



AKADEMIA GÓRNICZO HUTNICZA

im. Stanisława Staszica w Krakowie

**WYDZIAŁ INŻYNIERII
MECHANICZNEJ I ROBOTYKI**

Praca doktorska

Imię i nazwisko mgr inż. Krzysztof Zagórski

Temat pracy doktorskiej:

**„Badania procesu skrawania
tworzyw węglowych WPW celem
doboru optymalnych warunków
obróbki”**

Promotor pracy
dr hab. inż. Piotr Rusek, prof. AGH

Kraków, rok 2010

Dedykacja

Tym, którzy byli światłem potrzebnym
dla osiągnięcia mojego celu.

Mojej ukochanej żonie
i mojemu synowi

Annie Klaudii
Franciszkowi

oraz

Mojej mamie
mojemu tacie
moim siostram

Józefie
Tadeuszowi
Joannie, Bożenie,
Agnieszce, Małgorzacie
i Magdalenie.

Podziękowanie

- ❖ Pragnę złożyć serdeczne podziękowania Panu Promotorowi Dr hab. inż. Piotrowi Ruskowi za kilkuletnie kierowanie moim rozwojem naukowym, w szczególności zaś za pomoc i cenne wskazówki przy realizacji tej rozprawy,
- ❖ prof. dr hab. inż. Andrzejowi Skorupie za stworzenie warunków przychylnych do wykonania niniejszej pracy,
- ❖ dr inż. Józefowi Kołodziejowi za inspirację i zaproszenie do zespołu pracującego nad obróbką tworzyw węglowych,
- ❖ dr inż. Piotrowi Kohutowi i dr inż. Gerardowi Głuchowi za bezinteresowny wkład włożony w realizację badań laboratoryjnych,
- ❖ mgr inż. Piotrowi Sokołowskiemu za informatyczną pomoc i przygotowanie programów obliczeniowych,
- ❖ Kierownictwu i kolegom z Katedry Systemów Wytwarzania oraz pracownikom technicznym za współpracę i przychylność podczas realizacji pracy.

Autor

Spis treści

Spis treści
Wykaz ważniejszych oznaczeń

iii
V

	Spis rysunków	Vi
	Spis tabel	X
	Wprowadzenie	Xi
1	Mechanizmy niszczenia spójności materiałów	1
2	Modele ogólne niszczenia materiałów przez wciskanie wgłębnika w półprzestrzeń kruchą	2
3	Mechanika skrawania materiałów kruchych - modele	6
3.1	Model Merchanta zmodyfikowany przez Potts i Shuttlewortha	7
3.2	Model Nishimatsu	9
3.2.1	Model Kasjana	12
3.2.2	Model Evansa	13
3.2.2.1	Model Evansa dla ostrza symetrycznego	13
3.2.2.2	Model Evansa dla ostrza asymetrycznego	15
3.2.3	Model Zniszczyńskiego	17
3.2.4	Model Bocsanczego	21
3.3.1	Model Bierona	22
3.3.2	Interpretacja J. Jonaka rzeczywistego przebiegu F_c głównej siły skrawania w czasie t	25
3.3.3	Model Frołowa	27
3.4	Krytyczna ocena teoretycznych modeli skrawania materiałów kruchych – Teza pracy	28
4	Badania laboratoryjne skrawalności tworzywa węglowego WPW-65 - metodyka	30
4.1	Cel badań	30
4.2	Przedmiot badań	30
4.3	Metodyka badań	37
4.3.1	Uwagi ogólne	37
4.3.2	Stanowisko badawcze	39
4.3.3	Zmodernizowane stanowisko badawcze	42
4.3.4	Przygotowanie próbek do badań	44
4.3.5	Przygotowanie narzędzia do badań	46
4.3.6	Sposób przygotowania i wykonania pomiarów	48
4.3.7	Wielkości rejestrowane podczas badań	50
4.3.7.1	Zapis główna siła skrawania $F_c(t)$	51
4.3.7.2	Zapis przemieszczeń narzędzia $x(t)$	53
4.3.7.3	Określanie granulacji wiórów powstających podczas skrawania	54
4.3.7.4	Wielkości pochodne wyznaczone na podstawie zarejestrowanych przebiegów	55
4.3.7.5	Cyfrowy zapis obrazu powstawania odspojenia – mechanizmu procesu	57
4.3.7.6	Energetyczne wskaźniki procesu skrawania tworzywa węglowego	60
5	Badania laboratoryjne skrawalności tworzywa węglowego WPW-65 – wyniki pomiarów i ich wstępna analiza	66
5.1	Główna siła skrawania i wartości pochodne	66
5.2	Granulacja wiórów powstałych podczas skrawania	73
5.3	Mechanizm powstawania wiórów przy obróbce tworzywa	

	węglowego WPW-65	76
5.4	Energetyczne wskaźniki procesu skrawania	85
6	Podsumowanie otrzymanych wyników badań	89
7	Dobór optymalnych parametrów obróbki tworzyw węglowych WPW-65	92
8	Wnioski końcowe	99
	Literatura	103
	Załączniki	
	Załącznik 1	111
	Załącznik 2	118
	Załącznik 3	120
	Załącznik 4	126

Wykaz ważniejszych oznaczeń

A_c – przekrój warstwy skrawanej,
 a_p – głębokość skrawania,

b - szerokość skrawania,
 K_A - wskaźnik przekroju warstwy skrawanej,
 F_C - główna siła skrawania,
 $\overline{F_C}$ - średnia głównej siły skrawania,
 F_{Cmax} - maksymalna główna siła skrawania,
 F_{Cmin} - minimalna główna siła skrawania,
 F_{fr} - siła fragmentacji,
 F - siła oporu i usuwania nierówności materiału,
 F_s - siła sprężystości,
 k_C - współczynnik oporu właściwego skrawania,
 K_d - wskaźnik dynamiczności procesu,
 L_C - całkowita praca skrawania,
 E_{fr} - energia fragmentacji,
 L_o - praca na pokonanie oporów ruchu,
 e_{fr} - względną energią fragmentacji,
 b_f - wymiar charakterystyczny ziarna,
 u_v - względny udział frakcji ziaren o wymiarze charakterystycznym
 $b_f \leq 1 \text{ mm}$,
 u - niepewność pomiarowa,
 L - droga skrawania,
 γ - kąt natarcia ostrza,
 Φ - kąt poślizgu,

Spis rysunków:

Rys. 2.1	Wpływ porowatości skrawanego materiału kruchego, na wielkość strefy zmiażdżenia	2
Rys. 2.2	Wciskanie stempla stalowego w skałę	3

Rys. 2.3	Strefa sprasowania przy wciskaniu narzędzia przy ujemnym kącie γ	4
Rys. 2.4	Formowanie wióra w trakcie skrawania materiału kruchego technicznej ceramiki wg J. Flizikowskiego	5
Rys. 3. 1	Model Merchanta zmodyfikowany przez Pottsa i Shuttlewortha	7
Rys. 3. 2	Rozkład naprężeń przy skrawaniu w modelu Nishimatsu	9
Rys. 3. 3	Proces odspajania większych kawałków przy skrawaniu wg Nishimatsu	11
Rys. 3. 4	Model skrawania wg Kasjana	12
Rys. 3. 5	Model skrawania ostrzem klinowym symetrycznym wg Evansa	14
Rys. 3. 6	Model działania ostrza asymetrycznego wg Evansa	16
Rys. 3. 7	Model skrawania i rozkładu naprężeń wg Zniszczyńskiego	17
Rys. 3. 8	Zmiana położenia i kierunku działania siły odspajającej P_1 w początkowej fazie odspajania	21
Rys. 3. 9	Model skrawania wg Bocsanczego	21
Rys. 3. 10	Rozkład sił skrawania wg Bierona	23
Rys. 3. 11	a) Lokalizacja strefy zmiążdżenia przed ostrzem, b) wyidealizowana charakterystyka przebiegu czasowego siły skrawania typowa dla skrawania materiałów kruchych	24
Rys. 3. 12	Charakterystyka rzeczywistego przebiegu siły skrawania F_c w czasie t	25
Rys. 3. 13	Hydrostatyczne oddziaływanie strefy zmiążdżenia, przy wnikaniu ostrza w materiał	26
Rys. 3. 14	Charakterystyczne parametry elementów wióra	26
Rys. 3. 15	Model skrawania wg Frotowa	27
Rys. 3. 16	Strefa zmiążdżenia przed ostrzem noża stożkowego	28
Rys. 4.1	Powierzchnia tworzywa z widocznymi ziarnami antracytu i łomu węglowego	30
Rys. 4. 2	Schemat zmiany orientacji ziaren wypełniacza podczas prasowania przelotowego	33
Rys. 4. 3	Schemat konstrukcji formy wibracyjnej	34
Rys. 4. 4	Schemat ideowy produkcji wyrobów węglowych	35
Rys. 4. 5	Wygląd bloku węglowego WPW-65: a) przed obróbką, b) po obróbce	36
Rys. 4. 6	Typowe kształty bloków katodowych (katodowych)	36
Rys. 4. 7	Skrawanie swobodne (a) i nieswobodne (b)	38
Rys. 4. 8	Stanowisko badawcze stosowane we wstępnym etapie badań	40

