46.

Tab. 3. *Średnie wartości powierzchniowych wydajności skrawania uzyskane podczas 50 pierwszych rzazów*

Warianty pomiarowe	Średnia wartość powierzchniowej wydajności skrawania [$cm^2 \cdot s^{-1}$]	Minimum wartość powierzchniowej wydajności skrawania [$cm^2 \cdot s^{-1}$]	Maksimum wartość powierzchniowej wydajności skrawania [$cm^2 \cdot s^{-1}$]	Odchylenie standardowe [$cm^2 \cdot s^{-1}$]
15 N- napięta	72,8	64,9	84,12	5,00
35 N - napięta	116,4	106,52	122,5	3,68
35L - luźna	113,47	109,5	118,07	2,24
70 N - napięta	119,88	111,36	123,27	3,07

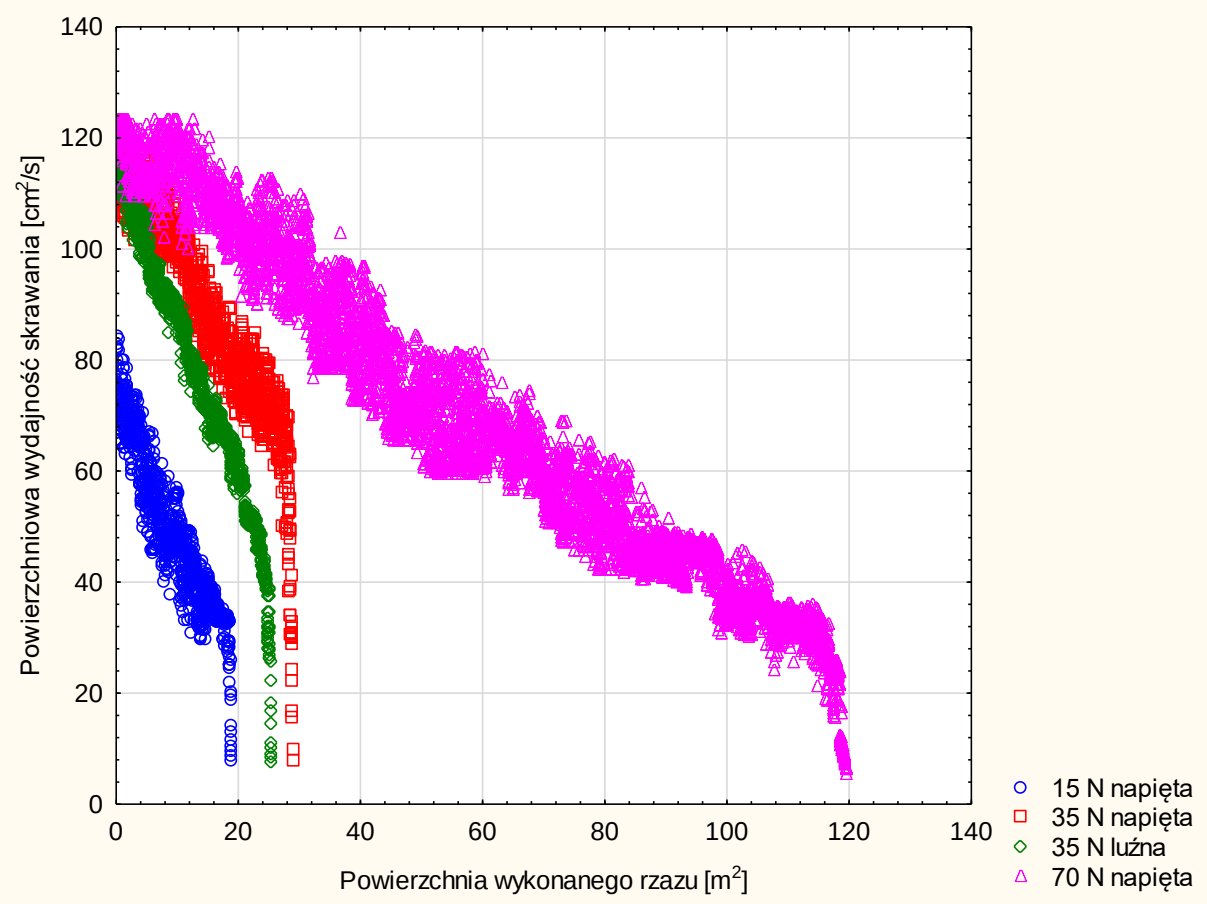
Podczas początkowych 50 rzazów największą wydajnością skrawania cechowała się piła napięta skrawająca przy sile posuwu wynoszącej 70 N. W tym przypadku średnia wartość powierzchniowej wydajności skrawania wynosiła 119,88 $cm^2 \cdot s^{-1}$ przy odchyleniu standardowym 3,07 $cm^2 \cdot s^{-1}$. Trochę niższą wydajność osiągnięto piłą napięty przy sile posuwu 35 N – wynosiła ona 116,40 $cm^2 \cdot s^{-1}$ przy odchyleniu standardowym 3,68 $cm^2 \cdot s^{-1}$. Różnica pomiędzy tymi przypadkami była istotna statystycznie ($p = 0,000$). Przy takiej samej wartości siły posuwu wynoszącej 35 N ale pile luźnej wydajność była niższa, jej wartość wynosiła 113,47 $cm^2 \cdot s^{-1}$ przy odchyleniu standardowym 2,24 $cm^2 \cdot s^{-1}$. Różnica uzyskana przy sile posuwu wynoszącej 35 N dla różnych stanów napięcia wstępnego była istotna statystycznie ($p = 0,000$). Najniższą wartość powierzchniowej wydajności skrawania osiągnięto piłą napiętą przy sile posuwu 15 N. Jej średnia wartość wynosiła 72,80 $cm^2 \cdot s^{-1}$.



Rys. 46. *Średnie wartości powierzchniowych wydajności skrawania uzyskane podczas 50 pierwszych rzazów*

Na rysunku 47 przedstawiono zależności powierzchniowej wydajności skrawania od powierzchni wykonanego rzazu uzyskane dla wszystkich badanych przypadków. Dla wszystkich badanych przypadków uzyskiwana wartość powierzchniowe wydajności skrawania maleje wraz z zwiększającą się powierzchnią wykonanego rzazu. Dla ułatwienia stosowane będą skróty jak w tabeli 3, np. dla piły napiętej, pracującej z zadaną siłą posuwu 35 N – 35 N napięta.

W każdym badanym przypadku po osiągnięciu granicznej wartości powierzchni wykonanego rzazu następował gwałtowny spadek osiąganej wartości powierzchniowej wydajności skrawania. Aż do moment w którym skrawanie z zadaną siłą posuwu było niemożliwe. Ostrza piły nie zagłębiały się w rzaz. Najmniejsze wartości powierzchniowej wydajności skrawania oraz najszybszy jej spadek otrzymano podczas skrawania piłą napiętą z siłą posuwu 15 N. Piła w tym wypadku przestała skrawać po wykonaniu 18,95 m^2 powierzchni rzazu.



Rys. 47. *Porównanie zmiany powierzchniowej wydajności skrawania przy różnych wartościach zadanej siły posuwu oraz napięcia wstępnego piły*

W przypadku skrawania z zadaną siłą posuwu 35 N, które prowadzono dla dwóch stopni napięcia. Większą wydajnością cechowała się piła prawidłowo napięta. Tak napiętą piłą możliwe było również wykonanie większej powierzchni rzazu niż piłą luźną. Piła luźna przestała skrawać po wykonaniu 25,48 m^2 rzazu, piła prawidłowo napięta wykonała 29,98 m^2 rzazu.

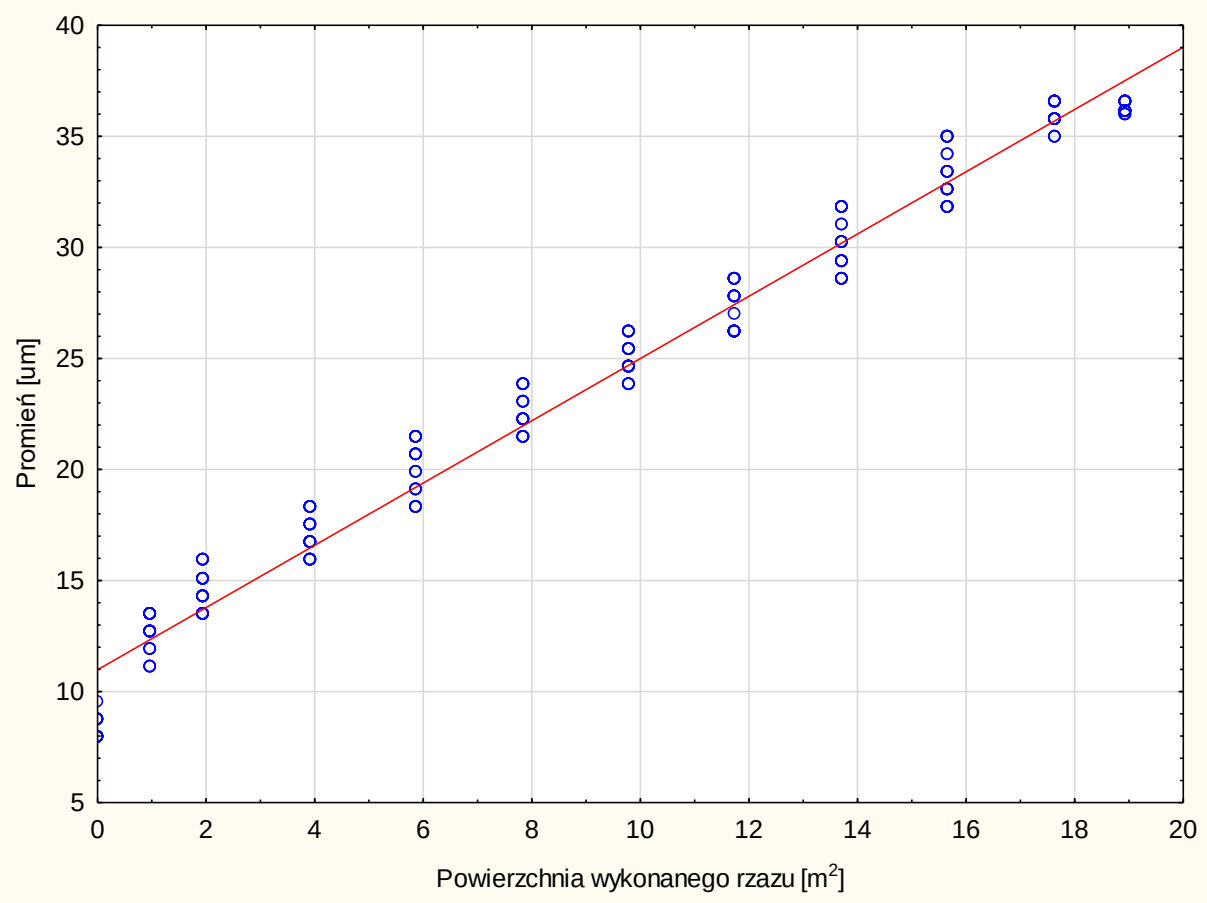
W przypadku piły luźnej można również zauważyć szybszy spadek powierzchniowej wydajności skrawania niż przy pile napiętej.

Najwolniej zmniejszała się wartość powierzchniowej wydajności skrawania piły napiętej przy sile posuwu wynoszącej 70 N. W tym przypadku możliwe było wykonanie 119,56 m^2 rzazu.

5.3 Zależność promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej ostrza oraz wydajności skrawania od powierzchni wykonanego rzazu uzyskane dla poszczególnych przypadków

5.3.1 Siła posuwu o wartości 15 N oraz prawidłowe napięcie wstępne piły

Na rysunku 48 przedstawiono zależność wartości promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej od wykonanej powierzchni rzazu. Uzyskano ją podczas pracy z zadaną siłą posuwu wynoszącą 15 N przy prawidłowym napięciu wstępnym piły łańcuchowej. Promień zaokrąglenie krawędzi tnącej zwiększa się wraz ze wzrostem powierzchni wykonanego rzazu. Uzyskano zależność liniową.



Rys. 48. *Zależność wzrostu promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej od powierzchni wykonanego rzazu podczas skrawania piłą napiętą z siłą posuwu 15 N*

Średni promień zaokrąglenia krawędzi tnącej wzrósł o 28,01 µm od 8,25 µm do 36,26 µm

po wykonaniu 18,95 m^2 powierzchni rzazu. Równanie prostej przedstawionej na rys. 48

opisującej zależność zmiany promienia krawędzi tnących ogniw od wykonanej powierzchni rzazu, przy skrawaniu z siłą posuwu wynoszącą 15 N piłą napiętą prawidłowo, można zapisać następującą zależnością:

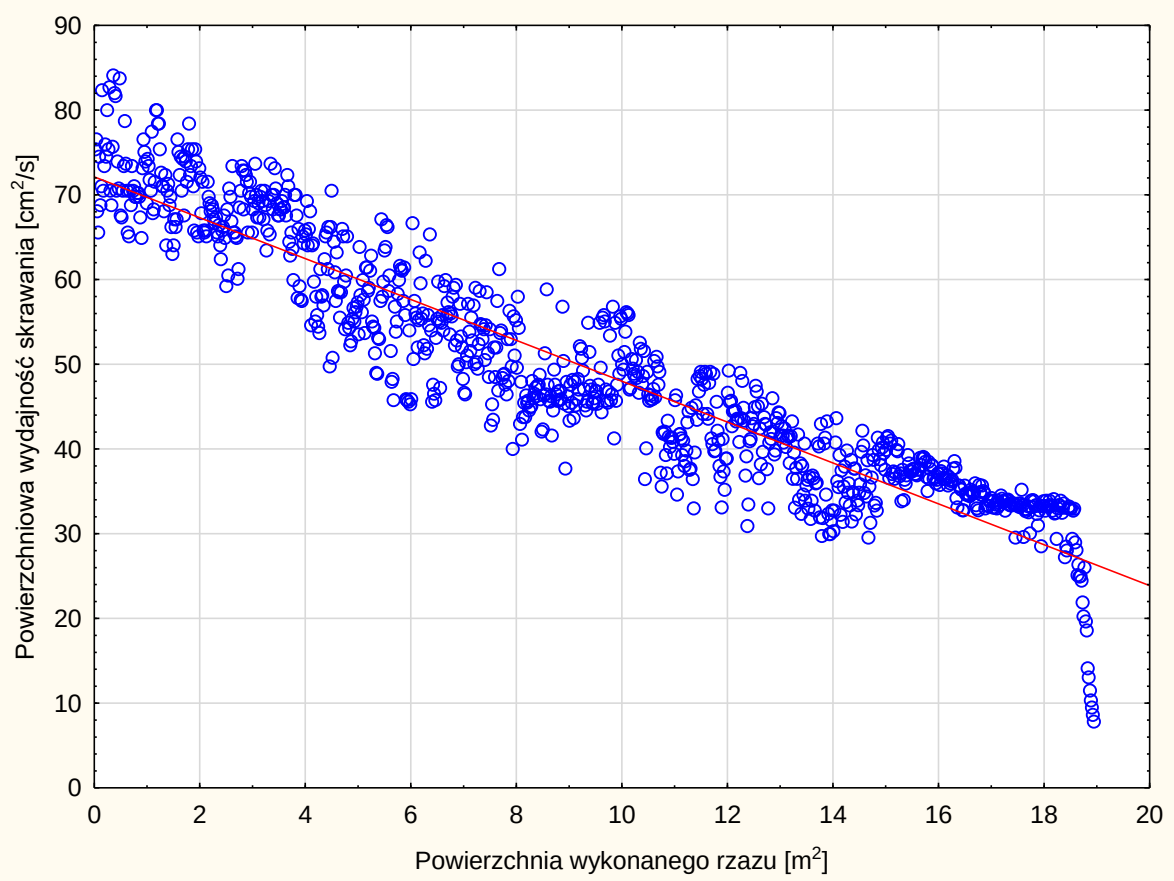
$$\rho_{15N} = 1{,}4016 \cdot A + 10{,}9835 \qquad r = 0{,}98 \quad [23]$$

gdzie: ρ_{15N} – promień krawędzi tnącej przy skrawaniu piłą napiętą przy sile posuwu 15 N [μm];

A – powierzchnia wykonanego rzazu [m^2];

r – współczynnik korelacji.

Wysoka wartość współczynnika korelacji świadczy o dobrym dopasowaniu prostej.



Rys. 49. *Zależność powierzchniowej wydajności skrawania od powierzchni wykonanego rzazu piłą napiętą z siłą posuwu 15 N*

Na rys. 49 przedstawiono zależność wartości powierzchniowej wydajności skrawania od powierzchni wykonanego rzazu w trakcie skrawania z zadaną wartością siły posuwu wynoszącą 15 N, piłą napiętą prawidłowo. Równanie prostej przedstawionej na rys. 49

opisującej spadek powierzchniowej wydajności skrawania wraz z wykonaną powierzchnią rzazu w zadanych warunkach pracy, można zapisać następująco:

$$W_{15N} = -2{,}4128 \cdot A + 72{,}1312 \qquad r = -0{,}94 \qquad [24]$$

gdzie: W_{15N} – Powierzchniowa wydajność skrawania przy skrawaniu piłą prawidłowo napiętą oraz zadanej sile posuwu 15 N [$cm^2 \cdot s^{-1}$];

A – powierzchnia wykonanego rzazu [m^2];

r – współczynnik korelacji.

Wysoka wartość współczynnika korelacji świadczy o dobrym dopasowaniu uzyskanej zależności.

Po przekształceniu równania 23 otrzymujemy następującą zależność:

$$A = \frac{\rho_{15N} - 10{,}9835}{1{,}4016} \qquad [25]$$

Podstawiając otrzymaną zależność 25 do równania 24 otrzymujemy zależność pozwalającą obliczyć spodziewaną wartość powierzchniowej wydajności skrawania w zależności od promienia zaokrąglenia krawędzi tnących piły, przy zadanej wartości siły posuwu wynoszącej 15 N.

$$W_{15N} = \frac{-2{,}4128 \cdot \rho_{15N} + 129{,}0017}{1{,}4016} \qquad [26]$$

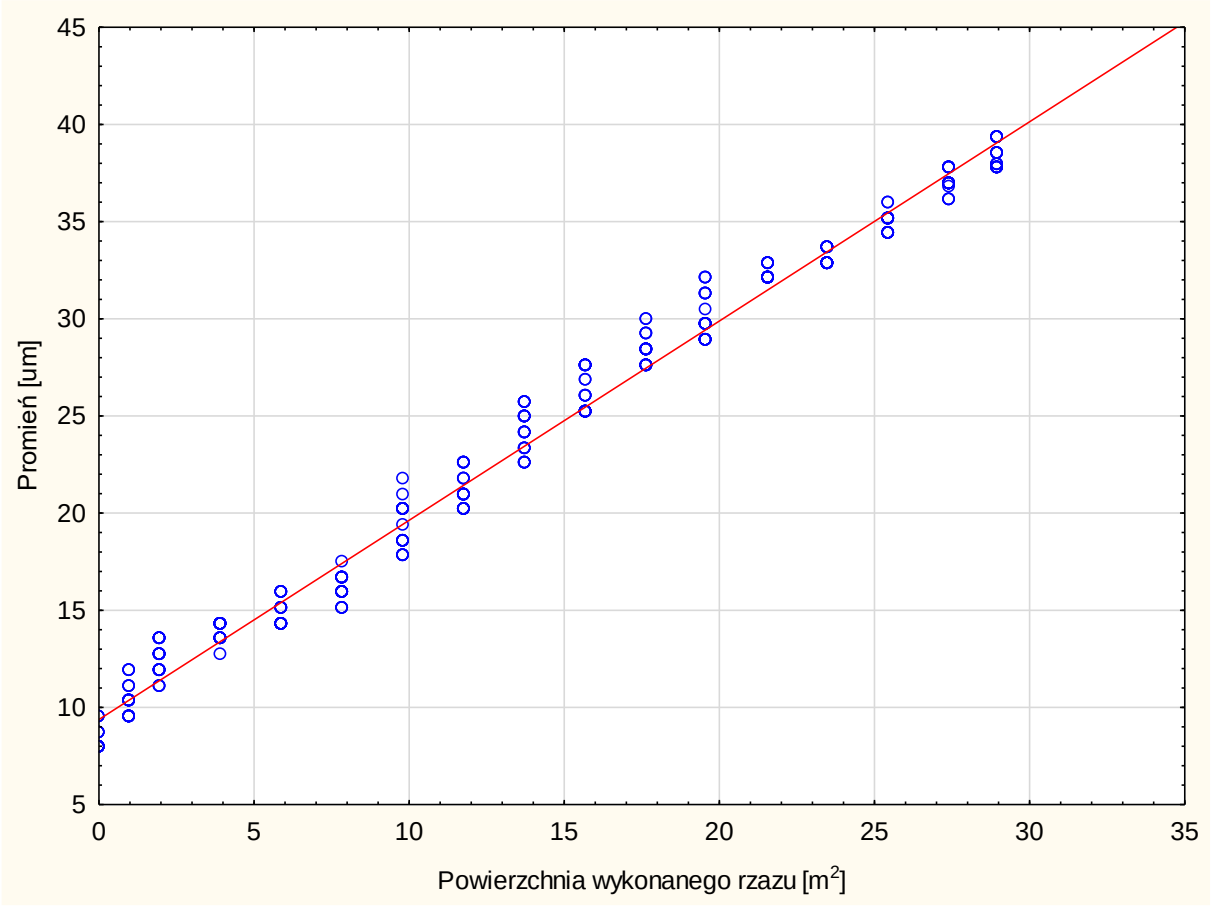
Wykorzystując równanie 26 można obliczyć, że wzrost promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej wynoszący 1 μm powoduje spadek powierzchniowej wydajności skrawania średnio

o 1,7 $cm^2 \cdot s^{-1}$ w przypadku skrawania z siłą posuwu wynoszącą 15 N, piłą prawidłowo napiętą.

5.3.2 Siła posuwu o wartości 35 N oraz prawidłowe napięcie wstępne piły

Na rysunku 50 przedstawiono zależność promienia zaokrąglenia krawędzi tnących ostrzy piły od powierzchni wykonanego rzazu w trakcie pracy z zadaną siłą posuwu wynoszącą 35 N, piłą prawidłowo napiętą. Podobnie jak w poprzednim

przypadku wzrost promienia krawędzi tnących ma charakter liniowy rosnący. Średni promień wzrósł o 30,22 µm od 8,24 µm do 38,46 µm po wykonaniu 28,98 m^2 powierzchni rzazu.



Rys. 50. *Zależność wzrostu promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej od powierzchni wykonanego rzazu podczas skrawania piłą napiętą z siłą posuwu 35 N*

Równanie prostej przedstawionej na rys. 50 opisującej zależność promienia krawędzi tnących od wykonanej powierzchni rzazu, przy skrawaniu z siłą posuwu wynoszącą 35 N, piłą napiętą można zapisać następująco:

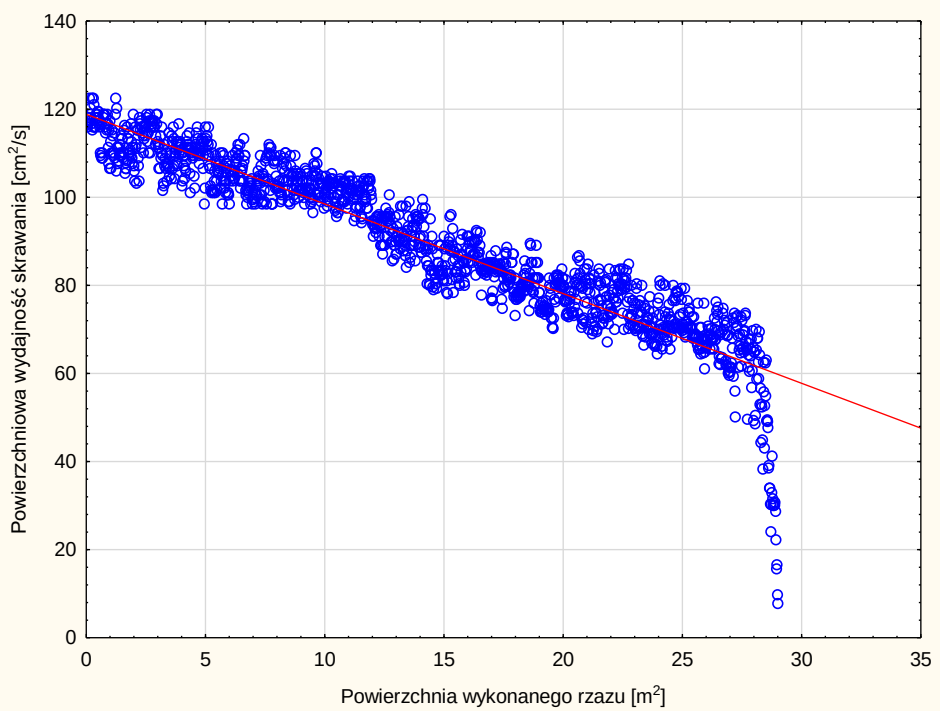
$$\rho_{35N} = 1{,}0255 \cdot A + 3{,}377 \qquad r = 0{,}99 \quad [27]$$

gdzie: ρ_{35N} – wartość promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej podczas skrawania piłą prawidłowo napiętą z siłą posuwu 35 N,

A – powierzchnia wykonanego rzazu [m^2],

r – współczynnik korelacji.

Wysoka wartość współczynnika korelacji świadczy o dobrym dopasowaniu uzyskanej zależności do danych uzyskanych z pomiarów.



Rys. 51. *Zależność powierzchniowej wydajności skrawania od powierzchni wykonanego rzazu piłą napiętą z siłą posuwu 35 N*

Na rys. 51 przedstawiono zależność wartości powierzchniowej wydajności skrawania od powierzchni wykonanego rzazu w trakcie skrawania z siłą posuwu wynoszącą 35 N, piłą napiętą.

Równanie prostej przedstawionej na rys. 51 opisującej spadek powierzchniowej wydajności skrawania wraz z wykonaną powierzchnią rzazu, przy skrawaniu z siłą posuwu wynoszącą 35 N piłą napiętą prawidłowo, można zapisać następująco :

$$W_{35n} = -2{,}0361 \cdot A + 118{,}8358 \qquad r = -0{,}94 \qquad [28]$$

gdzie: W_{35N} – Powierzchniowa wydajność skrawania przy skrawaniu piłą prawidłowo napiętą z siłą posuwu 35 N [$cm^2 \cdot s^{-1}$]

A – powierzchnia wykonanego rzazu [m^2];

r – współczynnik korelacji.

Wysoka wartość współczynnika korelacji świadczy o dobrym dopasowaniu uzyskanej zależności.

Po przekształceniu równania 27 otrzymujemy następującą zależność:

$$A = \frac{\rho_{35N} - 9{,}377}{2{,}0361} \qquad [29]$$

Podstawiając otrzymaną zależność 29 do równania 28 otrzymujemy zależność pozwalającą obliczyć spodziewaną wartość powierzchniowej wydajności skrawania w zależności
od promienia zaokrąglenia krawędzi tnących piły, przy wartości siły posuwu wynoszącej 35 N dla piły prawidłowo napiętej.

$$W_{35N} = \frac{-\,2{,}0361 \cdot \rho_{35N} + 261{,}0541}{2{,}0361} \qquad [30]$$

Wykorzystując równanie 30 można obliczyć, że w tym przypadku wzrost promienia zaokrąglenia krawędzi tnących o 1 μm powoduje spadek powierzchniowej wydajności skrawania średnio o 1 $cm^2 \cdot s^{-1}$.

5.3.3 Siła posuwu o wartości 35 N oraz luźne napięcie wstępne piły

Zależność promienia zaokrąglenia krawędzi tnących piły od wykonanej powierzchni rzazu, dla piły luźnej pracującej z zadaną siłą posuwu wynoszącą 35 N przedstawiono
na rysunku 52. Wzrost promienia również ma charakter liniowy rosnący. Średni promień wzrósł o 29,2 μm od 8,25 μm do 37,45 μm po wykonaniu 25,48 m^2 powierzchni rzazu. Równanie prostej przedstawionej na rys. 52 opisującej zależność promienia krawędzi tnących piły od wykonanej powierzchni rzazu, przy skrawaniu z siłą posuwu wynoszącą 35 N piłą luźną, można zapisać następująco :

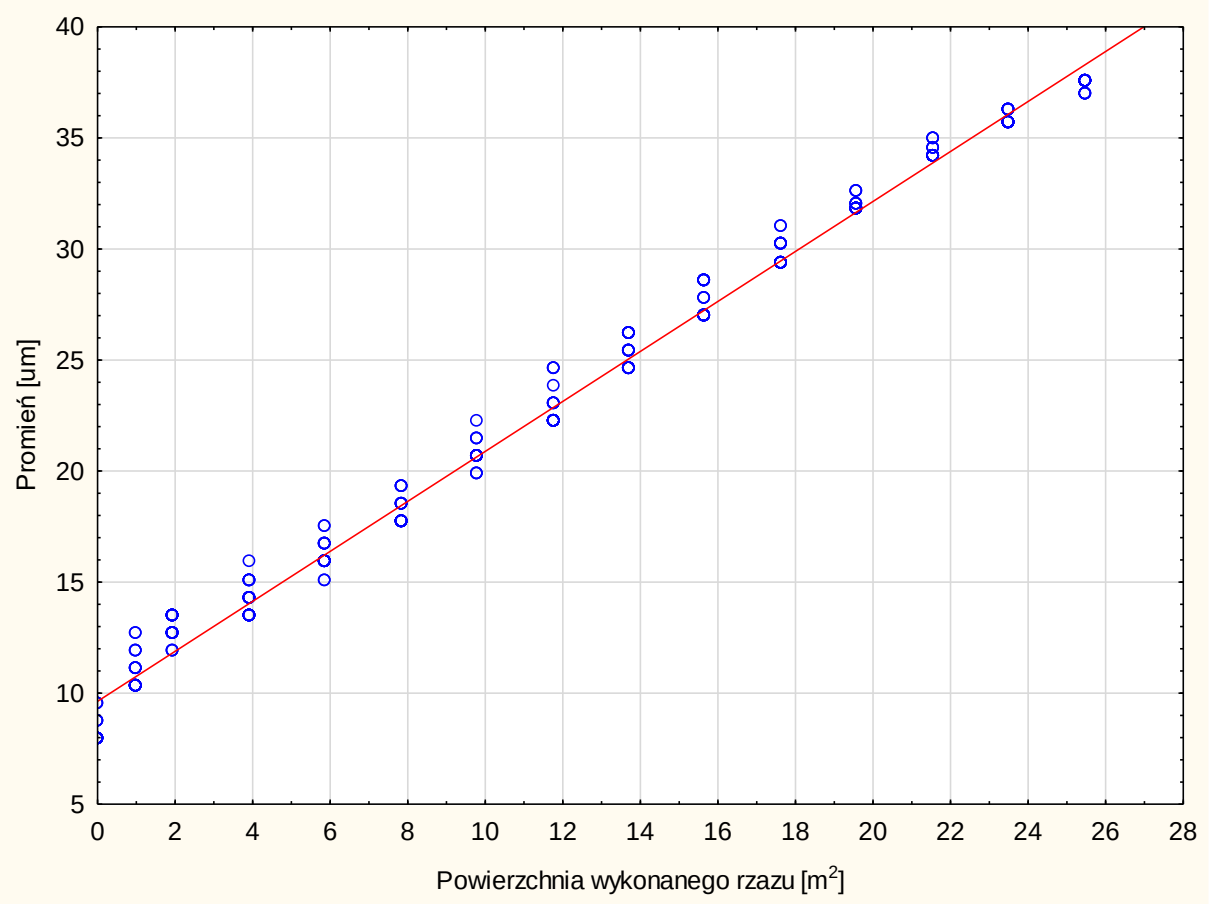
$$\rho_{35L} = 1{,}1253 \cdot A + 9{,}6318 \qquad r = 0{,}99 \qquad [31]$$

gdzie: ρ_{35L} – promień krawędzi tnącej przy skrawaniu piłą luźną z siłą posuwu 35 N [μm];

A – powierzchnia wykonanego rzazu [m^2];