Rys. 4. 9	Widok specjalnej konstrukcji głowicy nożowej stosowanej przy badaniach mechanizmu skrawania tworzywa WPW-65	41
Rys. 4. 10	Sposób blokowania ruchu obrotowego głowicy nożowej na frezarce	41
Rys. 4. 11	Stanowisko badawcze na podstawowym etapie badań	43
Rys. 4. 12	Widok z góry stanowiska badawczego po modernizacji	44
Rys. 4. 13	Próbka do badań – skrawanie nieswobodne (wymiary w mm)	45
Rys. 4. 14	Próbka do badań – skrawanie swobodne (wymiary w mm)	45
Rys. 4. 15	Narzędzia skrawające – skrawanie swobodne (geometria w układzie narzędzia wg PN-ISO 3002-1+A1)	46
Rys. 4. 16	Narzędzia skrawające – skrawanie nieswobodne (geometria w układzie narzędzia wg PN-ISO 3002-1+A1)	47
Rys. 4. 17	Wygląd jednej klatki obrazu na którym widać błysk w układzie światłowodowym ułatwiający synchronizację obrazu powstawania wióra z przebiegiem siły skrawania i przebiegiem przemieszczenia narzędzia	49
Rys. 4. 18	Sposób zamocowania próbki w siłomierzu piezoelektrycznym typu 9265B firmy Kistler	50
Rys. 4. 19	Przykładowy przebieg głównej siły skrawania F_C	52
Rys. 4. 20	Przykładowy przebieg zarejestrowanej głównej siły skrawania F_C i przemieszczenia narzędzia $x(t)$	53
Rys. 4. 21	Schemat pomiaru przemieszczenia narzędzia $x(t)$ pod działaniem sił skrawania	54
Rys. 4. 22	Kolumna sił ustawiona na wibratorze bezwładnościowym: a) przesiewacz wibracyjny, b) sita.	55
Rys. 4. 23	Sposób wyznaczenia wartości F_{Cmax} , $\overline{F_C}$ i L_C	56
Rys. 4. 24	Cyfrowy obraz mechanizmu odspajania materiału	58
Rys. 4. 25	Równoczesna synchronizacja obrazu z sygnałem siły i przemieszczenia określana dodatkowym znacznikiem przesuwu przemieszczającym się wraz z upływem czasu.	59
Rys. 4. 26	Model układu mechanicznego stanowiska pomiarowego drgającego o jednym stopniu swobody z tłumieniem	61
Rys. 4. 27	Wykres przedstawiający sposób wyznaczenia jednostkowej energii E_{fr}	63
Rys. 5. 1	Wpływ kąta γ na wartość średniej siły skrawania $\overline{F_C}$ i K_C w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika przekroju warstwy skrawanej $K_A = 1,25$	69

Rys. 5. 2	Wpływ kąta γ na wartość średniej siły skrawania $\overline{F_C}$ i K_C w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika przekroju warstwy skrawanej $K_A = 2,83$	69
Rys. 5. 3	Wpływ kąta γ na wartość średniej siły skrawania $\overline{F_C}$ i K_C w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika przekroju warstwy skrawanej $K_A = 5$	70
Rys. 5. 4	Wpływ kąta γ na wartość średniej siły skrawania $\overline{F_C}$ i K_C w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika przekroju warstwy skrawanej $K_A = 7,81$	70
Rys. 5. 5	Procentowy udział ziaren < 1 mm w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika kształtu przekroju warstwy skrawanej $K_A = 1,25$	74
Rys. 5. 6	Procentowy udział ziaren < 1 mm w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika kształtu przekroju warstwy skrawanej $K_A = 2,83$	74
Rys. 5. 7	Procentowy udział ziaren < 1 mm w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika kształtu przekroju warstwy skrawanej $K_A = 5$	75
Rys. 5. 8	Procentowy udział ziaren < 1 mm w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika kształtu przekroju warstwy skrawanej $K_A = 7,81$	75
Rys. 5. 9	Oddzielanie się odłamków tworzywa węglowego WPW-65 – skrawanie swobodne ostrzem o kącie natarcia $\gamma = 25^0$ przy wskaźniku przekroju warstwy skrawanej $K_A = 1,25$	77
Rys. 5. 10	Usuwanie pozostałych fragmentów materiału pozostającego na drodze narzędzia skrawającego	77
Rys. 5. 11	Wyznaczenie kąta poślizgu w danej chwili czasowej przebiegu dla kąta natarcia ostrza skrawającego $\gamma = 25^0$: a) w 1,5 [s], b) w 4 [s], c) w 6 [s], d) w 12 [s]	79
Rys. 5. 12	Przebieg siły skrawania przed i po oddzieleniu dużych kawałków podczas skrawania nożem o kącie natarcia ostrza $\gamma = 25^0$ w chwilach czasowych: a) 3,2 [s], b) 7 [s], c) 12 [s]	80
Rys. 5. 13	Powstawanie podczas skrawania pęknięć typu lamelarnego w tworzywie WPW-65. Pęknięcia w chwilach przebiegu a) w 1 [s] , b)	

	w 4,5 [s], c) w 8,5 [s] powstały przez połączenie pod działaniem siły skrawania wad materiałowych ułożonych pod powierzchnią prasowanego materiału	81
Rys. 5. 14	Przebieg siły skrawania przed i po oddzieleniu dużych kawałków podczas skrawania nożem o kącie natarcia ostrza $\gamma = 0^0$: a) w 4,5 [s], b) w 8,5 [s]	82
Rys. 5. 15	Wyznaczenie kąta poślizgu dla kąta natarcia ostrza skrawającego $\gamma = -20^0$: a) w 0,6 [s], b) w 2 [s], c) w 10 [s]	84
Rys. 5. 16	Wykres względnej energii e_{fr} oraz względnej energii e_o dla skrawania swobodnego i nieswobodnego dla wskaźnika przekroju $K_A = 1,25$.	86
Rys. 5. 17	Wykres względnej energii e_{fr} oraz względnej energii e_o dla skrawania swobodnego i nieswobodnego dla wskaźnika przekroju $K_A = 2,83$	87
Rys. 5. 18	Wykres względnej energii e_{fr} oraz względnej energii e_o dla skrawania swobodnego i nieswobodnego dla wskaźnika przekroju $K_A = 5$	87
Rys. 5. 19	Wykres względnej energii e_{fr} oraz względnej energii e_o dla skrawania swobodnego i nieswobodnego dla wskaźnika przekroju $K_A = 7,81$	88
Rys. 7 .1	Wykres przedstawiający optymalne parametry dla skrawania swobodnego	95
Rys. 7. 2	Wykres przedstawiający optymalne parametry dla skrawania nieswobodnego	96
Rys. 7. 3	Zdjęcie przedstawiające specjalne narzędzie skrawające w zakładzie SGL Carbon Polska S.A. w Raciborzu	97
Rys. 7. 4	Automatyczna linia obróbkowa LBK – 400	98

Spis tabel:

Tab. 4. 1	Zawartość procentowa podstawowych składników używanych do produkcji tworzywa WPW-65	33
-----------	---	----

Tab. 4. 2	Właściwości fizyko-mechaniczne badanego tworzywa WPW-65	34
Tab. 5. 1	Wartość maksymalna głównej siły skrawania F_{Cmax} przy skrawaniu swobodnym	67
Tab. 5. 2	Wartość maksymalna głównej siły skrawania F_{Cmax} przy skrawaniu nieswobodnym	67
Tab. 5. 3	Wartość średnia głównej siły skrawania $\overline{F_C}$ przy skrawaniu swobodnym	68
Tab. 5. 4	Wartość średnia głównej siły skrawania $\overline{F_C}$ przy skrawaniu nieswobodnym	68
Tab. 5. 5	Wskaźnik K_d dynamiczności procesu skrawania przy skrawaniu swobodnym	71
Tab. 5. 6	Wskaźnik K_d dynamiczności procesu skrawania przy skrawaniu nieswobodnym	71
Tab. 5. 7	Praca całkowita skrawania L_C dla skrawania swobodnego	72
Tab. 5. 8	Praca całkowita skrawania L_C dla skrawania nieswobodnego	72
Tab. 5. 9	Procentowy udział wagowy wiórów < 1 [mm] (nieprzydatnych do recyklingu)	73
Tab. 5. 10	Tabela kąta poślizgu Φ w zależności od kąta natarcia ostrza γ i sposobu skrawania ($K_A = 1,25$)	83
Tab. 5. 11	Ilość odspojień wiórów zarejestrowana na długości próbki	83
Tab. 5. 12	Wartość energii fragmentacji E_{fr} w zależności od kąta natarcia γ i wskaźnika przekroju K_A dla skrawania swobodnego i nieswobodnego	86

Wprowadzenie

Produkcja przemysłowa wyrobów z węgla i grafitu rozpoczyna się z końcem XIX wieku jako odpowiedź na zapotrzebowanie zakładów produkujących elektrody lamp górniczych. Opatentowanie przez Siemens'a poziomych i pionowych pieców elektrycznych z elektrodami węglowymi, pieców oporowych przez Clowna i Heraulta, jak i rosnące zapotrzebowanie na elementy grafitowe w procesie wytwarzania aluminium sprawia, że rośnie zapotrzebowanie na elektrody węglowo-grafitowe o dużych gabarytach. Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na elektrody węglowo-grafitowe jest ulepszana ich produkcja. Dzieje się to dzięki usprawnieniom Achesona (USA), na podstawie których w 1896 roku rozpoczyna się produkcja elektrografitu. W tym samym roku Castner opracowuje sposób przetwarzania węgla w grafit, a następnie Heroult i Hardmuth oraz Plani i Simens udoskonalają wytwarzanie antracytowych elektrod węglowych [61].

Z budowanych licznie zakładów produkcyjnych największe znaczenie posiadają fabryki powstałe:

- w Norymberdze w 1872 roku,
- w Genneyilliers w 1884 roku,
- w Niagarze w 1889 roku,
- w Raciborzu w 1896 roku,
- w Berlinie w 1907 roku.

Początki polskiego przemysłu wyrobów z węgla uszlachetnionego sięgają lat trzydziestych XX wieku, ale szybki rozwój krajowego przemysłu elektrodowego następuje dopiero po drugiej wojnie światowej w związku ze zwiększonymi wymaganiami stawianymi przez szybko rozwijający się polski przemysł metalurgiczny. W 1945 roku rusza produkcja wyrobów elektrodowych w odbudowanej ze zniszczeń wojennych fabryce Siemens-Piania w Raciborzu (obecnie SGL Carbon Polska S.A), a w latach pięćdziesiątych w Zakładach Elektrocarbon w Tarnowskich Górach jest podejmowana produkcja szczotek do maszyn elektrycznych. W 1965 roku w oparciu o technologie przejętą z ZEW Racibórz zostaje uruchomiona produkcja szerokiego asortymentu

wyrobów z węgla i grafitu w utworzonych w tym celu zakładach Elektrod Węglowych w Nowym Sączu. Ponadto, produkcją masy elektrodowej i anodowej zajmują się zakłady w Łaziskach Górnych oraz Huta Aluminium w Skawinie [68, 68, 70].

Obecnie Polska (Racibórz) jest wiodącym w Europie producentem wielkogabarytowych elektrod węglowych i sukcesywnie zwiększa swoje możliwości produkcyjne dysponując ciągle rosnącym portfelem zamówień.