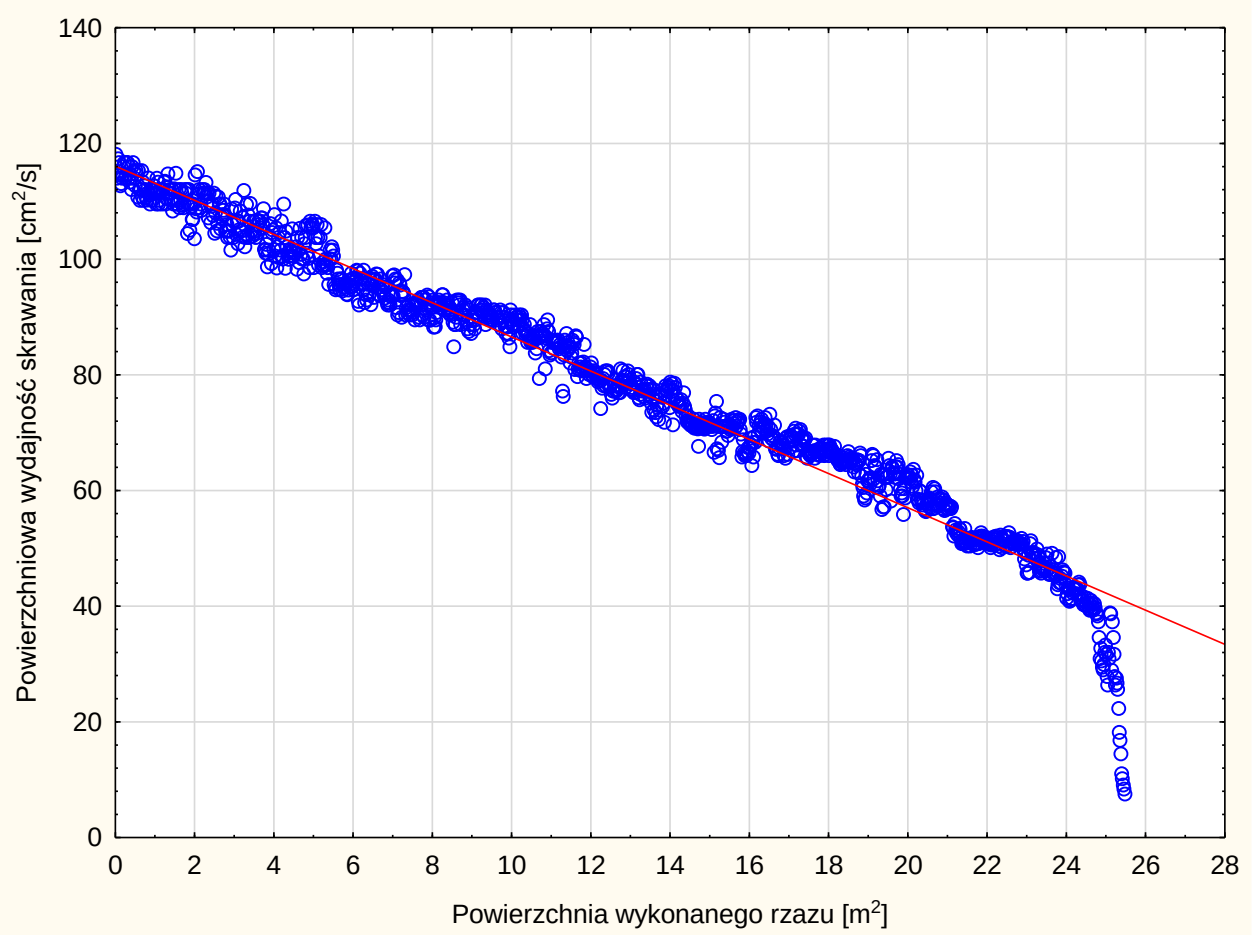
r – współczynnik korelacji.

Wysoka wartość współczynnika korelacji świadczy o dobrym dopasowaniu uzyskanej zależności.



Rys. 52. *Zależność wzrostu promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej od powierzchni wykonanego rzazu podczas skrawania piłą luźną z siłą posuwu 35 N*

Na rysunku 53 przedstawiono zależności powierzchniowej wydajności skrawania od powierzchni wykonanego rzazu.



Rys. 53. *Zależność powierzchniowej wydajności skrawania od powierzchni wykonanego rzazu piłą luźną z siłą posuwu 35 N*

Równanie prostej przedstawionej na rys. 53 opisującej spadek powierzchniowej wydajności skrawania wraz z wykonaną powierzchnią rzazu, przy skrawaniu z siłą posuwu wynoszącą 35 N piłą luźną, można zapisać następująco :

$$W_{35L} = -2{,}9526 \cdot A + 116{,}0687 \qquad r = -0{,}98 \qquad [32]$$

gdzie: W_{35L} – Powierzchniowa wydajność skrawania przy skrawaniu piłą luźną z siłą posuwu 35 N [$cm^2 \cdot s^{-1}$]

A – powierzchnia wykonanego rzazu [m^2];

r – współczynnik korelacji.

Wysoka wartość współczynnika korelacji świadczy o dobrym dopasowaniu uzyskanej zależności.

Po przekształceniu równania 31 otrzymujemy następującą zależność:

$$A = \frac{\rho_{35L} - 9{,}6318}{1{,}1253} \qquad [33]$$

Podstawiając otrzymaną zależność 33 do równania 32 otrzymujemy zależność na wartość powierzchniowej wydajność skrawania w zależności od promienia krawędzi tnącej:

$$W_{35L} = \frac{-2{,}9526 \cdot \rho_{35L} + 159{,}051}{1{,}1253} \qquad [34]$$

Wykorzystując równanie 34 można obliczyć, że w tym przypadku wzrost promienia zaokrąglenia krawędzi tnących o 1 µm powoduje spadek powierzchniowej wydajności skrawania średnio o 2,6 $cm^2 \cdot s^{-1}$.

5.3.4 Siła posuwu 70 N oraz prawidłowe napięcie wstępne piły

Na rysunku 54 przedstawiona została zależność promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej ogniw piły od powierzchni wykonanego rzazu. Uzyskano ją podczas pracy piłą prawidłowo napiętą, przy zadanej wartości siły posuwu wynoszącej 70 N. Średni promień zaokrąglenia wzrósł o 37,88 µm od 8,31 µm do 46,19 µm po wykonaniu 119,56 m^2 powierzchni rzazu.

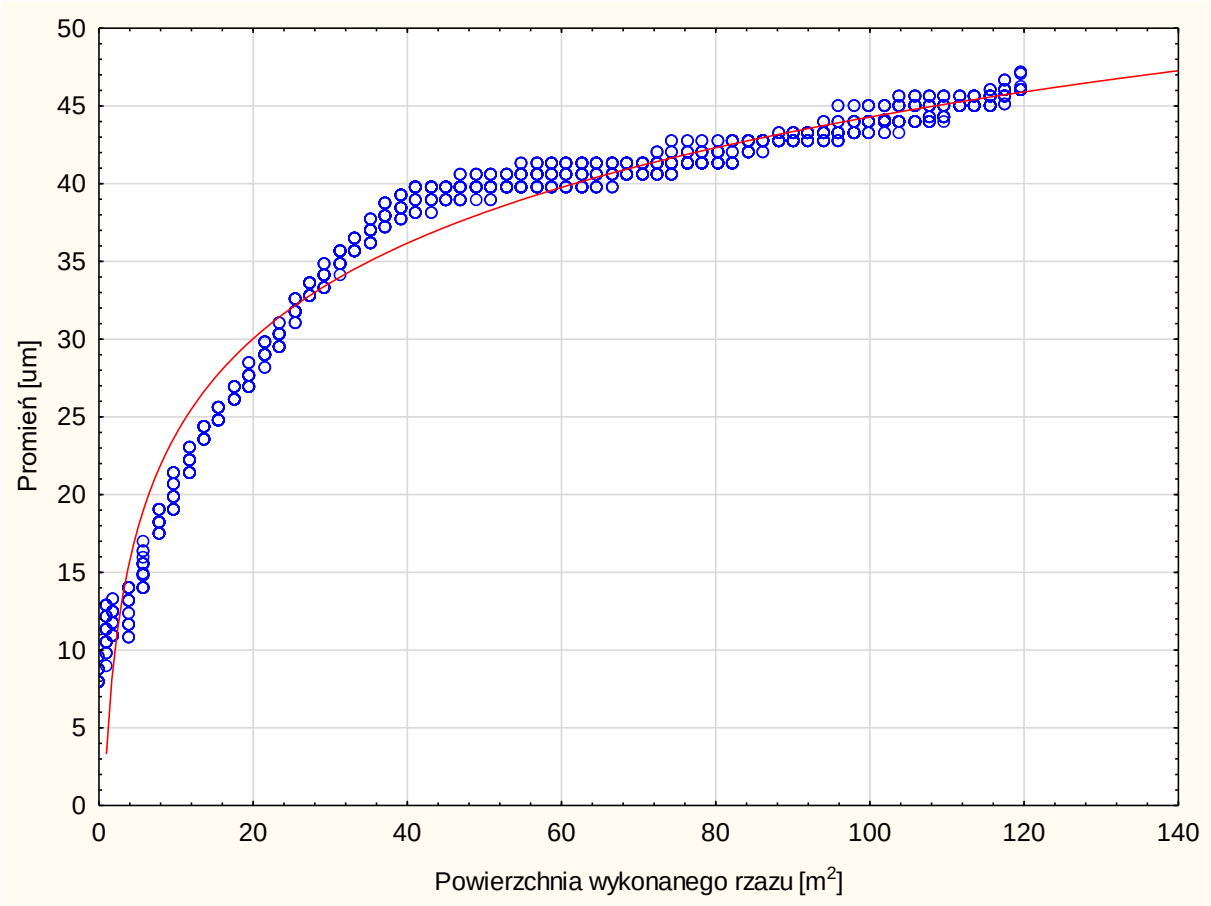
W początkowej fazie zużywania się ogniw piły wzrost promienia następuje w szybkim tempie. Po wykonaniu ok. 40 m^2 powierzchni rzazu wzrost ten znacząco spowolnił.

Od ok. 114 m^2 powierzchni rzazu wzrost promienia przyspieszył i w następstwie uniemożliwił dalszą pracę. Po wykonaniu pierwszych 20 m^2 rzazu średni promień wzrósł o 27,71µm - od 8,31 µm do 30,02 µm. Średni promień wzrastał 1,39 $\mu m \cdot m^{-2}$. Przy wzroście wykonanej powierzchni od 20 m^2 do 40 m^2 promień wzrósł o 6,15µm, od 30,02 µm

do 36,17 µm, czyli średnio 0,31 $\mu m \cdot m^{-2}$. Dalszy wzrost w wykonanej powierzchni o kolejne 20 m^2 spowodował wzrost promienia zaokrąglenia o 3,59 µm do 39,76 µm. Co daje średnio

0,18 $\mu m \cdot m^{-2}$. W momencie zaprzestania pracy piła wykonała 119,56 m^2 rzazu a jej średni

promień wynosił 46,19 µm. Czyli po wycięciu 59,96 m^2 powierzchni rzazu nastąpił wzrost promienia zaokrąglenia ostrzy o 6,43 µm, co daje średni przyrost wynoszący 0,12 µm · m^{-2}.



Rys. 54. *Zależność wzrostu promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej od powierzchni wykonanego rzazu podczas skrawania piłą napiętą z siłą posuwu 70 N*

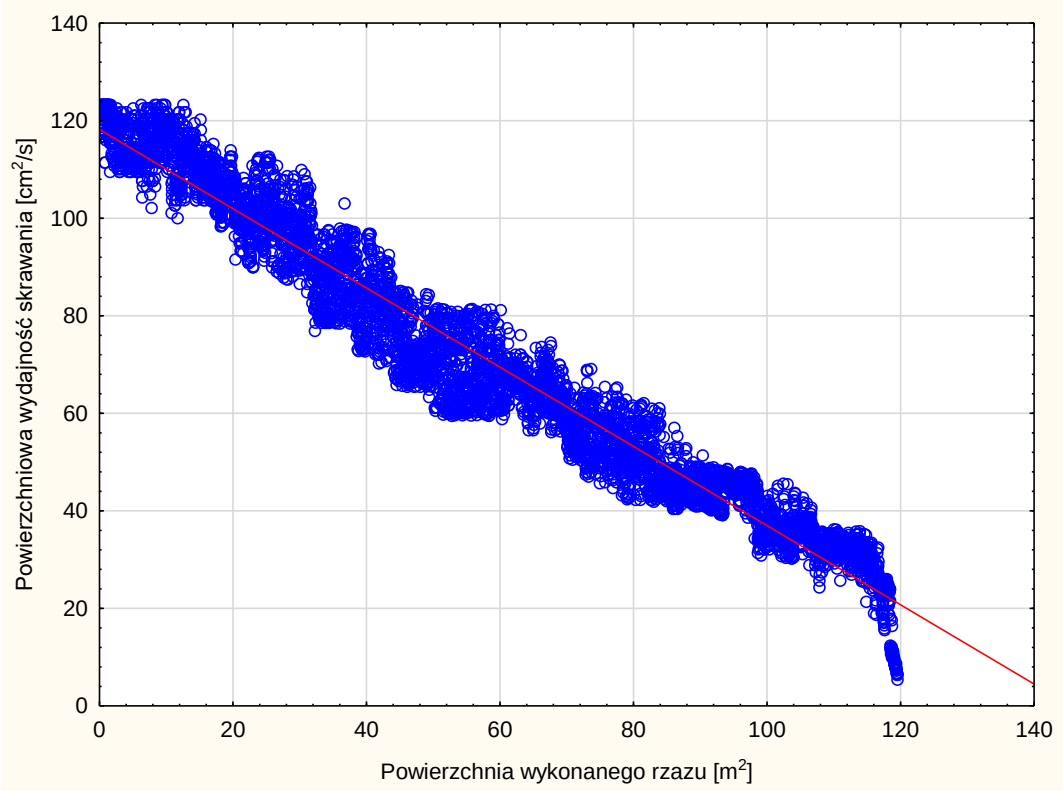
Po analizie dopasowania wielu krzywych uznano, że krzywa logarytmiczna najlepiej odwzorowuje zależność promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej od powierzchni wykonanego rzazu w przypadku skrawania piłą prawidłowo napiętą z wartością siły posuwu wynoszącą 70 N.

Równanie krzywej przedstawionej na rys. 54 opisującej zależność promienia zaokrąglenia krawędzi tnących od powierzchni wykonanego rzazy, przy skrawaniu przy wartości siły posuwu wynoszącą 70 N piłą prawidłowo napiętą, można opisać następującą zależnością:

$$\rho_{70N} = 20{,}3975 \cdot \log_{10}(A) + 3{,}4909 \qquad [35]$$

gdzie: ρ_{70N} – promień krawędzi tnącej przy skrawaniu piłą napiętą przy sile posuwu 70 N [μm];

A – powierzchnia wykonanego rzazu [m^2].



Rys. 55. *Zależność powierzchniowej wydajności skrawania od powierzchni wykonanego rzazu piłą napiętą z siłą posuwu 70 N*

Na rys. 55 przedstawiono zależność powierzchniowej wydajności skrawania od powierzchni wykonanego rzazu. Zależność tą uzyskano podczas pracy piłą prawidłowo napiętą z zadaną siłą posuwu wynoszącą 70 N. Równanie prostej przedstawionej na rys. 55 można zapisać następująco :

$$W_{70N} = -0{,}8121 \cdot A + 118{,}1822 \qquad r = -0{,}98 \quad [36]$$

gdzie: W_{70N} – Powierzchniowa wydajność skrawania przy skrawaniu piłą napiętą z siłą posuwu 70 N [$cm^2 \cdot s^{-1}$]

A – powierzchnia wykonanego rzazu [m^2];

r – współczynnik korelacji.

Wysoka wartość współczynnika korelacji świadczy o dobrym dopasowaniu uzyskanej zależności.

Po przekształceniu równania 35 otrzymujemy następującą zależność:

$$A = 10^{\left(\frac{\rho_{70N}-3,4909}{20,3975}\right)} \quad [37]$$

Podstawiając otrzymaną zależność 37 do równania 34 otrzymujemy zależność na wartość powierzchniowej wydajność skrawania w zależności od promienia krawędzi tnącej:

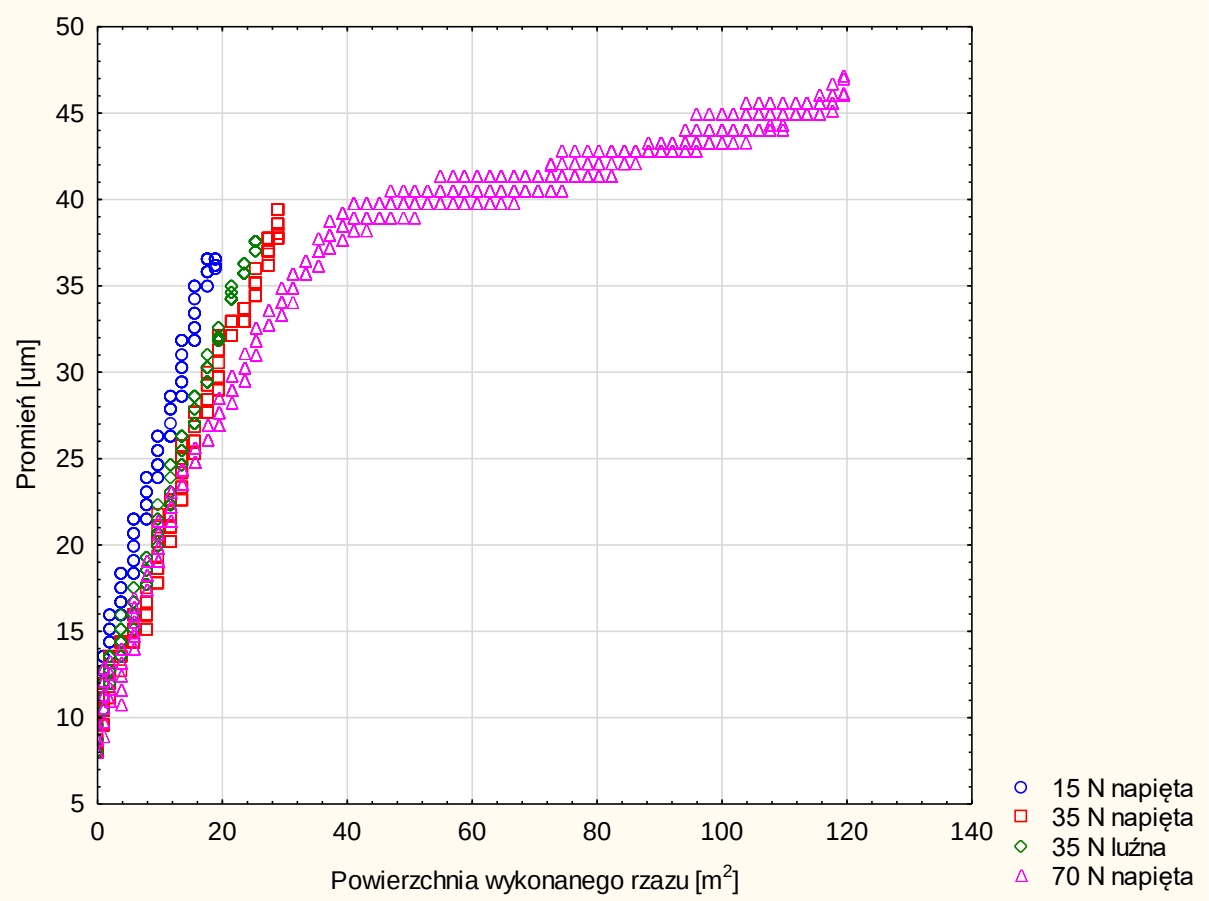
$$W_{70N} = -0,8151 \cdot 10^{\left(\frac{\rho_{70N}-3,4909}{20,3975}\right)} + 118,1822 \quad [38]$$

W tym przypadku zależność nie jest liniowa. Intensywność spadku wartości powierzchniowej wydajności skrawania wraz ze wzrostem promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej wzrasta wraz z powierzchnią wykonanego rzazu. Wykorzystując zależność 37 można ustalić, że wzrost promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej z 10 μm do 20 μm powoduje spadek uzyskiwanej powierzchniowej wydajności skrawania o 3,54 $cm^2 \cdot s^{-1}$. Co daje średnio spadek o 0,35 $cm^2 \cdot s^{-1}$ przy wzroście promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej o 1μm. Dalszy wzrost promienia od 20 μm do 30 μm powoduje spadek powierzchniowej wydajności skrawania o 10,95 $cm^2 \cdot s^{-1}$. Co daje średnio spadek o 1,1 $cm^2 \cdot s^{-1}$ przy zwiększeniu się promienia krawędzi tnącej o 1 μm. Dalszy wzrost promienia od 30 μm do 40 μm powoduje spadek powierzchniowej wydajności skrawania o 33,87 $cm^2 \cdot s^{-1}$. Co daje średnio spadek o 3,39 $cm^2 \cdot s^{-1}$ na 1 μm. W końcowym etapie pracy piły wzrost promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej od 40 μm do 46 μm spowodował spadek powierzchniowej wydajności skrawania o 48,49 $cm^2 \cdot s^{-1}$. Co daje średnio spadek o 8,08 $cm^2 \cdot s^{-1}$ na 1 μm przyrostu promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej ostrzy.

5.4. Porównanie wpływu powierzchni wykonanego rzazu na wartość promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej dla wszystkich badanych przypadków

Na rysunku 56 przedstawiono porównanie przebiegu wzrostu promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej ogniw piły dla wszystkich badanych przypadków. W przypadku skrawania z zadanymi wartościami siły posuwu wynoszącymi 15 N oraz 35 N wzrost promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej wraz z wykonaną powierzchnią rzazu ma na całej długości charakter liniowy. Przyrost promienia w przypadku piły skrawającej z

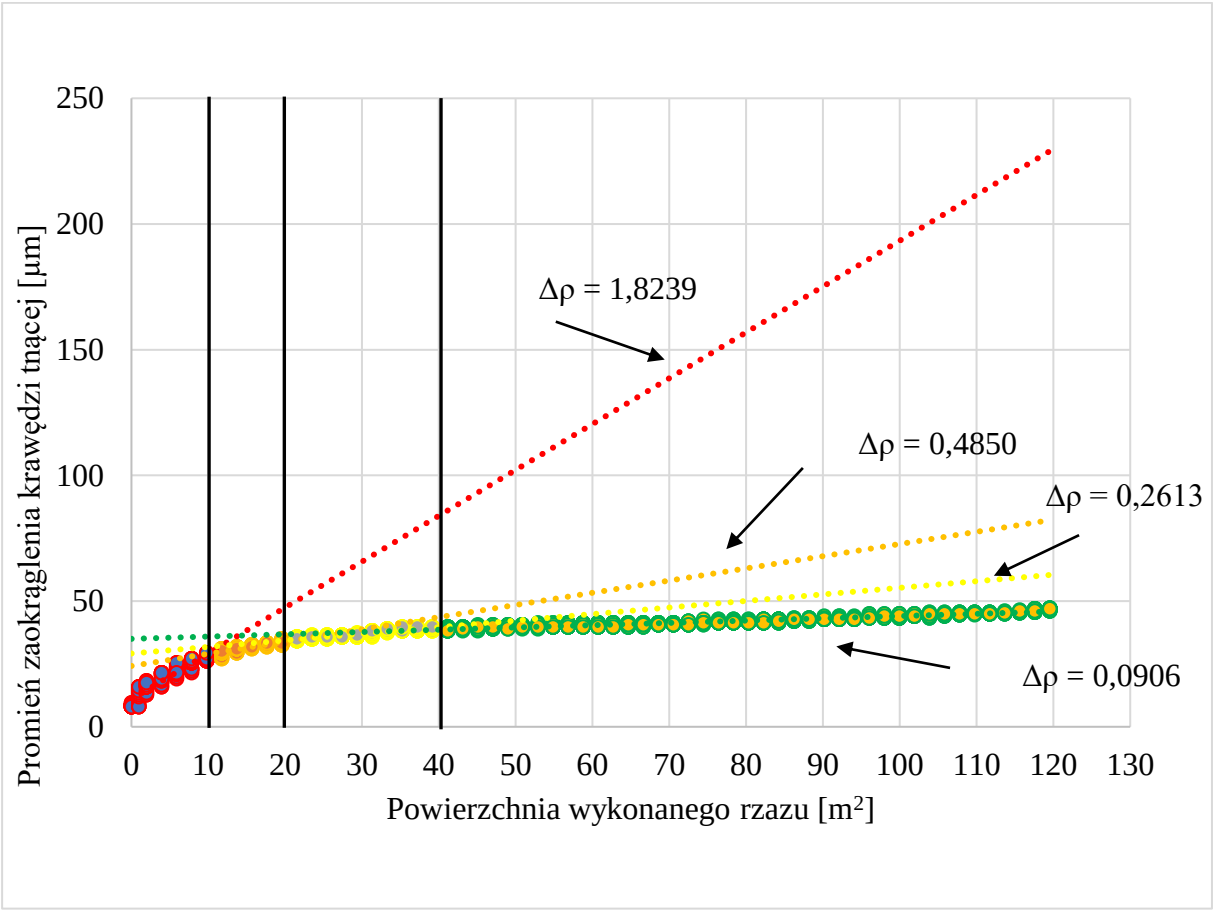
siłą posuwu 70 N na początku również jest zbliżony do liniowego. Ale po wykonaniu ok. 40 m^2 powierzchni rzazu można zauważyć, że jego intensywność wyraźnie zaczyna się zmniejszać. Intensywność zmiany promienia piły skrawającej z siłą 70 N niemal na całym przebiegu jest istotnie niższa niż dla innych badanych pił.



Rys. 56. *Porównanie zmiany wartości promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej od powierzchni wykonanego rzazu przy różnych wartościach zadanej siły posuwu oraz napięcia wstępnego piły*

Do porównania wpływu badanych czynników na intensywność zużycia krawędzi tnących, wykorzystany zostanie współczynnik intensywności wzrostu promienia krawędzi tnących. Wartość tego współczynnika jest największa podczas skrawania piłą napiętą z zadaną siłą posuwu wynoszącą 15 N. Jego wartość dla tego przypadku wynosi 1,4016. Mniej intensywnie następuje zużycie przy zastosowanej sile posuwu wynoszącej 35 N. W tym przypadku dla piły napiętej wartość współczynnika wzrostu promienia wynosi 1,0255. Przy wartości siły posuwu wynoszącej 35 N ale luźnym napięciu wartość tego współczynnika wynosi 1,1253. To oznacza że zmniejszenie wartości napięcia wstępnego piły powoduje wzrost intensywności zużycia. W przypadku piły napiętej przy

sile posuwu 70 N, zależność przyrostu promienia od wykonanej powierzchni rzazu nie jest liniowa. Intensywność zużycia spada wraz z przyrostem powierzchni wykonanego rzazu. Przebieg zużycia można jednak podzielić na cztery charakterystyczne zakresy. Od 0 m^2 do 10 m^2 powierzchni wykonanego rzazu, pomiędzy 10 m^2 a 20 m^2 powierzchni wykonanego rzazu, pomiędzy 20 m^2 a 40 m^2 powierzchni wykonanego rzazu oraz powyżej 40 m^2 powierzchni wykonanego rzazu. Podział ten zobrazowano na rys. 57. Na rysunku 57 przedstawiono również wartości współczynnika intensywności zużycia dla poszczególnych zakresów.



Rys. 57. *Nachylenie linii trendu dla różnych obszarów charakterystycznych zmian promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej uzyskane dla siły posuwu 70 N*

W pierwszym okresie wartość współczynnika intensywności zużycia wynosi 1,8239. Jest ona większa niż w przypadku skrawania z zadaną wartością siły posuwu wynoszącą 35 N. Po przekroczeniu 10 m^2 powierzchni wykonanego rzazu wartość współczynnika intensywności maleje do wartości wynoszącej 0,4850. Następnie w zakresie od 20 m^2 do 40 m^2 powierzchni wykonanego rzazy wartość współczynnika

wynosi 0,2613. W końcowym okresie, powyżej 40 m^2 powierzchni wykonanego rzazu jego wartość wynosi jedynie 0,0906.

Najintensywniej wzrasta wartość promienia krawędzi tnących podczas skrawania piłą z najmniejszą badaną siłą posuwu (15 N). Mniejszą intensywność przyrostu wartości promieni krawędzi tnących można zauważyć dla siły posuwu wynoszącej 35 N.

Różnica intensywności wzrostu promienia zaokrąglenia krawędzi tnących między piłą napiętą a luźną przy sile posuwu 35 N jest niewielka. Jednak wzrost promienia jest wyraźnie większy dla piły luźnej. Piła ta też przestaje skrawać po wykonaniu mniejszej powierzchni rzazu i przy niższym średnim promieniu zaokrąglenia krawędzi tnącej.

Dalszej analizie poddam uzyskane wartości średnich promieni zaokrąglenia krawędzi tnącej.

Po naostrzeniu średni promień zaokrąglenia krawędzi tnących badanych pił zawierał się w przedziale od 8,24 μm do 8,31 μm. Nie było między badanymi piłami różnic istotnych statystycznie.

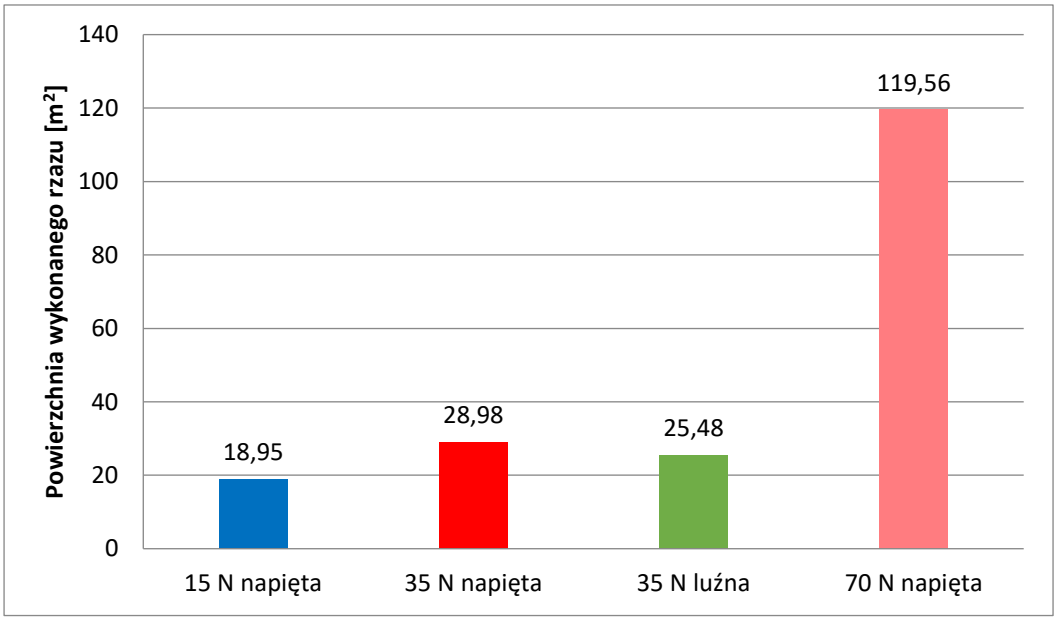
W przypadku skrawania z siłą posuwu 15 N średni promień zaokrąglenia krawędzi tnącej wzrósł o 28,01 μm od 8,25 μm do 36,26 μm po wykonaniu 18,95 m^2 powierzchni rzazu. Odchylenie standardowe promienia zaokrąglenia wynosiło 0,48 μm.