Wyroby węglowe, węglowo-grafitowe i grafitowe znajdują szerokie zastosowanie w przemyśle metalurgicznym, zwłaszcza w hutnictwie: na części wlewnic, przy odlewaniu stali pod ciśnieniem, na krystalizatory przy odlewaniu ciągłym, przy budowie trzonów i garów wielkich pieców, na obmurza wielkich pieców, wanien do termoelektrolizy glinu, elektrycznych pieców redukcyjnych oraz w przemyśle chemicznym przy budowie urządzeń, zbiorników i reaktorów narażonych na korodujące działanie środowisk chemicznych. Zwłaszcza wzrost produkcji aluminium jako podstawowego materiału konstrukcyjnego stosowanego w środkach transportu lądowego i powietrznego oraz w budownictwie przyczynia się pośrednio do zwiększonego zapotrzebowania na wyroby węglowe i węglowo-grafitowe.

Tak liczne zastosowania wyrobów węglowych i węglowo-grafitowych są możliwe dzięki ich wyjątkowo korzystnym własnościom fizyko-chemicznym, a mianowicie:

- małą gęstością pozorną i rzeczywistą,
- dobrym przewodnictwem cieplnym i elektrycznym,
- dużą odpornością na działanie wysokich temperatur w tym dobrymi własnościami mechanicznymi nawet przy bardzo wysokich temperaturach,
- małą rozszerzalnością cieplną,
- dużą odpornością na działanie czynników chemicznych (z wyjątkiem utleniaczy),

- dobrymi własnościami ślizgowymi - niskim współczynnikiem tarcia przy współpracy z innymi materiałami.

W procesie produkcyjnym wyrobów z tworzyw węglowych i węglowo-grafitowych istotne znaczenie posiadają ostatnie operacje prowadzone drogą obróbki ubytkowej. Muszą one gwarantować dobrą dokładność wymiarowo-kształtową, a powierzchnia po obróbce musi spełniać wymagania co do chropowatości i integralności przewidywanych normą.

Wraz ze wzrostem zapotrzebowania na tworzywa węglowe rosną wymagania odnośnie do wydajności procesu ich obróbki ubytkowej. Przy opracowaniu nowego bardziej wydajnego procesu obróbki napotykamy, jednak na liczne ograniczenia. Podstawowymi czynnikami ograniczającymi są:

- zużycie narzędzia powodowane koniecznością prowadzenia procesu bez stosowania cieczy chłodząco-smarującej,
- konieczność stosowania kosztownych specjalnych narzędzi i obrabiarek,
- wymagania dotyczące jakości wyrobu oraz
- specjalne wymagania ekologiczne dotyczące recyklingu produktów odpadowych z procesu obróbki.

Wszystko, to wpływa w istotny sposób na ekonomię procesu obciążonego dodatkowo wysokimi kosztami produkcji półfabrykatu (proces prasowania i spiekania przygotówki trwa od 40 do 70 dni).

W tym świetle badania nad optymalizacją procesów formowania i obróbki tworzyw węglowych i węglowo-grafitowych nabierają szczególnego znaczenia.

Niniejsza praca dotyczy badań procesu obróbki tworzywa wielkopieczowego – w skrócie WPW* stosowanego w przemyśle metalurgicznym.

Liczne teorie [11, 12, 13, 15, 28, 29, 44, 53, 61, 62, 86] dotyczące zachowania się podczas skrawania materiałów kruchych nie

* w szczególności WPW-65

uwzględniają w wystarczającym stopniu złożonego, losowego charakteru procesu obróbki tworzyw węglowych co ogranicza możliwości ich bezpośredniego zastosowania do interpretacji wyników uzyskanych z badań. Dlatego niniejsza praca doktorska jest poświęcona w znacznej mierze analizie mechanizmów odspajania tworzywa WPW-65 oraz wynikającej z tej analizy energetycznej interpretacji procesu.

We wstępnej części pracy obejmującej trzy pierwsze rozdziały wskazano na znane hipotezy wytrzymałościowe odnoszące się do procesu obróbki materiałów kruchych, a następnie poddano krytyce istniejące hipotetyczne modele skrawania materiałów trudnoskrawalnych. Krytyka ta dała podstawę do postawienia tezy pracy bezpośrednio odnoszącej się do klasy tworzyw węglowych WPW.

Kolejny czwarty rozdział pracy poświęcono przygotowaniom metodycznym do badań mających zweryfikować postawioną przez autora tezę pracy. Opisano w nim założenia metodyczne dotyczące przygotowania próbek, narzędzi skrawających oraz samego stanowiska badawczego wraz z zainstalowanym wyposażeniem pomiarowym.

Rozdział piąty zawiera wyniki badań eksperymentalnych oraz statystyczne ujęcie uzyskanych rezultatów przeprowadzonych badań według podanego w rozdziale czwartym programu.

Podsumowanie otrzymanych wyników z przeprowadzonych badań podano w rozdziale szóstym.

W rozdziale siódmym autor na bazie posiadanych wyników eksperymentalnych dokonuje wyboru wskaźników istotnych dla procesu obróbki tworzywa WPW - 65. W tej części podano również rozwiązanie zagadnienia optymalizacyjnego.

Ostateczne podsumowanie wyników rozprawy przedstawiono w rozdziale ósmym w postaci wniosków końcowych: ogólnych, szczegółowych oraz skierowanych na przyszłe zamierzenia badawcze autora.

Praca jest uzupełniona o rozdział zawierający spis wykorzystanej literatury fachowej z zakresu tematyki rozwijanej w pracy i zawiera 86 pozycji bibliograficznych.

Badania były realizowane w ramach prac własnych Katedry Wytrzymałości i Technologii Maszyn obecnie Katedra Systemów Wytwarzania 10.10.130.21 – Badanie mechaniki skrawania tworzyw węglowych - lata 2002-2009.

1. Mechanizmy niszczenia spójności materiałów

Skrawanie materiału kruchego jakim w normalnych warunkach jest tworzywo węglowe postępuje w wyniku niszczącego działania narzędzia skrawającego. Narzędzie napierające na materiał generuje w nim złożony stan naprężeń, gdzie w strefie kontaktu występują naciski normalne ściskające, a efekt skrawania przypisuje się bądź naprężeniom ścinającym bądź naprężeniom rozciągającym [28, 52, 79, 86]. Przed analizą typowych modeli skrawania warto przypomnieć klasyczne wytrzymałościowe hipotezy wyężenia (niszczenia) materiałów, które znajdują szersze zastosowanie w budowie modeli procesów skrawania.

1. **Hipoteza Naviera** - stan krytyczny występuje w płaszczyźnie maksymalnych naprężeń stycznych. Uwzględnia się tarcie wywołane naprężeniem prostopadłym do tej powierzchni. Doświadczenia wykazały niesłuszność tej hipotezy, jednak ze względów na swoją prostotę bywa ona niekiedy stosowana [28, 52, 53, 79, 86],
2. **Hipoteza Mohra** - pokonanie spójności następuje w wyniku poślizgu w płaszczyźnie naprężeń stycznych związanych funkcyjną zależnością z naprężeniami normalnymi $\tau = f(\sigma)$. Maksimum tej funkcji jest miarą wyężenia materiału. Hipoteza ta o dość prostej postaci jest często stosowana w praktyce inżynierskiej [28, 52, 79],
3. **Hipoteza: Coulomb – Tresca – Guest** - miarą wyężenia jest maksymalne naprężenie styczne. Hipoteza ta nadaje się wyłącznie dla materiałów o symetrycznych własnościach wytrzymałościowych [28, 79],
4. **Hipoteza Burzyńskiego (niezmienników)** – miarę wyężenia lokalnego stanowi suma energii postaciowej i pewnej części energii objętościowej. Udział procentowy tej ostatniej zależy od stanu naprężenia i właściwości indywidualnych materiału [28, 52].

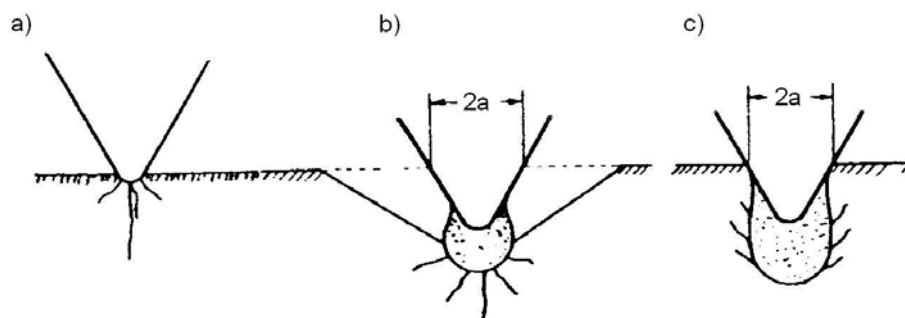
2. Modele ogólne niszczenia materiałów przez wciskanie wgłębnika w półprzestrzeń kruchą

Istotne znaczenie dla wstępnej analizy zachowania się narzędzia w kontakcie z materiałem niszczonym posiadają modele ogólne odkształcenia materiału przez wciskanie wgłębnika o kształcie stożkowym lub cylindrycznym w półprzestrzeń kruchą (model Ostrouszki [86] , model Opolskiego [52, 53]).

Według Ostrouszki proces niszczenia materiału kruchego przebiega wg następującego schematu:

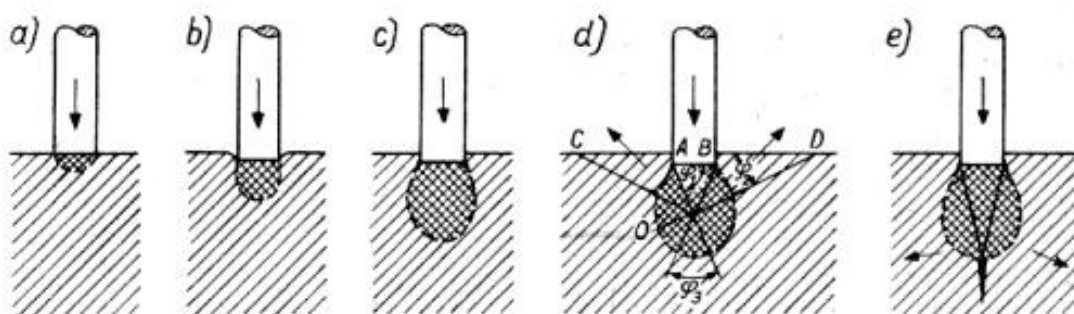
1. Pod wgłębnikiem, przy określonej wartości siły, powstają odkształcenia sprężyste,
2. Po przekroczeniu granicznych naprężeń sprężystych (granicy sprężystości) pod wgłębnikiem powstają pęknięcia i przemieszczenia materiału, którym towarzyszy usuwanie jego części,
3. Dalszy wzrost siły powoduje powtarzanie się tego cyklu.

T. Opolski zajmując się problemem urabiania węgla dla którego istotne znaczenie posiada porowatość struktury proponuje model (Rys. 2.1), w którym duże znaczenie dla przebiegu niszczenia posiada strefa sprasowania.



Rys. 2.1. Wpływ porowatości skrawanego materiału kruchego, na wielkość strefy zmiażdżenia [27, 28, 52, 53]: a) materiał o bardzo małej porowatości, b) materiał porowaty, c) materiał o bardzo dużej porowatości.

Wielkość strefy sprasowania zależy od porowatości materiału, przy czym, im porowatość większa tym strefa sprasowania bardziej rozległa. Dla materiałów o bardzo małej porowatości zagłębienie ostrza wywołuje inicjację szczelin promieniowych prowadzących do odspojenia wióra. W materiałach porowatych obserwuje się wzrastający obszar uplastycznienia materiału (zmiażdżenia).

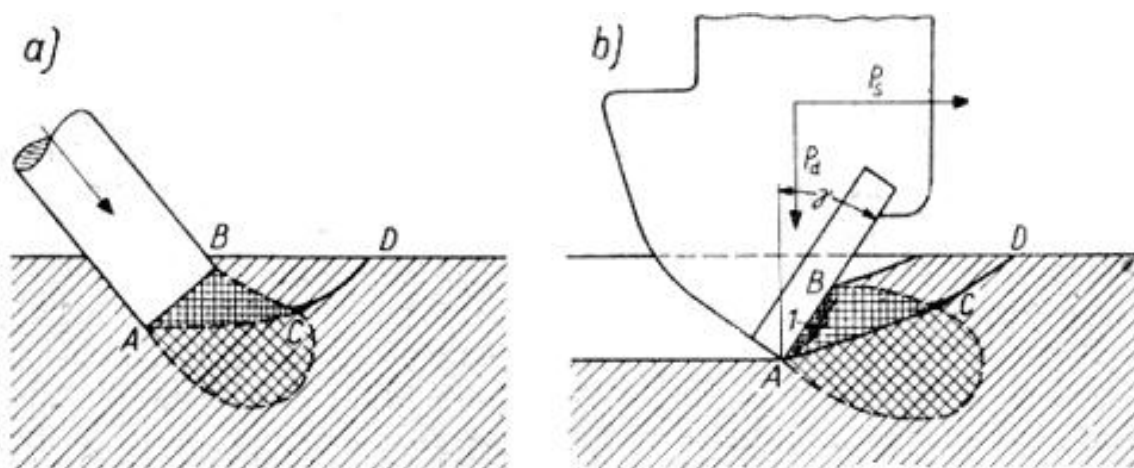


Rys. 2.2. Wciskanie stempla stalowego w skałę [52, 53].

Opolski potwierdził swoje spostrzeżenia badaniami laboratoryjnymi, które pozwoliły na sformułowanie następujących wniosków:

- a) Przy wciskaniu stempla w próbkę powstaje pod nim strefa naprężeń ściskających powodujących zmniejszenie się porów i sprasowanie skały w pewnym obszarze. W strefie tej panują warunki zbliżone do hydrostatycznego ściskania,
- b) Ze wzrostem siły docisku zwiększa się zasięg strefy sprasowania,
- c) Przy dalszym wzroście docisku zostaje pokonana wytrzymałość na ściskanie wzdłuż obwodu strefy. Strefa penetruje w głąb materiału,
- d) Dalszy wzrost siły docisku powoduje, że powstają naprężenia rozciągające doprowadzające do pęknięć w najslabszym miejscu próbki. Pęknięcia te są skierowane ku swobodnej powierzchni.

Przy skośnym ustawieniu stempla kształt strefy sprasowania jest asymetryczny, a pierwsze pęknięcia utworzą się na granicy tej strefy od strony powierzchni swobodnej. Taki sposób niszczenia materiału zbliżony jest do skrawania nożem o dużym ujemnym kącie natarcia γ (Rys. 2.3).



Rys. 2.3. Strefa sprasowania przy wciskaniu narzędzia o ujemnym kącie γ [52, 53]:
a) wciskanie stempla, b) skrawanie.

Przy dodatnich kątach natarcia γ zakres strefy sprasowania jest znacznie mniejszy, ale przebieg miażdżenia i odrywania się ziaren jest analogiczny. Wyciskanie miażdżonego materiału odbywa wzdłuż powierzchni natarcia narzędzia.

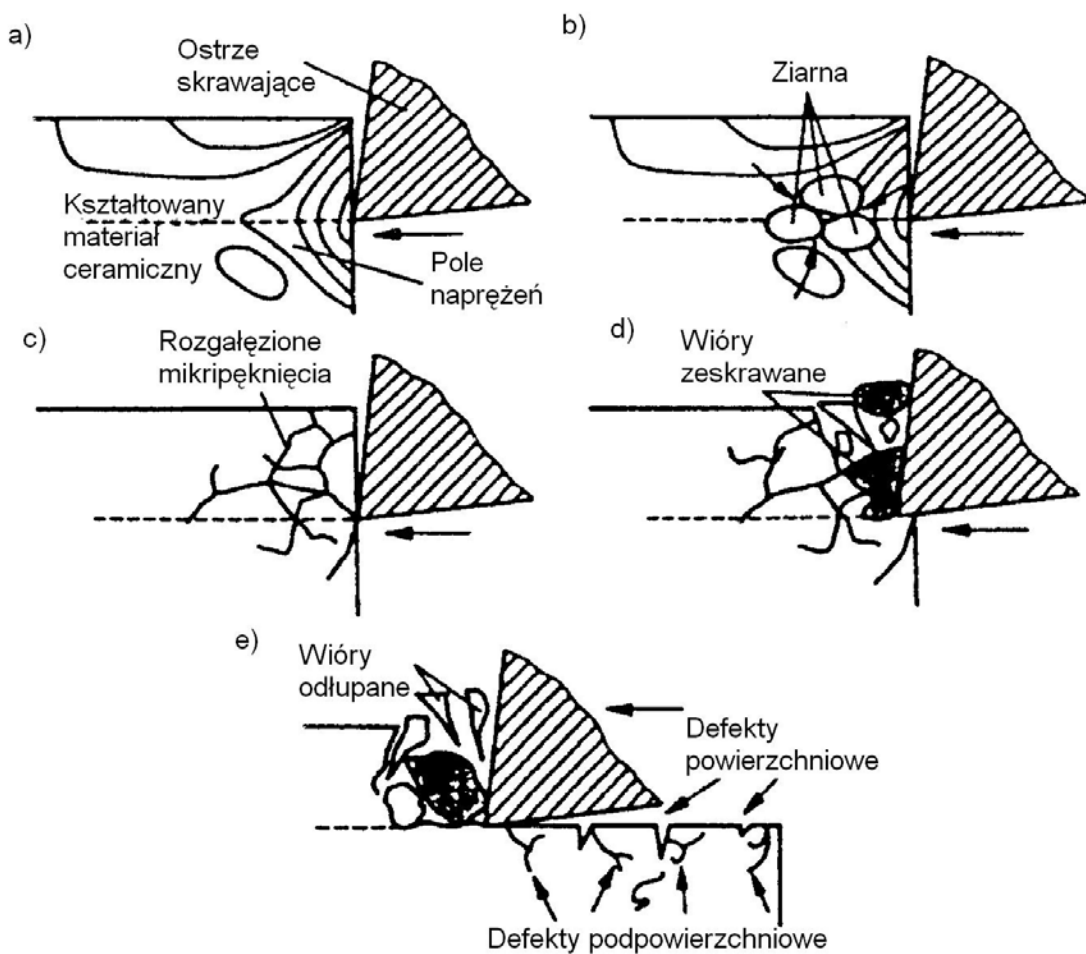
W związku z przewagą kruchości skały nad plastycznością wynikiem skrawania nie jest ciągły wiór, jak przy skrawaniu metali, lecz urobek składający się z odłamków i miazgi.

Typowym przykładem skrawania materiałów kruchych może być obróbka technicznych materiałów ceramicznych. Podczas skrawania technicznego materiału ceramicznego można zaobserwować i wyróżnić następujące stadia (wg Flizikowskiego –[15]):

- a) obciążenie dynamiczne i tworzenie się pola naprężeń,
- b) zapoczątkowanie pęknięcia,
- c) rozprzestrzenianie się pęknięć,

- d) tworzenie się wióra,
- e) powstanie defektów powierzchniowych i podpowierzchniowych.

Istnieją, jednak istotne różnice wynikające z odmiennych właściwości technicznych materiałów ceramicznych w porównaniu z tworzywami węglowymi. Największą różnicą jest minimalna porowatość materiałów ceramicznych ograniczająca do minimum strefę sprasowania, której znaczny udział jest tak charakterystyczny przy skrawaniu tworzyw węglowych.



Rys. 2.4. Formowanie wióra w trakcie skrawania materiału kruchego technicznej ceramiki wg J. Flizikowskiego, a - tworzenie się pola naprężeń, b - zarodkowanie mikropęknięć, c - rozprzestrzanie się mikropęknięć, d - tworzenie się wióra, e - powstanie defektów powierzchniowych i podpowierzchniowych [15].

3. Mechanika skrawania materiałów kruchych - modele

Już od połowy XX wieku prowadzono badania nad mechaniką skrawania materiałów – głównie materiałów plastycznych. Jednak dopiero pod koniec lat 50 tych ubiegłego stulecia zostaje opublikowany model analityczny skrawania materiału kruchego – węgla autorstwa Potts'a i Shuttlewortha. Kolejne modele budowane są z myślą o teoretycznym ujęciu zależności na siłę skrawania w funkcji wytrzymałości kruchego materiału, przekroju warstwy skrawanej i geometrii narzędzia. Modele są poddawane weryfikacji w warunkach przemysłowych.

Z uwagi na hipotetyczne założenia modeli niszczenia materiału w procesie skrawaniem, można wyodrębnić następujące ich grupy:

1. modele oparte na założeniu, że przy bezpośrednim styku narzędzia z materiałem, odrywanie elementów wióra następuje wzdłuż płaszczyzny maksymalnych naprężeń ścinających,
2. modele zakładające określony, krzywoliniowy kształt pęknięcia powstającego pod wpływem naprężeń ścinających, lub rozciągających,
3. modele przyjmujące, że podstawową rolę w procesie skrawania odgrywa strefa sprasowania, stanowiąca pośredni element w przenoszeniu sił narzędzia na materiał obrabiany.