W tym przypadku wartość promienia zaokrąglenia była mniejsza o 1,19 μm od promienia zaokrąglenia krawędzi tnących który uzyskała piła luźna skrawająca przy sile posuwu wynoszącej 35 N. W tym przypadku średni promień wzrósł o 29,2 μm od 8,25 μm do 37,45 μm po wykonaniu 25,48 m^2 powierzchni rzazu. Odchylenie standardowe promienia zaokrąglenia krawędzi tnących wynosiło 0,33 μm. Różnica pomiędzy uzyskanymi średnimi była istotna statystycznie ($p = 0,000$). Podczas skrawania z siłą posuwu 35 N i piłą prawidłowo napiętą średni promień wzrósł o 30,22 μm od 8,24 μm do 38,46 μm po wykonaniu 28,98 m^2 powierzchni rzazu. Odchylenie standardowe promienia zaokrąglenia wynosiło 0,68 μm. Wartość promienia była wyższa o 1,01 μm od wartości uzyskanej dla piły luźnej przy tej samej zadanej wartości siły posuwu. Mimo niewielkiej różnicy jest ona istotna statystycznie ($p= 0,000$). Największą powierzchnię wykonanego rzazu uzyskano w przypadku piły napiętej przy sile posuwu wynoszącej 70 N. Wynosiła ona 119,56 m^2. Jest to 6,3 razy większa powierzchnia rzazu niż powierzchnia wykonana piłą z zadaną siłą posuwu 15 N. W przypadku skrawania z siłą posuwu 70 N średni promień zaokrąglenia wzrósł o 37,88 μm od 8,31 μm do 46,19 μm przy odchyleniu standardowym wynoszącym 0,41 μm. Był on również istotnie różny od pozostałych przypadków Przy skrawaniu z zadaną siłą posuwu wynoszącą 70 N

uzyskano większy o 9,93 µm średni promień zaokrąglenia niż podczas pracy piłą z siłą posuwu wynoszącą 15 N piłą napiętą prawidłowo, o 7,73 µm większy średni promień w stosunku do przypadku skrawania z siłą posuwu 35 N piłą napiętą, oraz o 8,74 µm większy niż w przypadku pracy piłą luźną z siłą posuwu 35 N. Podczas pracy z niższą siłą posuwu piła przestaje skrawać przy mniejszym promieniu zaokrąglenia krawędzi tnących. Wynika to z faktu, że siła docisku przypadająca na ostrze jest mniejsza.

Na rysunku 58 przedstawiono porównanie powierzchni rzazu które wykonano badanymi piłami.

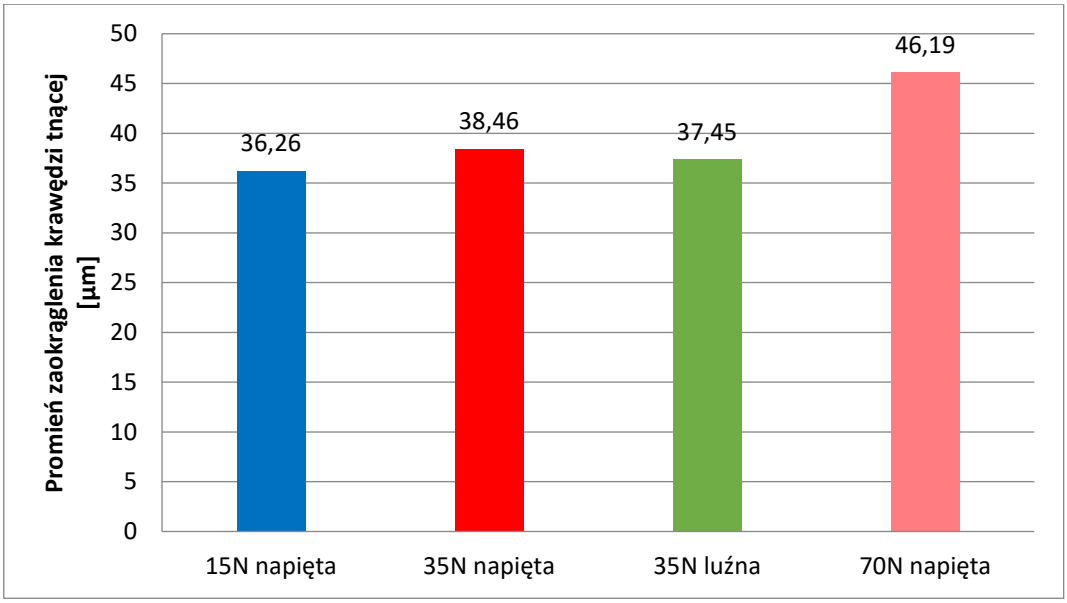
Przyrost promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej przedstawiono na rysunku 59.



Rys. 58. *Porównanie powierzchni maksymalnej rzazu wykonanego w poszczególnych przypadkach*

W każdym przypadku w miarę wzrostu powierzchni wykonanego rzazu istotnie wzrastał promień zaokrąglenia krawędzi tnącej. Powyżej powierzchni rzazu wynoszącej 28,98 m^2, skrawała jedynie piła prawidłowo napięta przy sile posuwu wynoszącej 70 N. W jej przypadku przy dużych powierzchniach wykonanego rzazu przyrost wartości promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej pomiędzy kolejnymi pomiarami był niewielki ponadto nie zawsze różnice pomiędzy kolejnymi pomiarami były istotne. W tabeli 1 umieszczonej w załączniku przedstawiono pomiędzy którymi wartościami powierzchni wykonanego rzazu nie wystąpił istotny przyrost promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej podczas skrawania z zadaną wartością siły posuwu 70 N przy prawidłowym napięciu wstępnym piły.

Wielkość odchylenia standardowego promienia zaokrąglenia ostrzy może być miarą nierównomierności zużywania się krawędzi tnących poszczególnych ogniw piły łańcuchowej. Po naostrzeniu wartości odchylenia standardowego były na bardzo podobnym poziomie dla wszystkich badanych pił.



Rys. 59. *Wartości promieni zaokrąglenia krawędzi tnących przy których piły przestawały skrawać*

Dla piły skrawającej z zadaną wartością siły posuwu wynoszącą 15 N odchylenie standardowe promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej waha się od 0,48µm (dla powierzchni 18,95 m^2) do 1,25 µm (dla powierzchni 5,88 m^2). Nie można stwierdzić istnienia istotnej zależności wielkości odchylenia standardowego promienia zaokrąglenia krawędzi tnących od powierzchni wykonanego rzazu. Podczas skrawania piłą prawidłowo napiętą z zadaną wartością siły posuwu 35 N odchylenie standardowe zawierało się w przedziale od 0,38 µm (dla powierzchni 21,56 m^2) do 1,31 µm (dla powierzchni 13,72 m^2). Skrawając piłą luźną z siłą posuwu 35 N odchylenie standardowe wynosiło od 0,33 µm (dla powierzchni 25,48 m^2) do 0,81 µm (dla powierzchni 11,76 m^2). W obu przypadkach stopnia napięcia wstępnego, dla tej wartości zadanej siły posuwu, również nie można stwierdzić istnienia zależności wielkości odchylenia standardowego promienia od powierzchni wykonanego rzazu. Odchylenie standardowe promienia zaokrąglenia podczas skrawania z siłą posuwu o wartości 70 N wyniosło od 0,26 µm (dla powierzchni 88,2 m^2) do 1,17 µm (dla powierzchni 3,92 m^2). Analizując wartości odchylenia standardowego można zauważyć, że w początkowym okresie skrawania z siłą

70 N, wartości odchylenia standardowego promienia zaokrąglenia krawędzi tnących były większe. Wynosiły od 0,88 μm do 1,13 μm Po osiągnięciu 11,76 m^2 powierzchni wykonanego rzazu wartości odchyleń standardowych zmniejszyły się. Ustabilizowały się w zakresie od 0,29 μm do 0,53 μm, co znaczyło by że poszczególne ogniwa tępiły się bardziej równomiernie niż na początku procesu.

Porównując odchylenia standardowe pozostałych pił, które przestały skrawać przy porównywalnej wartości powierzchni rzazu. Najmniejszą nierównomiernością tępienia poszczególnych ogniw piły charakteryzowała się piła o luźnym wstępnym napięciu piły przy zadanej sile posuwu wynoszącej 35 N. Natomiast największą nierównomiernością promienia charakteryzowała się piła podczas skrawania z siłą posuwu 15 N.

Po wykonaniu pierwszych 50 rzazów każdą z pił, najwyższą wartość odchylenia standardowego promienia krawędzi tnących stwierdzono dla piły skrawającej siłą posuwu
70 N.

Tab. 4. *Zestawienie wartości średnich promieni zaokrąglenia krawędzi tnącej przy których piły przestały skrawać oraz wartości p pomiędzy różnymi wariantami.*

Warianty		Średni promień dla wariantu I po zakończeniu pracy [μm]	Średni promień dla wariantu II po zakończeniu pracy [μm]	P
I	II			
15N	35N	36,27	38,46	0,00
15N	35L	36,27	37,45	0,00
15N	70N	36,27	46,20	0,00
35N	35L	38,46	37,45	0,00
35N	70N	38,46	46,20	0,00
35L	70N	37,45	46,20	0,00

W tabeli 4 przedstawiono wartości p pomiędzy średnimi promieniami zaokrąglenia krawędzi tnącej, przy których piły przestały skrawać dla wszystkich badanych przypadków. Różnica średniego promienia zaokrąglenia pomiędzy piłą napiętą i luźną (w momencie gdy przestały skrawać) przy sile posuwu wynoszącej 35 N jest niewielka. Piła napięta była w stanie pracować przy większym średnim promieniu

zaokrąglenia krawędzi tnącej o 1,01 μm niż w przypadku piły luźnej (35 N) – różnica ta jednak jest istotna statystycznie (p=0,00). Przy pracy piłą z siłą posuwu 15 N uzyskano mniejszy o 2,2 μm średni promień niż w przypadku pracy piły prawidłowo napiętej z siłą 35 N i o 1,19 μm mniejszy niż w przypadku pracy piły luźnej z siłą posuwu 15 N. Różnice te są także istotne statystycznie przy wartości współczynnika p równej 0.

Zestawienie wartości p pomiędzy poszczególnymi przypadkami przedstawiono w tabeli 5. Po wykonaniu 0,98 m^2 rzazu nie wykazano istotnej różnicy statystycznej tylko pomiędzy wartościami promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej podczas skrawania z siłą posuwu 70 N i piłą luźną z siłą posuwu 35 N. Po wykonaniu 1,96 m^2 powierzchni razu wykazano istotne różnice statystyczne między wartościami promieni wszystkich badanych przypadków. Po wykonaniu 3,92 m^2 powierzchni rzazu nie ma istotnej różnicy w wartościach promienia tylko między przypadkami skrawania z siłą posuwu 35 N piłą luźną, a siłą posuwu 35 N piłą prawidłowo napiętą. Następnie po wykonaniu 5,88 m^2 powierzchni rzazu nie wykazano istotnej różnicy statystycznej tylko pomiędzy wartościami promienia dla przypadków podczas skrawania piłą napiętą z siłą posuwu 35 N i 70 N. Po wykonaniu 7,84 m^2 powierzchni rzazu istotna różnica nie wystąpiła pomiędzy badanymi przypadkami skrawania piłą z siłą posuwu 70 N i piłą luźną z siłą posuwu 35 N. Różnice statystyczne wartości promieni zaokrąglenia krawędzi tnących między pozostałymi przypadkami są istotne dla wyżej wymienionych powierzchni rzazu. Następnie po wykonaniu 9,8 m^2 oraz 11,76 m^2 powierzchni rzazu wykazano istotne różnice w wartościach promieni między wszystkimi badanymi przypadkami. Po wykonaniu 13,72 m^2 powierzchni rzazu nie wykazano istotnej różnicy statystycznej przy skrawaniu piłą z siłą posuwu 70 N i piłą napiętą z siłą posuwu 35 N. Po wykonaniu 15,68 m^2 oraz 17,64 m^2 powierzchni rzazu ponownie wykazano istotną różnicę pomiędzy wszystkimi badanymi przypadkami. Jednocześnie była to ostatnia wspólna powierzchnia rzazu przy której zbadano wszystkie warianty. Ponieważ przy powierzchni rzazu wynoszącej 18,96 m^2 piła z siłą posuwu 15 N przestała skrawać. Podczas skrawania z siłą posuwu 15 N za każdym razem wykazano istotne różnice statystyczne z każdym innym badanym przypadkiem. Przebieg przyrostu promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej dla siły posuwu 15 N jest istotnie różny od innych badanych przypadków. Promień zaokrąglenia krawędzi tnącej przyrasta istotnie szybciej i osiąga wyższe wartości przy mniejszej liczbie wykonanych rzazów.

Większą liczbę rzazów wykonano piłami skrawającymi z siłą posuwu 35 N (w obu napięciach piły) oraz z siłą posuwu 70 N. Wykazano istotne różnice pomiędzy

wartościami promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej dla powierzchni rzazu wynoszących 19,6 m^2, 21,56 m^2, 23,52 m^2 oraz 25,48 m^2 między wszystkimi badanymi przypadkami. Równocześnie była to ostatnia wykonana powierzchnia rzazu dla piły luźnej przy sile posuwu wynoszącej 35 N. Podczas całego przebiegu skrawania pomiędzy badanymi przypadkami przy różnym napięciu piły wykazano istotną różnicę między badanymi przypadkami. Wyjątkiem były wartości promienia przy powierzchni 3,92 m^2 powierzchni rzazu. Podczas dalszej pracy z siłą posuwu 35 N promień piły luźnej istotnie był większy niż piły napiętej. Przyrost ten jest istotnie szybszy niż dla piły napiętej.

Po wykonaniu 27,44 m^2 powierzchni rzazu piła prawidłowo napięta z siłą posuwu 35 N przestała skrawać. Między wartościami promienia zaokrąglenia przy tej powierzchni rzazu wykazano istotne różnice podczas skrawania piłami napiętymi z zadanymi siłami posuwu 35 N i 70 N. Intensywność wzrostu promienia zaokrąglenia krawędzi tnących podczas skrawania z siłą posuwu wynoszącą 70 N niemal na całym przebiegu jest istotnie niższy niż dla pozostałych badanych przypadków.

Tab. 5. *Zestawienie wartości p dla badanego promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej pomiędzy wszystkimi badanymi przypadkami*

Powierzchnia wykonanego rzazu [m^2]	15 N vs. 35 N	15 N vs. 35N L	15 N vs. 70 N	35 N vs. 35N L	35N vs. 70 N	35N L vs. 70 N
0,98	0	0	0	0,015	0,001	0,123
1,96	0	0	0	0,027	0,004	0
3,92	0	0	0	0,096	0	0
5,88	0	0	0	0	0,568	0
7,84	0	0	0	0	0	0,518
9,8	0	0	0	0	0,414	0
11,76	0	0	0	0	0	0,002
13,72	0	0	0	0	0,159	0
15,68	0	0	0	0	0	0
17,64	0	0	0	0	0	0
19,6	-	-	-	0	0	0
21,56	-	-	-	0	0	0
23,52	-	-	-	0	0	0
25,48	-	-	-	0	0	0
27,44	-	-	-	-	0	-

Na przykładzie zmian promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej dla piły prawidłowo napiętej z zadaną siłą posuwu 70 N widać wyraźnie w jaki sposób zachodzi

proces zużywania się ostrzy piły łańcuchowej żłobikowej. W początkowej fazie skrawania wzrost promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej jest dość szybki. Po wykonaniu około 40 m^2 powierzchni rzazu intensywność przyrostu promienia znacznie spada, by nieznacznie przyspieszyć podczas ostatnich wykonywanych rzazów. Przebieg stępienia krawędzi tnącej piły jest zgodny z fazami zużycia na krzywej Lorenza. Pomiędzy wartościami promieni dla badanych powierzchni rzazu do wykonania ok. 41,16 m^2 rzazu różnice pomiędzy wartościami promienia są istotne. Wzrost promienia do tego miejsca jest w I fazie zużycia ostrzy ogniw tnących piły.

Po przekroczeniu powierzchni rzazu 41,16 m^2 różnica wartości promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej pomiędzy kolejnymi pomiarami jest niewielka, co oznacza że przebieg zużycia krawędzi tnącej wszedł w II fazę powolnego zużycia. Intensywność wzrostu promienia zaokrąglenia krawędzi tnących wzrosła po wykonaniu 115,64 m^2 powierzchni rzazu. Oznaczało to przejście do III etapu zużycia. W trakcie tego etapu wykonano ostatnich 3,9 m^2 powierzchni rzazu. Potem zużycie krawędzi tnącej uniemożliwiło pracę narzędzia z zadaną siłą posuwu.

5.5. Intensywność zużycia krawędzi tnących

Na rys. 60 przedstawiono porównanie zależności chwilowej intensywności zużycia krawędzi tnących od powierzchni wykonanego rzazu.

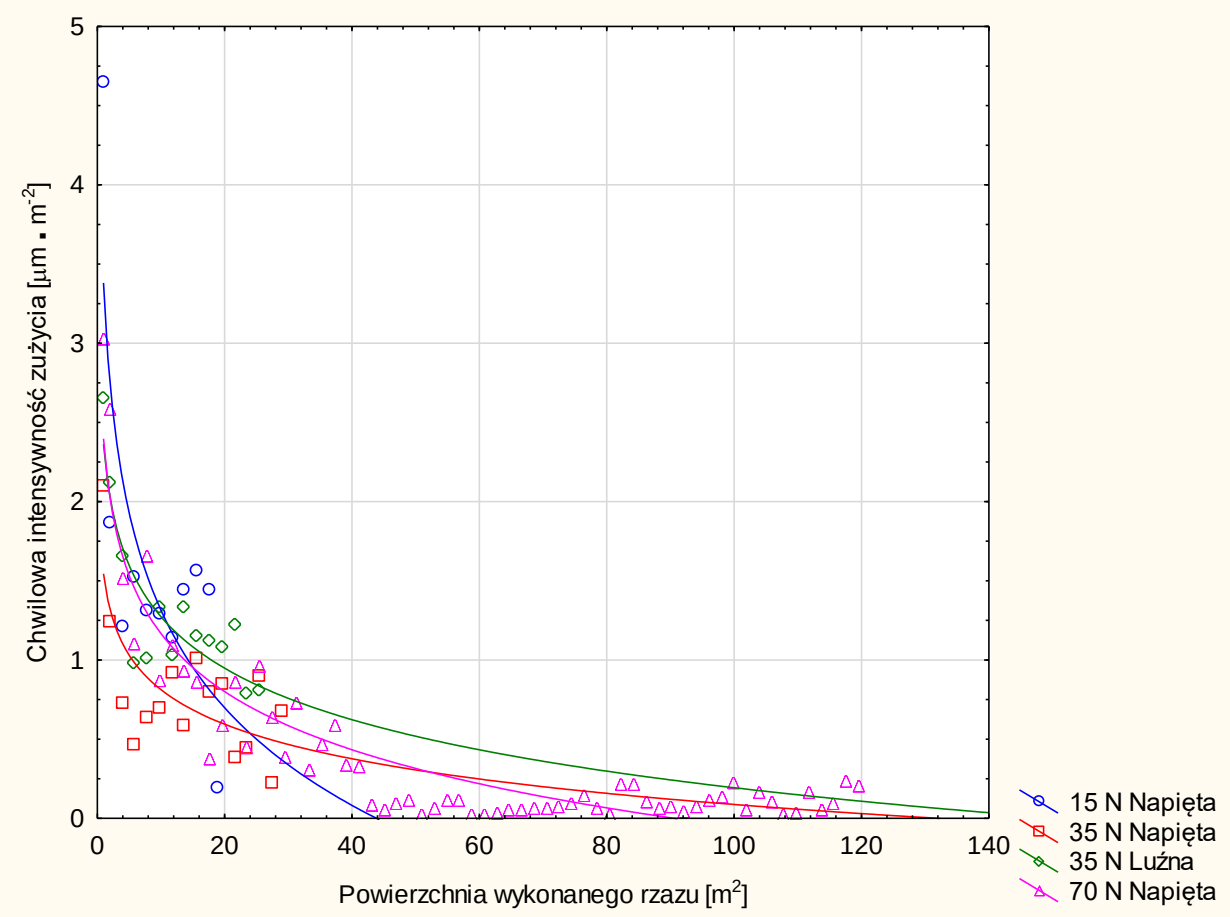
Krzywe przedstawione na rys. 60 można opisać następującą zależnością ogólną:

$$I = a \cdot \log_{10}(A) \cdot b \qquad [\mu m] \qquad [39]$$

Wartości współczynników a i b dla poszczególnych przypadków przedstawia tabela 6.

Tab. 6. *Wartości współczynników równań opisujących zmianę chwilowej intensywności zużycia od wykonanej powierzchni rzazu*

Siła posuwu i napięcie wstępne	a	b
15 N napięta	-2,048	3,3629
35 N napięta	-0,7251	1,5377
35 N luźna	-1,0796	2,3526
70 N napięta	-1,2191	2,3863



Rys. 60. *Zależności chwilowej intensywności zużycia ostrzy od wykonanej powierzchni rzazu dla analizowanych przypadków*

Chwilowe wartości intensywności zużycia dla piły napiętej prawidłowo skrawającej

z siłą posuwu 15 N zawierają się w zakresie od 0,19 µm·m^{-2} do 4,65 µm·m^{-2}. Natomiast dla piły prawidłowo napiętej pracującej z siłą posuwu 35 N zakres wartości chwilowych intensywności zużycia wynosi 0,44 µm·m^{-2} do 2,24 µm·m^{-2}, a dla tej samej wartości siły posuwu dla piły luźnej intensywność chwilowa zawiera się w zakresie od 0,79 µm/m^2 do 2,65 µm·m^{-2}. Podczas skrawania piłą z siłą posuwu 70 N chwilowe wartości intensywności zużycia zawierają się w przedziale od 0,02 do 3,02 µm·m^{-2}.

Największe wartości chwilowej intensywności zużycia osiągnięto dla piły skrawającej z siłą posuwu 15 N. Największą chwilową intensywność zużycia dla wszystkich badanych przypadków uzyskiwano na początku pracy pił. Dla piły napiętej skrawającej z siłą posuwu 15 N wartość intensywności zużycia ostrzy po wykonaniu pierwszych 50 rzazów wyniosła 4,56 µm/m^2, dla piły luźnej skrawającej z siłą posuwu

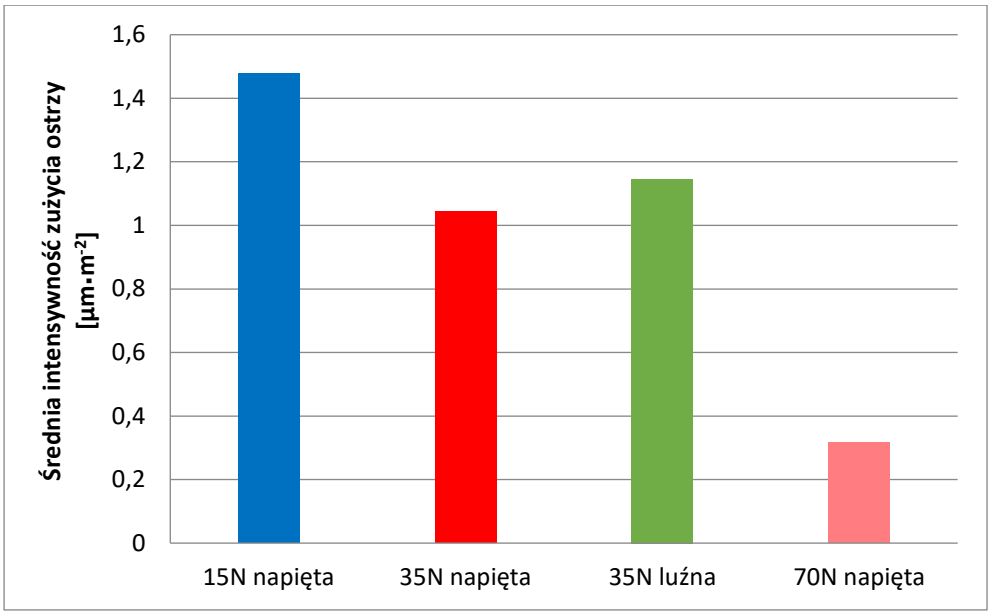
35 N – 2,65 $\mu m \cdot m^{-2}$, dla piły napiętej z siłą posuwu 35 N – 2,10 $\mu m \cdot m^{-2}$, a dla piły skrawającej z siłą posuwu 70 N wartość ta wyniosła 3,02 $\mu m \cdot m^{-2}$. Najmniejszą chwilową intensywność zużycia po rozpoczęciu skrawania uzyskano dla pił skrawających z siłą posuwu wynoszącą 35 N. Większa intensywność zużycia przy sile posuwu wynoszącej 70 N, może wynikać z faktu że przy tej sile posuwu, wartość siły skrawania jest największa spośród badanych przypadków. Wzrost obciążenia ostrza siłami skrawania wraz ze wzrostem wartości siły posuwu stwierdzili inni badacze [Górski 1996, Maciak 2001, Maciak 2013]. Wpływa to na zwiększenie tarcia co przekłada się na większe zużycie krawędzi tnącej. Wyniki te zgodne są z krzywą zużycia Lorenza. Największe zużycie następuje przy rozpoczynaniu pracy narzędziem. Podczas całego przebiegu skrawania najmniejszymi chwilowymi wartościami intensywności zużycia ostrzy charakteryzuje się piła skrawająca z siłą posuwu 70 N. Porównując chwilowe intensywności zużycia dla piły luźnej i napiętej pracującej z siłą posuwu 35 N wyższe wartości osiągnięto dla piły luźnej.

Na rysunku 61 oraz w tabeli 7 przedstawiono zestawienie średnich wartości intensywności zużycia krawędzi tnących ogniw piły. Obliczono je dla całego okresu pracy piły. Dla piły skrawającej z siłą posuwu 15 N jest to średnia z wykonania 18,95 m^2 powierzchni rzazu. Natomiast dla piły napiętej skrawającej z siłą posuwu 35 N jest to średnia prędkość tępienia w odniesieniu do wykonania 28,98 m^2 powierzchni, a dla piły luźnej skrawającej z siłą posuwu 35 N dla 23,52 m^2 powierzchni. Dla piły skrawającej z siłą posuwu 70 N średnia prędkość tępienia się ogniw piły obliczona została w odniesieniu do wykonania 119,56 m^2 powierzchni rzazu.

Tab. 7. *Wartości średnie intensywności zużycia ostrzy*

Średnia intensywność tępienia się ogniw piły [$\mu m \cdot m^{-2}$]			
15 N napięta	35 N napięta	35 N luźna	70 N napięta
1,48	1,04	1,15	0,32

Piła skrawająca z siłą posuwu 15 N osiągnęła największą średnią intensywność zużycia ostrzy piły i wyniosła ona 1,48 $\mu m \cdot m^{-2}$. Różnica średniej intensywności zużycia pomiędzy piłą luźną a napiętą podczas skrawania siłą posuwu 35 N jest niewielka. Nieco wyższą wartość osiągnięto dla piły luźnej. Zdecydowanie najmniejszą wartość średniej intensywności zużycia ostrzy piły osiągnięto podczas skrawania piłą z siłą posuwu 70 N.



Rys. 61. *Zestawienie wartości średniej intensywności zużycia krawędzi tnących pił*

5.6 Wpływ możliwości wychylenia ogniw tnących piły na intensywność zużycia krawędzi tnących

W wyniku przeprowadzonych badań kamerą do zdjęć szybkich stwierdzono, że kąt o jaki odchylają się ogniwa tnące podczas pracy zależy istotnie od zastosowanej siły posuwu oraz napięcia wstępnego. Czynniki te mają również istotny wpływ na intensywność zużycia krawędzi tnących ogniw piły.

W trakcie badań intensywności zużycia okazało się, że przy tej samej sile posuwu zwiększenie napięcia wstępnego powoduje spadek intensywności zużycia ostrzy. Podobnie zwiększenie wartości siły posuwu powoduje spadek intensywności zużycia krawędzi tnących.

Analizując ujęcia z kamery szybkiej zauważono, że przy tej samej wartości siły posuwu wzrost napięcia wstępnego powoduje zmniejszenie możliwości wychyleń ogniw tnących. Natomiast przy tej samej wartości napięcia wstępnego, wzrost siły posuwu powoduje spadek możliwości odchylania się ogniw w płaszczyźnie rzazu. Zostało to szczegółowo opisane w rozdziale 5.1.

W przypadku skrawania piłą napiętą z siłą posuwu wynoszącą 15 N średni kąt odchylenia ogniw wynosił 1,59° a średnia intensywność zużycia wynosiła 1,48 $\mu m \cdot m^{-2}$. Zwiększenie siły posuwu do 70 N spowodowało istotny spadek średniego kąta o jaki odchyla się ogniwa tnące do wartości 1,18° oraz spadek średniej intensywności zużycia

do 0,32 $\mu m \cdot m^{-2}$. Potwierdza to hipotezę, że większa możliwość odchylania się ostrzy piły w płaszczyźnie rzazu jest przyczyną szybszego zużycia się ostrzy. Przyczyną tego zjawiska może być zwiększona możliwość ruchu ogniw tnących w płaszczyźnie rzazu. Co powoduje wystąpienie zwiększonego tarcia. Być może siła posuwu oraz napięcie wstępne mają również wpływ na zużycie innych elementów piły łańcuchowej takich jak nity oraz elementy ogniw współpracujące z rowkiem oraz bieżnią prowadnicy. Potwierdzenie tego wymaga jednak dalszych jeszcze bardziej długotrwałych badań.

6. Dyskusja

Opisane w pracy badania przeprowadzono przy różnych warunkach pracy, tzn. różnych wartościach zadanej siły posuwu oraz różnym napięciu wstępnym piły łańcuchowej. Oba te parametry zależą od operatora [Maciak, Kubuśka 2018].

Jako parametr opisujący zużycie krawędzi tnącej przyjęto promień jej zaokrąglenia. Promień zaokrąglenia krawędzi tnącej jako parametr oceny stopnia zużycia krawędzi tnącej używano już w 1953 przez Mausko.

Podczas rejestracji procesu skrawania drewna piłą łańcuchową okazało się, że ogniwa zmieniają swoje położenie względem płaszczyzny rzazu. Potwierdza to obserwacje Górskiego z 2001 roku oraz Maciaka z 2001 oraz 2013 roku.

Najniższe wartości powierzchniowej wydajności skrawania otrzymano podczas pracy z siłą posuwu o wartości 15 N. Znacząco wyższe wartości wydajności skrawania osiągnięto przy pracy z większymi wartościami zadanej siły posuwu. Inni badacze również stwierdzili, że wraz ze wzrostem siły posuwu zwiększa się powierzchniowa wydajność skrawania. Były to ustalenia m.in Piesta w 1962, Łukomskiego w 1976 oraz Maciaka w 2001 roku. Potwierdzono także stwierdzenie Górskiego z 1996, Botwina z 1979 oraz Maciaka i Kubuśki z 2018 roku, że przy pracy piłą luźną osiągane są niższe wydajności skrawania niż przy pracy z piłą prawidłowo napiętą. Podczas długotrwałych badań zaobserwowano także szybszy spadek wydajności skrawania przy pracy piłą luźną. Natomiast najdłużej z wysoką wydajnością skrawania pracowała piła z siłą posuwu 70 N.

Maciak [2001] obliczył przy pomocy modelu matematycznego, że kąt wychylenia ogniw podczas pracy zawiera się w granicach od 1,2° do 3,4°. Nie potwierdził tego jednak empirycznie. W trakcie pomiarów wykonanych na podstawie analizy klatek filmu wykonanego kamerą do zdjęć szybkich, okazało się, ze średni kąt odchylenia ogniwa piły łańcuchowej od bieżni prowadnicy przy pracy z siłą posuwu wynoszącą 15 N waha się od 1,59° (piła napięta) do 2,55° (piła luźna). Natomiast przy pracy z siłą posuwu wynoszącą 70 N – od 1,18° (piła napięta) do 1,79° (piła luźna). W wyniku badań empirycznych uzyskano nieco mniejsze wartości kątów odchylenia ogniw niż ustalił Maciak na podstawie swojego modelu matematycznego. Potwierdzono jednak stwierdzenie Maciaka z 2001 roku, że przy większej sile posuwu, wartości kątów odchylenia ogniw są mniejsze.

Wartości kątów ustawienia ogniwa w rzazie zależą także od napięcia wstępnego piły łańcuchowej [Botwin J. i Botwin M. 1979, Rulko i Matuszkin 1970, Uspienski 1973, Górski 1996b]. Luźne napięcie piły powoduje większą swobodę wychylania się ogniw w rzazie, osiągnięto istotnie większe wartości kąta odchylenia ogniwa od bieżni prowadnicy podczas pracy z piłą luźną, aniżeli prawidłowo napiętą. Potwierdziły to opisywane badania.

Przedstawione w niniejszej pracy wyniki potwierdzają wnioski z badań przeprowadzonych w 1967 roku przez To, Doi i Yokoyama. Badacze udowodnili, że wszystkie elementy mają swobodę ruchu względem osi nitów. Podczas procesu skrawania ogniwa mogą przemieszczać się w pozycji pionowej i poziomej. Maciak w 2013 roku stwierdził, że luźno napięta piła łańcuchowa powoduje większą swobodę wychylania się ogniw piły. Jest to równoznaczne ze stwierdzeniem, że podczas pracy z piłą luźną występuje więcej przerw w procesie skrawania, przez co osiągane są niższe wydajności skrawania tą piłą. Wszystkie te wnioski zostały potwierdzone.