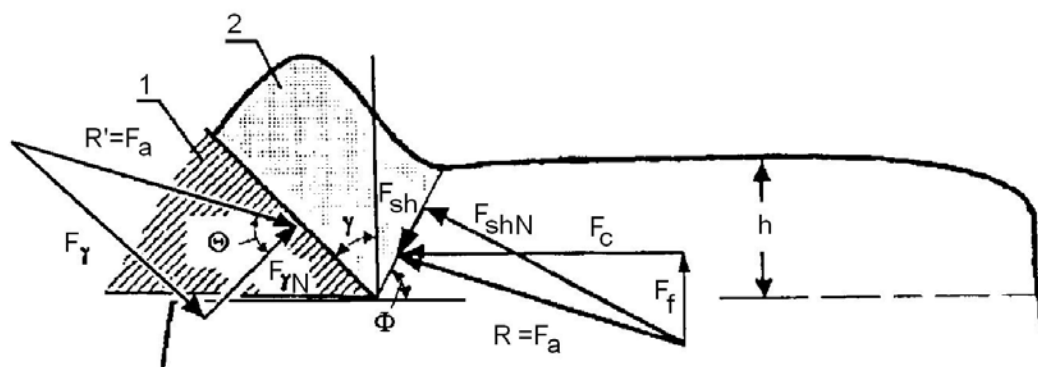
Pierwsze modele odspajania wióra w procesach obróbki skrawaniem zostały zaproponowane przez Piispanena [11], rozwinięte przez Ernsta i Merchanta [11], a następnie uzupełnione przez Lee i Shaffera [44]. Były one ukierunkowane na materiały plastyczne – stale i wychodziły z założenia, że przekroczenie wytrzymałości materiału na

· Uwaga: oznaczenia w tym rozdziale są oznaczeniami stosowanymi przez twórców modeli.

który działa ostrze narzędzia, przy skrawaniu ortogonalnym, odbywa się po płaszczyźnie maksymalnych naprężeń ścinających. Położenie płaszczyzny ścinania określane kątem Φ było wyznaczane przy założeniu, że proces odbywa się przy wydatkowaniu minimum energii. Uzyskane wyniki tylko w nieznacznym stopniu odpowiadały rzeczywistości, dlatego Potts i Shuttleworth zmodyfikowali model Merchanta tak, aby mógł on dotyczyć obróbki materiałów kruchych.

3.1. Model Merchanta zmodyfikowany przez Potts i Shuttlewortha [28, 29, 61]

Potts i Shuttleworth zmodyfikowali model Merchanta tak, aby mógł on znaleźć zastosowanie do opisu skrawania niemetalowych materiałów kruchych. Założyli oni, że formowanie elementu wióra, jest cyklicznie przerywanym procesem skrawania kruchego materiału. Analizę przeprowadzili dla jednostkowej szerokości ostrza w warunkach skrawania ortogonalnego.



Rys. 3.1. Model Merchanta zmodyfikowany przez Potts i Shuttlewortha [28, 29, 61]:

1- ostrze, 2- ścinany główny element wióra, h - grubość warstwy skrawanej, F_t - siła tarcia na powierzchni natarcia, F_{nN} - siła normalna do powierzchni natarcia, F_{sh} , F_{shN} - siły: równoległa i prostopadła do płaszczyzny poślizgu, F_a - siła tworzenia wióra, F_c - siła skrawania, F_f - siła posuwowa (normalna), Θ - kąt tarcia wióra o powierzchnię natarcia, Φ - kąt ścinania, γ - kąt natarcia.

Ostrze skrawające, zdejmując warstwę o grubości h , działa na materiał z siłą F_a , którą można rozłożyć na składowe: styczną do powierzchni natarcia F_γ oraz normalną $F_{\gamma N}$. Ścięcie materiału zachodzi w płaszczyźnie nachylonej pod kątem Φ , względem kierunku skrawania. Materiał obrabiany działa na ostrze z siłą reakcji $R = F_a$, którą można rozłożyć na składową równoległą do założonego kierunku skrawania F_c , oraz normalną do niej F_f . Siłę tworzenia wióra F_a można rozłożyć na składowe w płaszczyźnie ścinania F_{sh} oraz składową normalną F_{shN} .

Ponieważ naprężenia tnące w momencie ścinania są równe wytrzymałości materiału skrawanego na ścinanie, można zapisać:

$$\tau = f_s = \frac{F_{sh} \cdot \sin \Phi}{ht} = \frac{F_a \cos(\Phi + \Theta - \gamma)}{ht}$$

gdzie: Φ - kąt ścinania,

Θ - kąt tarcia wióra o powierzchnię natarcia ostrza,

γ - kąt natarcia ostrza,

f_s - wytrzymałość materiału obrabianego na ścinanie,

Główną siłę skrawania F_c wyznaczyć można z zależności:

$$F_c = \frac{f_s h b \cos(\Theta - \gamma)}{\sin \Phi \cos(\Theta + \Phi - \gamma)}$$

gdzie: h - grubość warstwy skrawanej,

b - szerokość ostrza,

F_c - siła skrawania,

γ - kąt natarcia ostrza,

f_s - wytrzymałość materiału obrabianego na ścinanie,

Φ - kąt ścinania,

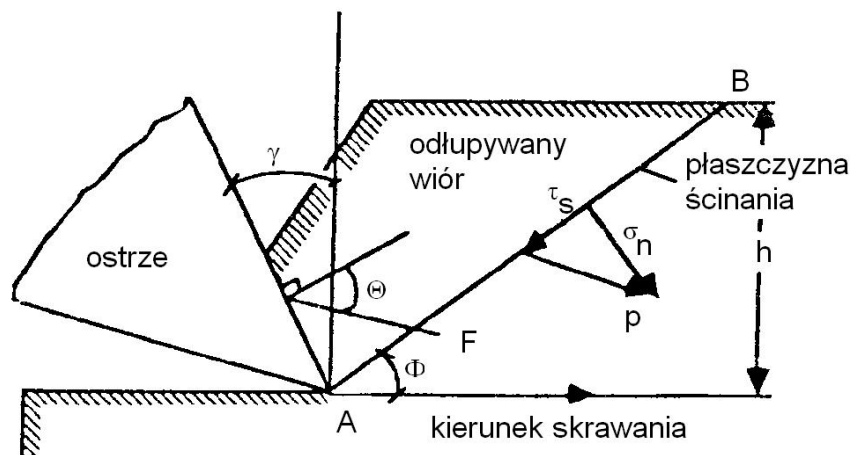
Θ - kąt tarcia wióra o powierzchnię natarcia ostrza,

Siła ta jest potrzebna do ścięcia głównego dużego elementu wióra.

Z badań eksperymentalnych Posttsa i Shuttlewortha przeprowadzonych podczas skrawania węgla wynikało, że wartość siły skrawania F_C , maleje wraz ze wzrostem kąta γ .

3.2. Model Nishimatsu [28, 29, 50]

Modele Merchanta i jego forma przekształcona przez Pottsa i Shuttlewortha nie uwzględniają zmiennego nacisku materiału obrabianego na powierzchnię ścinania, stąd uzyskane wyniki różnią się znacznie od rezultatów przemysłowych. Dlatego Nishimatsu w swoim modelu uwzględnia złożony stan naprężeń w płaszczyźnie ścinania i podaje zależność analityczną wedle której zmieniają się naciski materiału na tę płaszczyznę.



Rys. 3.2. Rozkład naprężeń przy skrawaniu wg Nishimatsu [28, 29, 50]:
 p – nacisk jednostkowy, F – siła działania ostrza na materiał, τ_s – naprężenia ścinające, σ_n – naprężenia normalne, h – głębokość skrawania, Φ – kąt ścinania, Θ – kąt tarcia wióra o powierzchnię natarcia ostrza, γ – kąt natarcia ostrza.

Nishimatsu proponuje przyjąć rozkład nacisków wzdłuż trajektorii ścinania - odcinek AB - (punkt A znajduje się w początku współrzędnej λ) wg następującej zależności:

$$p = p_o \left(\frac{h}{\sin \Phi} - \lambda \right)^n$$

gdzie: p - nacisk jednostkowy,

p_o - stała nacisku,

h - głębokość skrawania,

λ - współrzędna wzdłuż odcinka AB,

n - współczynnik rozkładu naprężeń,

Φ - kąt ścinania,

W oparciu o hipotezę wyężeniową Columba-Mohra, Nishimatsu wyprowadza wzór na główną siłę skrawania F_c , wychodząc z warunku, że suma nacisków jednostkowych p jest równa sile F_c :

$$F_c = \frac{2}{n+1} f_s h b \frac{\cos \Phi}{1 - \sin(\Phi + \Theta - \gamma)} \cos(\Theta - \gamma)$$

gdzie: F_c - główna siła skrawania,

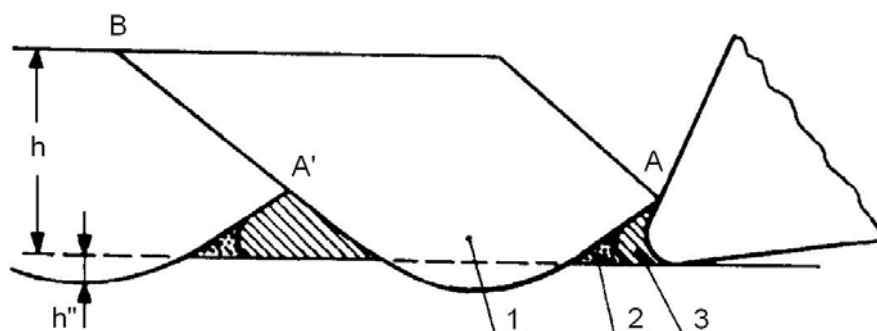
f_s - wytrzymałość skały na ścinanie,

h - głębokość skrawania,

b - szerokość ostrza,

n - współczynnik naprężeń, $n = 11,3 - 0,18 \gamma$,

Prowadząc próby skrawania na piaskowcu i bryłach betonowych Nishimatsu zaobserwował, że proces odspajania większych kawałków materiału przebiega w następujący sposób (Rys. 3.3) .



Rys. 3.3. Proces odspajania większych kawałków przy skrawaniu wg Nishimatsu [50]:

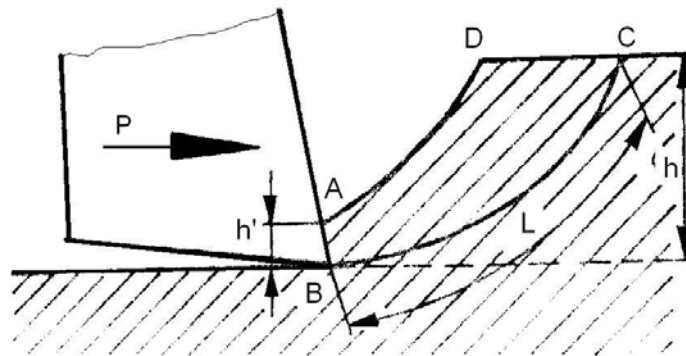
1 – główny element wióra, 2 – strefa mikroszczelin, 3 - strefa miażdżenia, AA' - część trajektorii szczeliny o łukowym kształcie, A'B – odcinek prostoliniowych trajektorii szczelin.

W pewnym momencie, gdy ostrze narzędzia naciska na materiał obrabiany ma miejsce jego kruszenie. Obserwuje się to w okolicy naroża ostrza. Przed ostrzem pojawia się strefa (miażdżonego) materiału 3. Dalszemu ruchowi narzędzia towarzyszy narastanie wartości poszczególnych składowych sił skrawania. W krytycznym momencie w wyniku działania tych sił zostaje wywołany w materiale stan naprężeń, który powoduje powstanie makroskopowych pęknięć inicjujących pęknięcie zasadnicze (wzdłuż krzywej A-B – Rys. 3.3). Narzędzie przemieszcza się skrawając powstałe nierówności (strefa 2) wzdłuż linii odspojenia zasadniczego elementu wióra. Następnie narzędzie przesuwa się do strefy 1 bez wyraźnego wzrostu siły skrawania, aż do momentu, gdy ponownie wejdzie ono w kontakt z materiałem. Wówczas rozpoczyna się kolejny cykl skrawania.

Zaprezentowany model odspajania większych kawałków materiału przez Nishimatsu wykazał dość dobrą zgodność z wynikami badań na piaskowcu i bryłach betonowych.

3.2.1. Model Kasjana [86]

Kasjan uwzględniając w swoim modelu nieciągłość procesu założył, że odspojenie odłamka materiału odbywa się po określonej krzywej - paraboli (paraboliczne ścinanie).



Rys. 3.4. Model skrawania wg Kasjana [86]: P – siła, h – głębokość skrawania, h' – styk materiału na powierzchni natarcia, L – długość krzywej BC.

Przemieszczające się względem materiału narzędzie powoduje powstanie siły P, która działa na powierzchni natarcia. Siła ta powoduje odspojenie wióra ABCD, po określonej krzywej BC o długości L (Rys. 3.4). Na podstawie obserwacji i badań, przeprowadzanych na skałach twardych, Kasjan stwierdził, że odspojenie powstanie dopiero wtedy, gdy wysokość styku h' materiału z narzędziem wyniesie:

$$h' = \frac{f_t L}{q_n k}$$

gdzie: h' – wysokość styku skrawanego materiału z powierzchnią natarcia,

q_n – jednostkowa siła skrawania,

k – współczynnik uwzględniający nierównomierność rozkładu naprężeń i nacisków,

f_t – wytrzymałość materiału na ścinanie.

Ze wzrostem głębokości skrawania h , przy niezmiennych pozostałych parametrach, odspojenie przyjmuje charakter krzywej parabolicznej. Natomiast jednostkowa siła skrawania q_n związana będzie z głębokością skrawania h następującym równaniem:

$$q_n = \frac{C}{h^x}$$

gdzie: C – stała materiałowa,

x – wykładnik potęgowy charakterystyczny dla materiału obrabianego.

Kasjan potwierdził słuszność swojego modelu tylko w szczególnych warunkach obróbki skał twardych.

3.2.2. Model Evansa

3.2.2.1. Model Evansa dla ostrza symetrycznego [12, 13]

Evans opracował swój model skrawania materiałów kruchych dla narzędzi o małym kącie ostrza 2β (Rys. 3.5).

Poczynił on następujące założenia:

- pęknięcie ma kształt łukowy, początkowy kierunek pęknięcia jest zgodny z kierunkiem ruchu ostrza,
- pęknięcie następuje pod wpływem naprężeń rozciągających,
- rozkład naprężeń rozciągających charakteryzuje funkcja σ_r :

$$\sigma_r = f_t \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^n$$

gdzie: σ_r – wartość naprężenia rozciągającego,

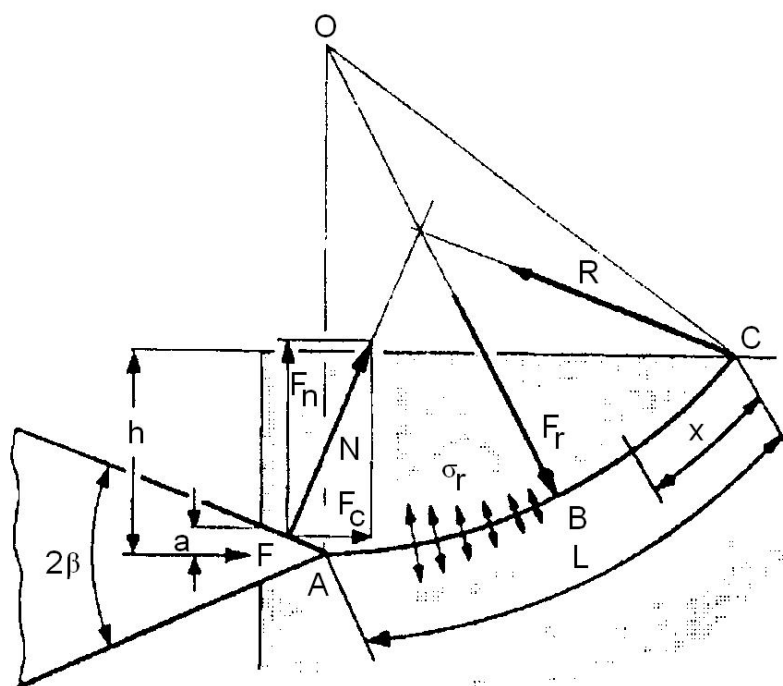
f_t - wytrzymałość materiału na ścinanie ,

L – długość łuku odspojenia,

x – odległość mierzona po łuku od punktu C,

n – wykładnik potęgowy

Evans traktuje skrawanie jako wciskanie w materiał kruchy stalowego klina o kącie ostrza 2β (Rys. 3.5). Ostrze wciskane jest prostopadle do powierzchni próbki. Wskutek wciskania ostrza, materiał skrawany pęka w punkcie A. Powstałe pęknięcie rozchodzi się po łuku CD, stycznie do dwusiecznej kąta ostrza 2β . Na podstawie obserwacji Evans stwierdził, że trajektoria szczeliny jest łukiem kołowym o promieniu OA, wyznaczanym na prostej prostopadłej do powierzchni obrabianej.



Rys. 3.5. Model skrawania ostrzem klinowym symetrycznym wg Evansa [12, 13, 29]:

2β - kąt ostrza, h - głębokość skrawania, $F = F_C$ - siła skrawania, N - siła prostopadła do powierzchni klina, F_N - siła wypadkowa, F_r - wypadkowa siła naprężeń rozrywających, R - siła reakcji, L - długość odcinka AC.

Na podstawie swoich rozważań Evans wyprowadził wzór na główną siłę skrawania F_C , przy założeniu dowolnej szerokości ostrza b i

uwzględnieniu kąta tarcia Φ materiału skrawanego o powierzchnię materiału:

$$F_c = \frac{2 f_t h b \sin(\beta + \Theta)}{1 - \sin(\beta + \Theta)}$$

gdzie: F_c - główna siła skrawania,

h - głębokość skrawania,

b - szerokość ostrza,

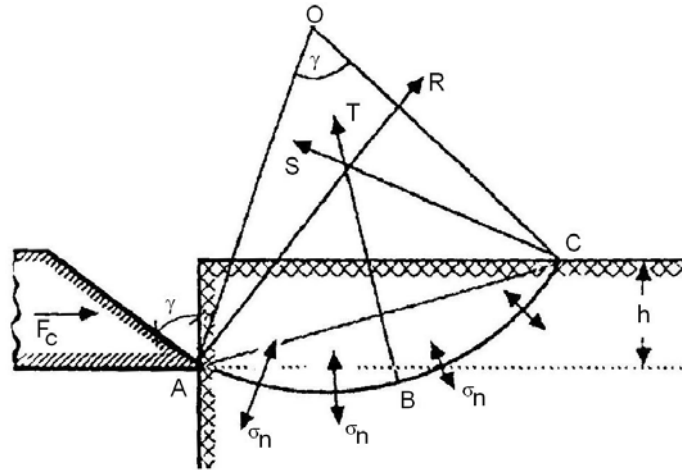
f_t - wytrzymałość materiału na ścinanie,

β - kąt połówkowy ostrza,

Θ - kąt tarcia wióra o powierzchnię natarcia,

3.2.2.2. Model Evansa dla ostrza asymetrycznego [12, 13, 28, 29]

Evans rozszerzył swoją teorię skrawania ostrzem symetrycznym na narzędzia asymetryczne używane w przemyśle górniczym. Zachował podstawowe założenia z wcześniejszego modelu. Założył, że początek pęknięcia przebiega stycznie do dwusiecznej kąta $\frac{\pi}{2} - \gamma$. Dalej pęknięcie rozchodzi się po łuku okręgu ABC o środku w punkcie O (Rys. 3.6).



Rys. 3.6. Model działania ostrza asymetrycznego wg Evansa [12, 13, 28, 29]: F_C – siła skrawania, γ – kąt natarcia ostrza, h – głębokość skrawania.