Podczas analizy filmów zarejestrowanych przez kamerę do zdjęć szybkich, zauważono chwilowe przerwy podczas procesu skrawania drewna. Zachodzące przerwy w tym procesie zostały także zauważone przez Górskiego w 2001. Nieciągłość procesu skrawania znacznie wpływa na osiąganą przez nią wydajność [Maciak 2013] oraz zużycie krawędzi tnącej piły.

W 2013 roku Maciak stwierdził, że maksymalna wydajność skrawania wynosi 120 $cm^2 \cdot s^{-1}$. Pracując piłami naostrzonymi osiągnięto maksymalną wydajność skrawania wynoszącą około 123 $cm^2 \cdot s^{-1}$ przy pracy z siłą posuwu 70 N. Uzyskane wartości powierzchniowej wydajności skrawania w obu przypadkach są zbliżone. Mogą wynikać z różnic pomiędzy próbkami w obu badaniach.

Stopień zaokrąglenia krawędzi tnącej ogniw piły, który określa stopień zużycia ostrzy ogniwa piły jest jednym z najważniejszych parametrów geometrycznych ogniwa tnącego piły łańcuchowej żłobikowej. Wysoką wydajność skrawania pilarką uzyskujemy, kiedy piła jest prawidłowo napięta, ostrza ogniw mają odpowiednio zachowane kąty a także dobry stan krawędzi tnących [Maciak 2013].

Zużycie krawędzi tnącej ogniw piły wpływa znacząco na wydajność skrawania drewna piłami łańcuchowymi. Im większa wartość promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej, tym niższe są wartości powierzchniowej wydajności skrawania. Zależność ta została opisana przez Bieńkowskiego w 1993, Maciaka w 1994 oraz Górskiego w 1996b. Górski w 2005 roku stwierdził, że wzrost stopnia zużycia krawędzi tnącej ogniw wpływa

na to, że drewno zamiast być rozcinane – zaczyna być rozrywane. Stąd niższe wydajności skrawania piłami zużytymi. Autor ten stwierdził, że wzrost promienia stępienia ostrzy od 10 µm do 30 – 35 µm powoduje spadek wydajności o ponad 30 %.

W przypadku moich badań wzrost promienia zaokrąglenia od 10 µm do 35 µm powoduje spadek uzyskiwanej wydajności skrawania od 21 do 57%. Spadek zależy od zastosowanej siły posuwu i napięcia wstępnego. Największy spadek występuje w przypadku zastosowania siły posuwu wynoszącej 15 N i wynosi 57,5% (od wartości 74,82 $cm^2 \cdot s^{-1}$ do wartości 43,04 $cm^2 \cdot s^{-1}$). Podobny jest w przypadku piły luźnej przy sile posuwu wynoszącej 35 N – wynosi wtedy 56,9% (od wartości 115,1 $cm^2 \cdot s^{-1}$ do wartości 65,6 $cm^2 \cdot s^{-1}$). Znacznie niższe procentowe spadki występują w przypadku skrawania piłą napiętą przy wartościach sił posuwu 35 N oraz 70 N. Wynoszą one odpowiednio 21,15% (od wartości 118,21 $cm^2 \cdot s^{-1}$ do wartości 93,21 $cm^2 \cdot s^{-1}$) oraz 23% (od wartości 116,49 $cm^2 \cdot s^{-1}$ do wartości 89,71 $cm^2 \cdot s^{-1}$).

Przy rosnącym promieniu zaokrąglenia krawędzi tnącej, wydajność skrawania szybciej ulega zmniejszeniu podczas pracy z piłą luźną. Potwierdziło to badania z 2018 roku Maciaka i Kubuśki. Im większa zadana siła posuwu, tym wydajność skrawania wolniej spada przy wciąż rosnącym promieniu zaokrąglenia krawędzi tnącej. Potwierdzono także stwierdzenie Lewandowskiego z 2011 roku, że niewłaściwe napięcie piły ma wpływ na szybkość zużycia ostrzy krawędzi tnących pił łańcuchowych.

Utrata zdolności skrawania drewna piłą łańcuchową jest skutkiem zmniejszania się wymiarów liniowych elementów tnących [Szczerek, Wiśniewski 2000], w tym przypadku ostrzy ogniw piły. Zużycie się ostrzy charakteryzuje zmiana promienia zaokrąglenia ostrzy piły. Proces zużycia ostrza jest związany z jego zmianami geometrycznymi [Duchnowski 1997]. Wskutek tarcia promień zaokrąglenia krawędzi tnącej wzrasta. Zmiany właściwości ostrza postępują wraz z wzrostem wykonanej powierzchni rzazu. Po osiągnięciu granicznej wartości promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej, uniemożliwiona jest dalsza praca. Taki stan ostrza nazwany jest stępieniem [Jemielniak 2004]. Dla piły pracującej z siłą posuwu 15 N graniczna wartość promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej, po której niemożliwa jest dalsza praca piłą przy tej sile posuwu wynosi 36,26 µm – po wykonaniu 18,95 m^2 powierzchni rzazu. Podczas pracy piłą napiętą przy zadanej sile posuwu 35 N graniczna wartość promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej wynosi 38,46 µm (po wykonaniu 28,98 m^2 powierzchni rzazu). Natomiast przy tej samej sile, ale luźnym napięciu wstępnym, niemożliwa jest dalsza praca po przekroczeniu promienia o wartości 37,45 µm. Przy tych warunkach pracy

wykonano 25,48 m^2 powierzchni rzazu. Podczas pracy z siłą posuwu 70 N piłą napiętą możliwa jest praca do osiągnięcia przez ogniwo wartości promienia wynoszącej 46,19 μm, po wykonaniu 119,56 m^2 powierzchni rzazu.

Maciak, Górska i Zach w 2017 roku stwierdzili, że wraz ze zwiększającą się wartością powierzchni wykonanego rzazu, zwiększają się różnice w stopniu zużycia poszczególnych ostrzy piły łańcuchowej. Wyniki moich ustaleń nie potwierdzają tego. Zróżnicowanie zużycia ogniw piły zależy od zadanych warunków pracy. Zauważono, że ostrza ogniw piły o luźnym stopniu napięcia wstępnego podczas pracy z zadaną siłą posuwu wynoszącą 35 N cechują się najmniejszą nierównomiernością zużycia spośród wszystkich badanych przypadków. Potwierdzono, ze nierównomierność zależy od napięcia wstępnego piły łańcuchowej, zgodnie z tezą Maciaka i Kubuśki z 2018 roku. Na nierównomierność zużycia krawędzi tnących ma także wpływ zadana siła posuwu. Podczas pracy z siłą posuwu wynoszącą 15 N wykazano największą nierównomierność zużycia poszczególnych ostrzy piły. Niezgodności te wynikają prawdopodobnie z tego, że tamte badania były krótsze. W trakcie ich trwania wykonano znacząco mniejszą powierzchnię rzazu. Wcześniejsze badania prowadzono jedynie do drugiego okresu krzywej Lorenza. Natomiast nie poznano trzeciego okresu zużycia, kiedy ostrza są niezdolne do dalszej pracy. W przytoczonych badaniach z 2017 i 2018 roku zauważono, że brak jest w literaturze długotrwałych badań zużycia się ostrzy piły
w niezmiennych warunkach pracy.

Im większa zadana siła posuwu, tym możliwe jest wykonanie większej powierzchni rzazu z większą wydajnością skrawania. Na tą zależność ma wpływ także zastosowane napięcie wstępne piły. Podczas pracy piłą luźną możliwe jest wykonanie mniejszej powierzchni rzazu z mniejszą wydajnością skrawania. Wniosek ten jest zgodny ze stwierdzeniem Maciaka i Kubuśki z 2018 roku.

7. Wnioski

1. Kąt odchylenia ogniw jest większy dla luźnego napięcia piły oraz dla mniejszej wartości siły posuwu. W przypadku piły prawidłowo napiętej spadek wartości siły posuwu z 70 N do wartości 15 N powoduje wzrost średniego kąta odchylenia ogniw tnących o 0,41° co jest wzrostem o 34,7 %. W przypadku piły luźno napiętej spadek wartości siły posuwu z 70 N do wartości 15 N powoduje wzrost średniego kąta odchylenia ogniw tnących o 0,76° co jest wzrostem o 42,5 %. Zatem bardziej widoczny wzrost występuje dla piły luźno napiętej. W przypadku pracy piłą z zadaną siłą posuwu wynoszącą 15 N spadek napięcia powoduje wzrost wartości średniego kąta odchylenia ogniw o 0,96° co stanowi 60,4 %. W przypadku pracy piłą z zadaną siłą posuwu wynoszącą 70 N spadek napięcia powoduje wzrost wartości średniego kąta odchylenia ogniw o 0,61° co stanowi 51,7 %. Wraz ze spadkiem wartości siły posuwu spadek napięcia wstępnego powoduje większą zmianę średniego kąta odchylenia ogniw.
2. Intensywność zużycia krawędzi tnącej również zależy od napięcia wstępnego oraz od zadanej wartości siły posuwu. Wzrasta ona wraz ze spadkiem zadanej siły posuwu oraz wartości napięcia wstępnego. W opisywanych badaniach największą średnią intensywność zużycia stwierdzono dla piły napiętej pracującej z siłą posuwu wynoszącą 15 N, jej wartość wynosiła 1,48 $\mu m \cdot m^{-2}$. Wzrost siły posuwu do 70 N spowodował spadek średniej intensywności zużycia do 0,32 $\mu m \cdot m^{-2}$. Badania przy różnych stopniach napięcia wykonano dla siły posuwu wynoszącej 35 N. W tym przypadku spadek wartości napięcia wstępnego, spowodował wzrost średniej intensywności zużycia od 1,04 $\mu m \cdot m^{-2}$ do 1,15 $\mu m \cdot m^{-2}$.
3. Na potrzeby tej pracy zdefiniowano współczynnik zużycia krawędzi tnącej. Jego wartość jest największa przy skrawania z najmniejszą badaną wartością siły posuwu i wynosi 1,4016. Wartość tego współczynnika spada wraz ze wzrostem zadanej siły posuwu. Przy zastosowanej sile posuwu wynoszącej 35 N wartość współczynnika wzrostu promienia wynosi od do 1,0255 do 1,1253, w zależności od stanu napięcia piły. Większe wartość odpowiada pile o luźnym napięciu wstępnym. Przy sile posuwu wynoszącej 70 N, wartość tego współczynnika wynosi od 1,8239 do 0,0906. Jego wartość maleje wraz ze wzrostem powierzchni wykonanego rzazu.

4. Można stwierdzić, że intensywność zużycia zależy od możliwości wychylania się ogniw piły w płaszczyźnie rzazu. W przypadku pracy z małymi wartościami sił posuwu oraz napięcia wstępnego stwierdzono większą możliwość odchylania się ogniw piły oraz większą intensywność zużycia ogniw piły. Aby ograniczyć zjawisko zużycia ogniw piły należy stosować możliwie duże wartości napięcia wstępnego oraz pracować z największą możliwą wartością siły posuwu.
5. Powierzchniowa wydajność skrawania, zależy istotnie od wartości napięcia wstępnego piły łańcuchowej oraz od zadanej siły posuwu. Po naostrzeniu największą wartość powierzchniowej wydajności skrawania uzyskiwano piłą napiętą pracującą z siłą posuwu wynoszącą 70 N, jej wartość wynosiła 119,88 $cm^2 \cdot s^{-1}$. Zmniejszenie zadanej wartości siły posuwu do 15 N spowodowało spadek powierzchniowej wydajności skrawania do 72,8 $cm^2 \cdot s^{-1}$. W przypadku pracy z siłą posuwu wynoszącą 35 N, spadek wartości napięcia wstępnego piły łańcuchowej spowodował spadek uzyskiwanej wartości powierzchniowej wydajności skrawania od 116,4 $cm^2 \cdot s^{-1}$ do 113,47 $cm^2 \cdot s^{-1}$.
6. Wzrost wartości zadawanej siły posuw powoduje, że piła jest w stanie wykonać większą powierzchnię rzazu. W przypadku siły posuwu wynoszącej 15 N piła przestała skrawać po wykonaniu 18,95 m^2 powierzchni rzazu, przy wartości promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej wynoszącej 36,26 μm. Gdy zastosowano siłę posuwu wynoszącą 70 N piła była w stanie wykonać 119,56 m^2 powierzchni rzazu. Promień zaokrąglenia jej krawędzi tnącej wynosił wtedy 46,19 μm. Jednak zwiększenie wartości zastosowanej siły posuwu wiąże się też ze zwiększonym wysiłkiem operatora pilarki.
7. W opisywanych badania wszystkie trzy fazy zużycia krawędzi tnącej zaobserwowano tylko w przypadku pracy z zadaną siłą posuwu wynoszącą 70 N. W pozostałych przypadkach zbyt szybko następowała utrata możliwości skrawania przez piłę.

8. Literatura

1. Białobok, S., Boratyński A., Bugała W., 1993: Biologia sosny zwyczajnej. Instytut Dendrologii Polskiej Akademii Nauk
2. Bieńkowski J., 1993: Wpływ stępienia ostrzy tnących na opory i wydajność skrawania piłą łańcuchową. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej nr 12.
3. Bierszadskij A. Ł., 1967: Razczet rezimow rezanija drewiesiny. Lesnaja Promyszlennost, Moskwa.
4. Botwin J., Botwin M., 1979: Maszynoznawstwo leśne. PWRiL, Warszawa.
5. Bruchwald A., 1997: Statystyka matematyczna dla leśników. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
6. Ciesielczuk P., 1973: Wpływ podziałki zębów tnących piły łańcuchowej na wskaźniki piłowania drewna. Praca doktorska, SGGW, Warszawa.
7. Dmochowski J., 1981: Podstawy obróbki skrawaniem. PWN, Warszawa.
8. Dolny S., Kusiak W., Stempski W., 2003: Charakterystyka wymiarowa wiórów powstałych przy przecinaniu drewna piłami łańcuchowymi. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej nr 11.
9. Duchnowski K.1997: Maszynowa obróbka , narzędzia i podstawowe obrabiarki stolarskie WSziP Warszawa
10. Dvořák J., Walczyk J. 2013: Wydajność pozyskania drewna przy pomocy harwesterów i pilarki spalinowej. Sylwan 157 (3): 171−176
11. Fischer R., 1978: Ein Beitrag zur Mechanik des Spanungsvorganges nicht fliessfahiger Werkstoffe am Beispiel von Holz. Holztechnologie 19.
12. Fryza M., 2005: Wpływ wysokości rzazu na zapotrzebowanie na moc i wydajność skrawania. Praca magisterska, SGGW, Warszawa.
13. Gawlik J. 1988. Prognozowanie stanu zużycia ostrzy narzędzi w procesie skrawania. Politechnika Krakowska, Monografia 66, Kraków, 197 s.
14. Gawlik L., Harasymowicz J, 1990: Wybrane zagadnienia z badań konstrukcyjnych i eksploatacyjnych narzędzi skrawających. WPK Kraków.
15. Gendek A., 2005: Wpływ parametrów sprzęgła na wydajność skrawania drewna pilarką spalinową. Praca doktorska. Wydział Inżynierii Produkcji SGGW w Warszawie.
16. Gendek A., 2006: Wpływ parametrów silnika pilarki spalinowej na wydajność skrawania drewna. Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna 2006, nr 6, s. 23-25