Autor wyznaczył minimalną siłę skrawania F_{cmin} (potrzebną do oddzielenia kawałka materiału po krzywej AC), uwzględniając tarcie wióra o powierzchnię ostrza:

$$F_{cmin} = \frac{2 f_t h b \sin \frac{1}{2} (\frac{\pi}{2} - \gamma + \Theta)}{1 - \sin \frac{1}{2} (\frac{\pi}{2} - \gamma + \Theta)}$$

gdzie: F_{cmin} - minimalna główna siła skrawania,
 h - głębokość skrawania,
 b - szerokość ostrza,
 f_t - wytrzymałość materiału na ścinanie,
 γ - kąt natarcia ostrza,
 Θ - kąt tarcia wióra o powierzchnię natarcia,

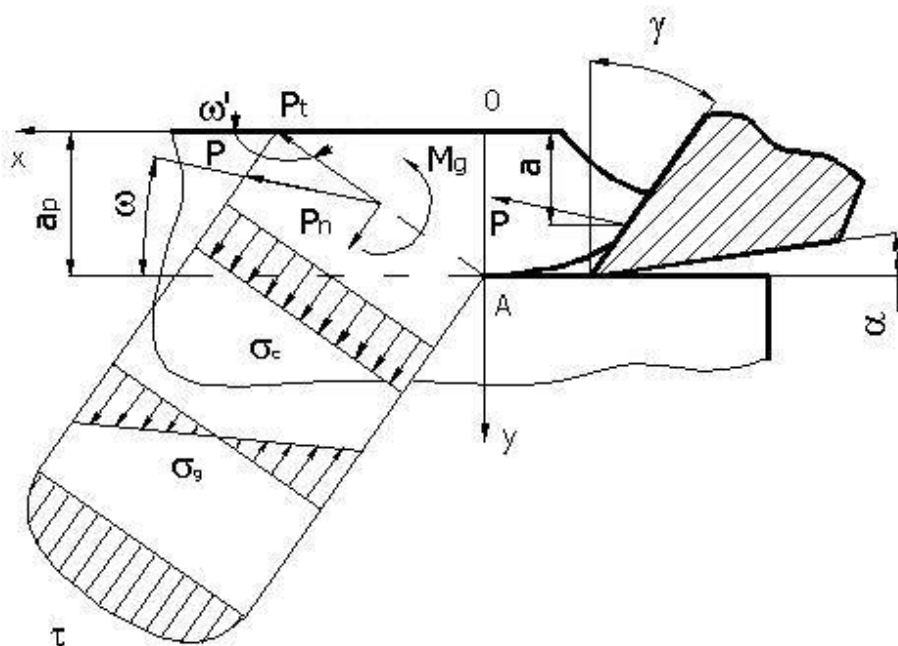
Przeprowadzone przez Evansa badania laboratoryjne dla ostrza symetrycznego na dwóch różnych typach węgla o niewyraźnej płaszczyźnie łupliwości dały dobrą zgodność uzyskanych rezultatów praktycznych z opracowaną teorią. W przypadku ostrza asymetrycznego wyniki badań były niezadowalające. Evans sugeruje, że przy

asymetrycznym ostrzu działanie naprężeń ścinających odgrywa większą rolę, niż w przypadku ostrza symetrycznego.

3.2.3. Model Zniszczyńskiego [86]

Model opracowany przez Zniszczyńskiego zakłada, że cykl skrawania materiałów kruchych obejmuje dwie fazy:

- a) wstępna - w fazie tej, w wyniku oddziaływania narzędzia na materiał obrabiany, powstają korzystne warunki dla oddzielenia warstwy materiału (początek powstawania wióra),
- b) zasadnicza - wywarte przez narzędzie naciski, powodują utratę spójności materiału w następstwie czego ma miejsce uformowanie się wióra (odspojenie większej objętości materiału).



Rys. 3.7. Model skrawania i rozkładu naprężeń wg Zniszczyńskiego [86]: P – siłą skupioną, P_t – siła oddziaływania na odspajany odłamek potrzebna dla jego ścięcia, P_n – siła oddziaływania na odspajany odłamek dla jego oderwania, M_g – moment gnący, a_p – głębokość skrawania, a – odległość działania siły P , ω – kąt oddziaływania siły P do odsłoniętej powierzchni, ω' – kąt pochylenia płaszczyzny przekroju w stosunku do powierzchni odsłoniętej, γ – kąt natarcia, α – kąt przyłożenia.

Zniszczyński w swoim modelu postawił następujące założenia dotyczące fazy zasadniczej:

- narzędzie oddziałuje na materiał obrabiany siłą skupioną P w odległości a_p -a od powierzchni obrobionej. Siła P tworzy kąt ω z powierzchnią obrobioną,
- narzędzia jest na tyle szerokie, że można pominąć naprężenia w kierunku równoległym do szerokości ostrza (prostopadle do płaszczyzny rysunku 3.7),
- stan naprężeń w obrabianym materiale przyrównuje się do stanu naprężeń w punkcie A powstających w belce wspornikowej podpartej w tym punkcie, gdzie działają siła P_n , siła P_t i moment gnący M_g ,
- oddziaływanie narzędzia prowadzi do powstania krytycznego stanu naprężenia w skale. Pęknięcie odspajające rozpoczyna się w miejscu, w którym naprężenia przekraczają dopuszczalne dla nich wartości doraźne (R_r , R_t).

Na podstawie tych założeń autor wyprowadził wzory na naprężenia w płaszczyźnie przekroju zawierającej kąt ω' z osią X (Rys. 3.7):

- naprężenia styczne

$$\tau = -\frac{2}{3} \cdot \frac{P_\tau}{a_p b} \cdot \cos(\omega + \omega') \cdot \sin \omega'$$

- naprężenia rozrywające

$$\sigma_{ro} = \frac{2P_{\sigma}}{a_p b} \cdot \left[\left(1 - 3 \cdot \frac{a}{a_p} \right) \cdot \cos \omega \cdot \sin^2 \omega' - \sin 2\omega' \cdot \sin \omega \right]$$

gdzie: P_t – siła oddziaływania na odspajany odłamek potrzebna dla jego ścięcia,

P_{σ} – siła oddziaływania na odspajany odłamek dla jego oderwania,

a_p – głębokość skrawania,

a – głębokość oddziaływania siły P ,

ω – kąt oddziaływania siły P do odsłoniętej powierzchni,

ω' – kąt pochylenia płaszczyzny przekroju w stosunku do powierzchni odsłoniętej.

Zniszczyński dochodzi do wniosku, że w drugiej fazie skrawania możliwe są dwie różne formy odspojenia przez:

a) oderwanie się wióra spowodowane przekroczeniem doraźnej wytrzymałości materiału na ścinanie przy czym:

- odspojenie wióra zachodzi wzdłuż linii prostej pod kątem ω do płaszczyzny skrawania,
- zależność na siłę skrawania P zależy od kąta oddziaływania ostrza na materiał obrabiany i zależność ta ma charakter hiperboliczny,
- siła odspajająca jest odwrotnie proporcjonalna do kwadratu sinusa kąta ścięcia,
- proces odspojenia poprzez ścięcie w dużej mierze zależy od kąta tarcia wewnętrznego Φ ,

b) oderwanie się wióra spowodowane przekroczenia doraźnej wytrzymałości materiału na rozciąganie przy czym:

- odspojenie przebiega po krzywej zbliżonej do łuku kołowego,
- kształt krzywej odspojenia zależy jedynie od kąta oddziaływania siły odspajającej ω oraz miejsca jej przyłożenia o współrzędnej a ,
- propagacja odspojenia niezależnie od miejsca zainicjowania tego odspojenia zdąża do punktu , w którym kierunek działania siły P przecina powierzchnię obrabianą materiału (oś x na Rys. 3.7),
- zależności na wartość siły odspajającej i na objętość powstałych wiórów (w funkcji kąta oddziaływania ω) mają charakter hiperboliczny,
- zmiana stosunku $(a_p - a) / a_p$ liniowo wpływa na objętość powstałych wiórów,
- proces (rozrywania) jest ciągły w czasie i wymaga stałego dostarczania energii z zewnątrz,

Zniszczyński stwierdził, że dla niektórych materiałów kruchych (niektórych skał) jest teoretycznie możliwe występowanie dwóch form odspojenia, przy czym odspojenie poprzez ściecie będzie następować dla małych wartości kąta oddziaływania ω , a poprzez rozrywanie dla dużych wartości tego kąta. Na moment przejścia z jednej formy odspojenia w drugą mają wpływ takie wielkości jak: ω , $(a_p - a)/a_p$, wytrzymałość na rozciąganie R_r oraz kąt tarcia wewnętrznego w materiale Φ .

Przejście z jednej formy odspojenia w drugą powinno pociągać za sobą znaczny przyrost objętości powstałych wiórów i spowodować spadek wartości siły odspajającej przy wzroście kąta oddziaływania ω . Istotną rozbieżność w otrzymanych na drodze laboratoryjnej i teoretycznej wynikach, Zniszczyński tłumaczy niezbyt przekonująco zmianą kąta ω oddziaływania siły wypadkowej P na odspajany wiór. W początkowej fazie odspajania kąt ω jest większy, a następnie szybko maleje do osiągnięcia wartości określonej teoretycznie - ω_t (Rys. 3.8).

Rozpatrując rozkład naprężeń w płaszczyźnie równoległej do powierzchni obrobionej Boscancy wyprowadza zależność na obliczenie głównej siły skrawania P w postaci:

$$P = \sigma_1 \cdot \frac{x \cdot a_p \cdot b}{6} \cdot [tg(\beta + \rho) + tg\rho]$$

gdzie: σ_1 - naprężenie rozciągające u wierzchołka szczeliny (punkt A),

x - stała dla danego rodzaju skały, zależna od stosunku $\frac{l}{a_p}$,

a_p - głębokość skrawania,

β - kąt ostrza,

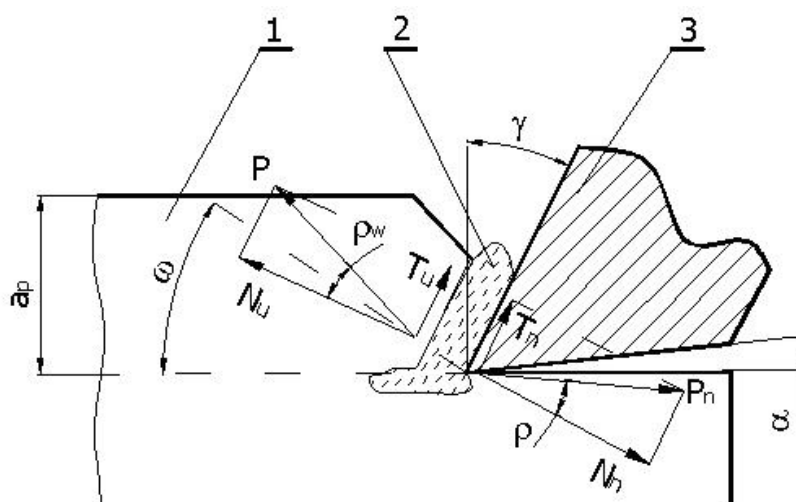
ρ - kąt tarcia skały o narzędzie,

b - szerokość ostrza,

Boscancy wskazuje, że szczelina wyprzedzająca jest charakterystyczna dla narzędzi o dużym kącie natarcia.