17. Górski J., 1993: Wpływ siły posuwu i wysokości rzazu na wydajność skrawania piłą łańcuchową. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej nr 4.
18. Górski J., 1995: Próba teoretycznego opisu procesu piłowania drewna piłą żłobikową, Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej nr 6, 13-15.
19. Górski J., 1996a: Oddziaływanie ogranicznika posuwu ogniwa tnącego na drewno w czasie skrawania. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej nr 1.
20. Górski J., 1996b: Analiza wpływu podstawowych czynników na wydajność i energochłonność procesu skrawania drewna piłą łańcuchową żłobikową. Praca doktorska, SGGW, Warszawa
21. Górski J., 2001: Proces cięcia drewna elektryczną pilarką łańcuchową. Wydawnictwo SGGW, Warszawa
22. Górski J., 2005: Projektowanie procesów technologicznych obróbki skrawaniem drewna i tworzyw drewnopochodnych – zagadnienia ogólne. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
23. Instrukcja obsługi 2010, MultiScanBase v. 18. 03. System pomiarowy pracujący w środowisku Windows Computer Scanning Systems, Ltd
24. Instrukcja obsługi Husqvarna 357 XP 2010
25. Iwanowski E.G., Wasilewskaja P.W., 1972: Nowyje isledowania rzezania drewiesiny. Lesnaja Promyszlennost, Moskwa.
26. Janczo J., 1965: Vysledky pruskumou rzezacich czasti motorowych pil. Instytut Badawczy Gospodarki Leśnej, OLT, Zvolen.
27. Jemielniak K. 2012: Obróbka skrawaniem. OWPW ISBN: 978-83-7207-048-7
28. Kivimaa E., 1950: Cutting Force in Woodworking. The State Institute for Technical Research, Helsinki.
29. Koch P., 1969: Procesy mechaniczeskiej obrabotki drewiesiny. Lesnaja promyszlennost, Moskwa
30. Koczegarow W. G., 1970: Technologia i masiny lesiosecznych i lesowostanowitelnych rabot. Lesnaja Promyszlennost, Moskwa.
31. Komorowski J., 1987: Wpływ geometrii ostrza żłobikowego piły łańcuchowej na skrawanie drewna sosnowego. Praca doktorska, IBL, Warszawa.
32. Kozłowski R. 2003: Wpływ typu piły łańcuchowej i gatunku drewna na wydajność skrawania i zużycie paliwa. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej nr.4
33. Krzysik F. 1974: Jakość drewna i wiek rębności w świetle badań rentgenowskich. Sylwan 118 nr.08

34. Kubiak M., Laurow Z. 1994: Surowiec drzewny. Fundacja Rozwój SGGW, Warszawa
35. Kuosman W.W., Biełowzorow L.N., 1964: Isledowanie procesow pilenia drewiesiny cepnymi reżuszczymi aparatami motornych pil. Trudy CNIIME, nr 49.
36. Kuryjański R., 2011: Obróbka skrawaniem i obrabiarki. Politechnika Warszawska
37. Kusiak W. i in., 2012: Model zużycia paliwa przy pozyskaniu drewna sosnowego. Sylwan nr 3.
38. Laurow Z., Kubiak M.,1994: Surowiec drzewny. Fundacja Rozwój SGGW
39. Loth E., 1982: Badania oporów płaskiego skrawania nożem prostym wybranych gatunków drewna. Praca doktorska, SGGW, Warszawa.
40. Lewandowski T., 2011: Wpływ napięcia wstępnego piły łańcuchowej oraz gatunku drewna na szybkość stępiania się ogniw tnących podczas przerzynki. Praca magisterska, SGGW, Warszawa.
41. Liubczenko W. I., 1986: Rezanie drewiesiny i drewiesnych materiałow. Lesnaja Promyszlennost, Moskwa.
42. Loike H.J., 1960: Direkt angetriebene Motorsage und Getriebesagen. Holz - Zentralblatt nr 91.
43. Łukomski Ł., 1977: Badanie mechaniki piłowania piłami żłobikowymi. Praca doktorska, SGGW, Warszawa.
44. Łukomski Ł., 1980: Ocena wskaźników piłowania drewna piłami łańcuchowymi różnych typów. Zeszyty Naukowe SGGW, Leśnictwo 28.
45. Maciak A. 2008: Pilarka jaka jest, każdy wie? Piła łańcuchowa – wiadomości ogólne. Drwal, nr 11
46. Maciak A. 2009: Badanie nagrzewania się układu tnącego pilarki spalinowej. Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych, Zeszyt 543: Ekologiczne aspekty mechanizacji produkcji rolniczej i leśnej. Warszawa 2009
47. Maciak A. 2013: Wpływ czynników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych na przebieg procesu i wydajność skrawania drewna pilarką spalinową. Rozprawy Naukowe i Monografie. Wydawnictwo SGGW, Warszawa
48. Maciak A. 2015: The impact of the chainsaw engine type on the course and efficiency of the wood cutting process. . Utilization of agricultural and forest machinery in research and teaching : monograph /- Kraków : Polish Academy of Arts and Sciences. - S. 191-200. Prace Komisji Nauk Rolniczych, Leśnych i

Weterynaryjnych / Polska Akademia Umiejętności, ISSN 1733-5183 ; Vol. 5, nr 22

49. Maciak A., 1994: Badania oporów i wydajności skrawania drewna bukowego łańcuchową piłą żłobikową. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej nr 11.
50. Maciak A., 1998: Wpływy geometrii ostrza żłobikowego na jego obciążenie podczas skrawania drewna sosnowego. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej nr 5.
51. Maciak A., 2000: Forces acting on cutter of saw chain during wood cutting. Annals of Warsaw Agricultural University no. 36.
52. Maciak A., 2001: Wpływ parametrów konstrukcyjnych ogniw tnących piły łańcuchowej żłobikowej na wydajność skrawania drewna. Praca doktorska, SGGW, Warszawa.
53. Maciak A., Górska U., Zach Ż. 2017: Impact of saw chain cutters type on blunting speed of blades and change of cutting efficiency. Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Agriculture (Agricultural and Forest Engineering) nr. 70 s.27-36
54. Maciak A., Kubuśka M. 2018: Wpływ napięcia wstępnego na szybkość stępiania się ogniw piły łańcuchowej oraz wydajność skrawania. Leśne Prace Badawcze 2018, Vol. 79, nr 3, s. 261-268
55. Maciak A. Kubuśka M., Moskalik T. Instantaneous cutting force variability in chainsaws. Forests 2018, 9(10), 660; DOI: 10.3390/f9100660.
56. Maciak A.: 2007 Wpływ stopnia zanieczyszczenia filtra powietrza pilarki spalinowej na charakterystykę zewnętrzną silnika . Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna 2007, nr 1, s. 16-18
57. Małożewska K., 2009: Wpływ napięcia wstępnego i wysokości rzazu na przebieg procesu skrawania piłą łańcuchową żłobikową. Praca magisterska, SGGW, Warszawa.
58. Mausko M.: Fundamental Researches on the Metal Cutting, Trans. Japan Soc. Mech. Engr. Vol. 19, 1953, 18
59. Merchant E. 1945: Mechanics of the Metal Cutting Process. Journ. Of Appl. Phys.Vol. 16, , 5
60. Niewiarowski K., 1983: Tłokowe silniki spalinowe. WKiŁ, Warszawa.

61. Nordfjell T., Johansson L., Hellstrom J., Gref R., Skoupy A., Athanassiadis D., 2007: A Method to Measure Saw-Chain Lubrication. International Journal of Forest Engineering, Vol. 18, No.1.
62. Olczak W., 2009: Obróbka skrawaniem. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne
63. Orlicz T., 1988: Obróbka drewna narzędziami tnącymi. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
64. Orłowski M. 2016: Wpływ rodzaju ogniw tnących piły na przebieg procesu skrawania drewna okrągłego. Wydział Inżynierii Produkcji. Katedra Maszyn Rolniczych i Leśnych. Praca magisterska
65. Piest K.H., 1962: Vesuche uber die Umlaufgeschwindigkeit der Motorsagenkette. Holz-Zentralblatt nr 47.
66. Polska Norma PN-67/M-04301: Tarcie i procesy zużycia przy tarciu ciał stałych. Podział nazwy i określenia
67. Polska Norma PN-ISO 3002: Podstawowe pojęcia w obróbce wiórowej i ściernej -- Geometria części roboczej narzędzi skrawających -- Terminologia ogólna, układy odniesienia, kąty narzędzia i kąty robocze oraz łamacze wióra
68. Polska Norma PN-ISO 6535: Pilarki łańcuchowe przenośne -- Badanie hamulca piły łańcuchowej
69. Poradnik drzewiarza tom 1, 1960, PWRiL.
70. Przywózki P., 1993: Badania wpływu wysokości rzazu oraz siły posuwu na opory skrawania piły łańcuchowej. Praca magisterska, SGGW, Warszawa.
71. Rulko L. J., Matuszkin W. Z., 1970: Powyższenie nadiżnosti pilnych szin. Lesnaja Promyszlennost, nr 1.
72. Sobczyk M., 2007: Statystyka. Wydawnictwa Naukowe PWN, Warszawa
73. Solski P, Ziemba S. 1969: Zagadnienia zużycia elementów maszyn spowodowane tarciem. Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN. Warszawa.
74. Staniszewska A., Zakrzewski W., 2006: Obróbka cięciem. Wydawnictwo Akademii Rolniczej w Poznaniu.
75. Staniszewski J., Porankiewicz B.; 1978: Kryteria i metody oceny stopnia stępienia ostrzy narzędzi skrawających do obróbki drewna, Wyd. Akademia Rolnicza Poznań
76. Stempski W., Grodecki J., 1998: Wpływ kąta zaostrzenia ogniw tnących na wydajność skrawania i trwałość pił łańcuchowych. Poznańskie Towarzystwo Przyjaciół Nauk, Prace Komisji Nauk Rolniczych i Leśnych, t. 86.

77. Stempski Wł., 2001: Wpływ kształtu ogniwa tnącego i geometri i ostrza na jednostkową wydajność skrawania i dynamikę zatępienia żłobikowych piła łańcuchowych. Praca doktorska. Akademia Rolnicza im. Augusta Cieszkowskiego w Poznaniu
78. Storch B. 2001: Podstawy obróbki skrawaniem. Wydaw. Politechniki Koszalińskiej, 2001.
79. Strehlke E.-G., Sterzik H. K., Strehlke B., 1976: Maszynoznawstwo leśne. PWRiL, Warszawa.
80. Stryczek S. 1995: Napęd hydrostatyczny tom 1 elementy, WNT Warszawa
81. Szczerek M., Wiśniewski M. 2000: Tribologia tribotechnika. Polskie Towarzystwo Tribiologiczne. Instytut Technologii Eksploatacji. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich
82. Sztyber J., 1963: Badania powierzchniowej i objętościowej wydajności skrawania przy przerzynce piłami łańcuchowymi w zależności od siły docisku. Praca magisterska, SGGW, Warszawa.
83. To T., Doi O., Yokoyama M., 1967: Cutting Behaviors of Saw Chain (Part 1). Kitami Institute of Technology Repository.
84. Tomczak A., Jelonek T., Grzywiński W., 2011: Pozyskiwanie drewna pilarką. Oficyna Wydawnicza G&P
85. Tomczak K., Tomczak A. 2018: Wpływ doboru sprzętu na wydajność i komfort pracy pilarza przy wykonywaniu zabiegu czyszczeń późnych w drzewostanie sosnowym. Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna nr. 4 s.16-19
86. Toporov A.S., 1991: Matematiceskoe i programmnoe obespacenie dlja rasceta cepnych pil c prjamolinejnym dvizeniem podaci. Mežvuzovskij Sbornik Naučnych Trudov. Lesosečnije, Lesoskladskie Raboty i Suchoputnyj Transport Lesa.
87. Trzeciak P., 2003: Wpływ napięcia i intensywności smarowania piły na wydajność skrawania drewna pilarką. Praca magisterska, SGGW, Warszawa.
88. User's Manual 2009, Photron Fastcam Viewer for High Speed Digital Imaging Ver.3. Revision 1.06E
89. Uspienski W. A. i inni, 1973: Isledowania prodolnoi ustolcziwosti pilnych cepiej. Lesnoj żurnał nr 2.
90. Uspienski W.A., 1967: Pilnyje cepi na lesozagotowkach. Lesnaja Promyszlennost, Moskwa.

91. Wajand J.A., Wajand J.T., 1993: Tłokowe silniki spalinowe średnio- i szybkoobrotowe. WNT, Warszawa
92. Wątroba J., 2009: Wspomaganie analizy statystycznej wyników badań empirycznych STATISTICA. Materiały szkoleniowe. Warszawa.
93. Więsik J. 1990. Energetyka skrmvania drewna pilą lańcuclwwą. Roczniki Nauk Rolniczych t. 79-C-
94. Więsik J. i in., 2005: Pilarki przenośne – budowa eksploatacja. Fundacja Rozwój SGGW", Warszawa.
95. Więsik J., 1994: Model symulacyjny procesu skrawania drewna piłą łańcuchową. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej nr 10.
96. Więsik J., 2001: Współczesne piły łańcuchowe w przenośnych pilarkach spalinowych. Przegląd Techniki Rolniczej i Leśnej nr 5.
97. Więsik J., 2007: Badania przenośnych pilarek łańcuchowych w Zakładzie Mechanizacji Leśnictwa SGGW. Technika i technologia w leśnictwie polskim, Monografia z okazji 50-lecia ZML. Wydawnictwo SGGW, Warszawa.
98. Windsor, 2007: Katalog produktów 2008/9.
99. Wójcik K., 2014: Effect of kerf execution correctness during felling with internal combustion chain saw on direction of tree fall. Annals of Warsaw University of Life Sciences - SGGW. Agriculture (Agricultural and Forest Engineering) 2014, nr 64, s. 89-96
100. Żołek P., 2005: Badanie wydajności skrawania piłami łańcuchowymi różnej konstrukcji. Praca magisterska, SGGW, Warszawa.

1. www.atj-sc.pl
2. www.journals.lib.und.ca
3. www.oregon.pl
4. www.patents.google.com
5. www.posterlounge.com
6. www.woodanatomy.ch
7. www.oregonchain.eu
8. www. gardeneo.pl
9. www.poznan.lasy.gov.pl

9. Załączniki

Tab. 1. *Zestawienie powierzchni wykonanego rzazu, przy których nie ma istotnej różnicy wartości promienia zaokrąglenia krawędzi tnącej podczas skrawania piłą z siłą posuwu 70 N*

Powierzchnie wykonanego rzazu, przy których nie ma istotnej różnicy w wartościach promienia [m^2]	Średni promień pierwszej powierzchni [µm]	Średni promień drugiej powierzchni [µm]	p
27,44 m^2 vs. 29,4 m^2	33,13	33,87	0,000
29,4 m^2 vs. 31,36 m^2	33,87	35,31	0,000
31,36 m^2 vs. 33,32 m^2	35,31	35,89	0,000
33,32 m^2 vs. 35,28 m^2	35,89	36,79	0,000
35,28 m^2 vs. 37,24 m^2	36,79	37,94	0,000
37,24 m^2 vs. 39,2 m^2	37,94	38,59	0,000
39,2 m^2 vs. 41,16 m^2	38,59	39,21	0,001
80,36 m^2 vs. 82,32 m^2	41,68	42,10	0,009
82,32 m^2 vs. 84,28 m^2	42,10	42,51	0,010
84,28 m^2 vs. 86,24 m^2	42,51	42,70	0,017
86,24 m^2 vs. 88,2 m^2	42,70	42,81	0,029
88,2 m^2 vs. 90,16 m^2	42,81	42,94	0,025
98 m^2 vs. 99,96 m^2	43,62	44,06	0,005
101,92 m^2 vs. 103,88 m^2	44,16	44,48	0,049
109,76 m^2 vs. 111,72 m^2	44,76	45,08	0,008
115,64 m^2 vs. 117,6 m^2	45,35	45,80	0,000
117,6 m^2 vs. 119,56 m^2	45,80	46,19	0,001

Wyrażam zgodę na udostępnianie mojej pracy w czytelniach Biblioteki SGGW.

Magda Kubicka-Orłowska

(czytelny podpis autora)

Dyrektor Instytutu Inżynierii Mechanicznej

dr hab. inż. Tomasz Nurek, prof. SGGW

Rada Dyscypliny Instytutu Inżynierii Mechanicznej

Pismo przewodnie

W dniu 23.04.2024 przekładam rozprawę doktorską pt. *Wpływ wybranych warunków pracy na intensywność zużycia krawędzi tnących ogniw piły łańcuchowej żłobikowej"* wraz z potrzebnymi załącznikami (w wersji papierowej i na nośniku elektronicznym), o których mowa w § 11 Regulamin przeprowadzania postępowań w sprawie nadania stopnia doktora w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie osobom, które rozpoczęły studia doktoranckie przed rokiem akademickim 2019/2020 do Rady Dyscypliny Instytutu Inżynierii Mechanicznej.

Magda Kabulska-Drzewska
23-04-2024

RPW/11282/2024
z dnia 23.04.2024 r.