3.3.1. Model Bierona [28, 29, 86]

Model Bierona dotyczy procesu skrawania materiałów kruchych. Autor wysunął hipotezę, według której w procesie skrawania podstawową rolę odgrywa strefa sprasowania, stanowiąca jak gdyby pośredni element w przenoszeniu siły P z narzędzia na materiał obrabiany. Według tego modelu w procesie skrawania biorą udział tylko trzy elementy: materiał obrabiany (1), warstwa sprasowania (2) oraz narzędzie skrawające (3) (Rys. 3.10).



Rys. 3.10. Rozkład sił skrawania wg Bierona [28, 29, 86]: 1 – materiał skrawany, 2 – strefa sprasowanego materiału, 3 – narzędzie skrawające.

Bieron przyjmuje następujące założenia :

- pęknięcie zaczyna się przy wierzchołku noża i przebiega prawie prostoliniowo pod kątem ω ,
- zmiażdżona część strefy sprasowania ma wzdłuż powierzchni natarcia prawie stałą grubość,
- siły działają bardzo blisko wierzchołka noża,
- skrawanie odbywa się ostrym narzędziem.

Na tej podstawie wyprowadza wzory na wartości naprężeń niszczących stycznych i normalnych.

Naprężenia styczne w funkcji kąta ω i siły P wynoszą:

$$\tau = \frac{P \cdot \sin \omega \cdot \cos(\rho_w + \gamma - \omega) \cdot \cos \rho}{a_p \cdot b \cdot \cos \rho_w \cdot \cos(\gamma - \rho)}$$

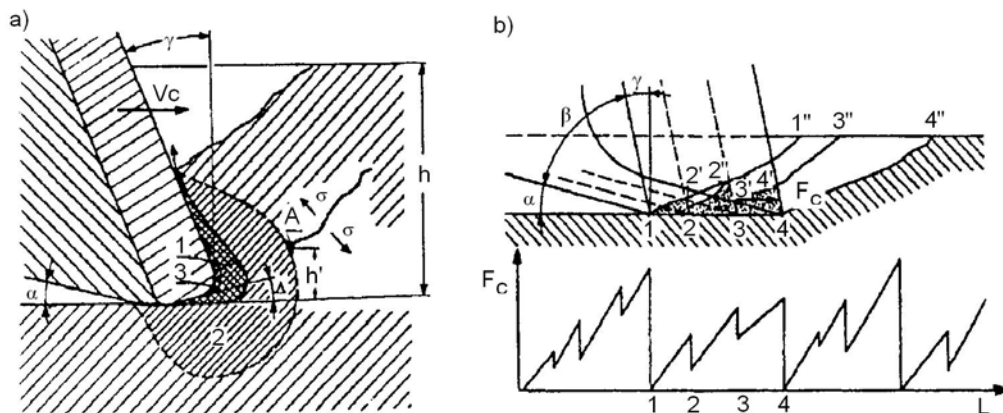
Natomiast naprężenia normalne stanowiące sumę naprężeń rozciągających σ_r i zginających σ_g przedstawia poniższa zależność:

$$\sigma = \sigma_r + \sigma_g = \frac{4 \cdot P \cdot \sin \omega \cdot \cos(\rho_w + \gamma - \omega) \cdot \cos \rho}{a_p \cdot b \cdot \cos \rho_w \cdot \cos(\gamma - \rho)}$$

gdzie: ρ_w - kąt tarcia skały o zmiążdżoną część strefy sprasowania,
 ρ - kąt tarcia zmiążdżonej części sprasowania o powierzchnię natarcia noża,
 P - siła skrawania,
 a_p - głębokość skrawania,
 b - szerokość skrawania.

Autor zakładając, że naruszenie spójności materiału następuje tylko na skutek działania naprężeń rozciągających określił kąt ω dla którego naprężenia σ osiągają maksymalną wartość przy danej sile skrawania P .

Bieron bardzo dokładnie przedstawił sposób odspajania się wióra w obecności strefy zmiążdżenia.



Rys. 3.11. a) Lokalizacja strefy miażdżenia przed ostrzem, b) wyidealizowana charakterystyka przebiegu czasowego siły skrawania typowa dla skrawania materiałów kruchych [52, 53].

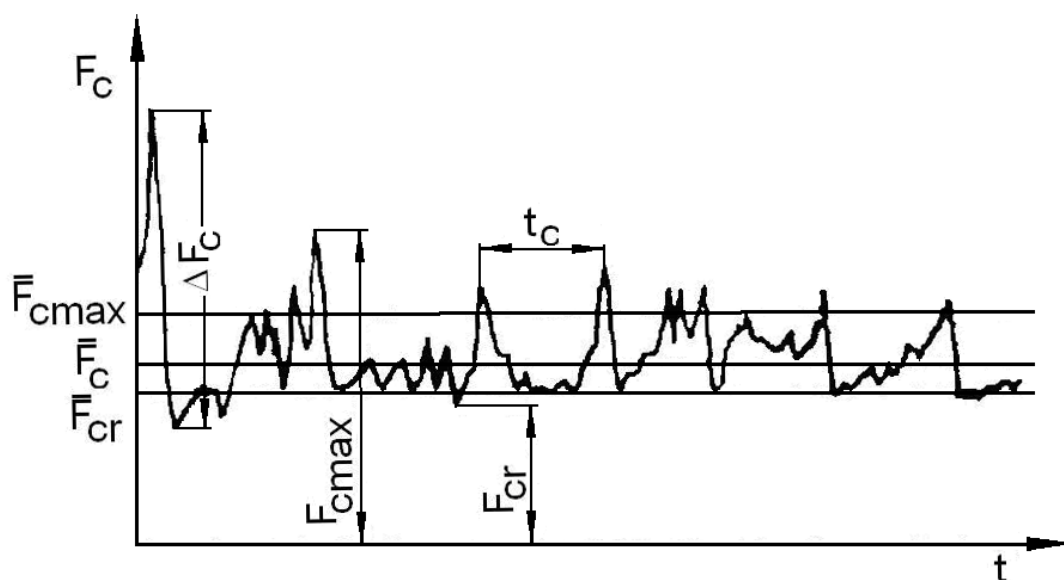
Po usunięciu większego ziarna przed nożem znajduje się skośna ścianka skały 1-2"-1". Nóż posuwając się do przodu tworzy strefę sprasowania, której część po stopniowym zmiążdżeniu ulega odrzuceniu wzdłuż powierzchni natarcia noża. W wyniku wzrostu styku noża z powierzchnią skały wzrasta siła skrawania P_s . W punkcie 2 następuje

oderwanie kolejnej cząstki skały wzdłuż linii 2''-2' co powoduje zmniejszenie powierzchni styku noża i spadek siły skrawania. Na drodze 2-3 następuje miażdżenie skały i wzrost powierzchni styku, a w końcu oderwanie odłamka 2''-1''-3'-3''. Na odcinku 3-4 powtarza się przebieg z tym, że oderwanie odłamka 4''-3''-4'-4 powoduje chwilowe obniżenie powierzchni natarcia noża co łączy się ze spadkiem prawie do zera siły skrawania (Rys. 3.11b).

3.3.2. Interpretacja J. Jonaka rzeczywistego przebiegu F_C głównej siły skrawania w czasie t

Oceną procesu skrawania materiału kruchego – węgla zajął się J. Jonak, który opisał charakterystykę rzeczywistego przebiegu siły skrawania F_C i wyróżnił w niej następujące wielkości:

F_{Cmax} – maksymalna siła skrawania, ΔF_C – użyteczna siła skrawania,
 F_{Cr} – resztkowa siła skrawania, $\overline{F_C}$ - wartość średnia siły skrawania,
 t_c – czas elementarnego cyklu skrawania.

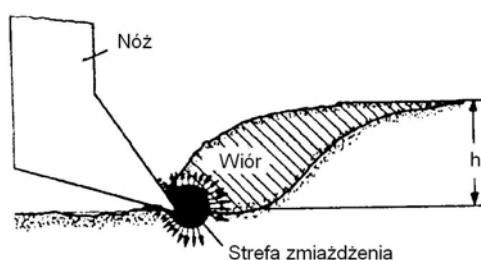


Rys. 3.12. Charakterystyka rzeczywistego przebiegu siły skrawania F_C w czasie t [28, 29], F_{Cr} – resztkowa siła skrawania, ΔF_C – użyteczna siła skrawania, $\overline{F_C}$ – średnia siła skrawania, t_c - czas elementarnego cyklu odspajania.

Znajomość wielkości: F_{Cmax} , ΔF_C , F_{Cr} , $\overline{F_C}$ umożliwia lepsze opisanie procesu, wprowadzenie do opisu procesu wielkości t_c należy traktować jako próbę ujęcia w opisie częstotliwości obserwowanych zjawisk.

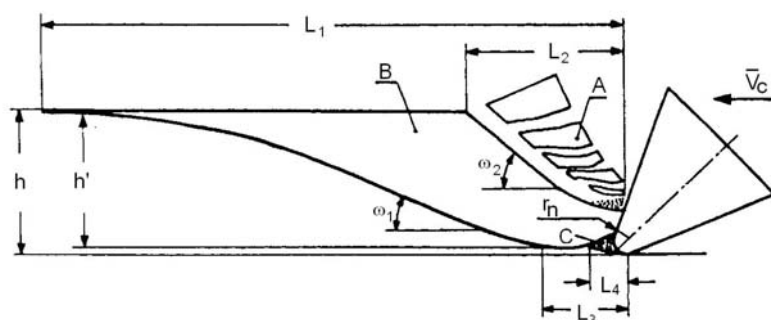
Na podstawie obserwacji Bierona, Frołowa, Opolskiego i swoich własnych J. Jonak prezentuje (Rys. 3.14) hipotetyczny opis procesu skrawania materiałów kruchych o dużej porowatości: dzieli go na dwa etapy

- etap odspajania się drobnych elementów w strefie A,
- etap odrywania głównego elementu wióra B.



Rys. 3.13. Hydrostatyczne oddziaływanie strefy zmiżdżenia, przy wnikanii ostrza w materiał [29].

Na Rys. 3.14 obrazowo ujęto przebieg pierwszego i drugiego etapu formowania wióra przy obróbce tworzyw kruchych.



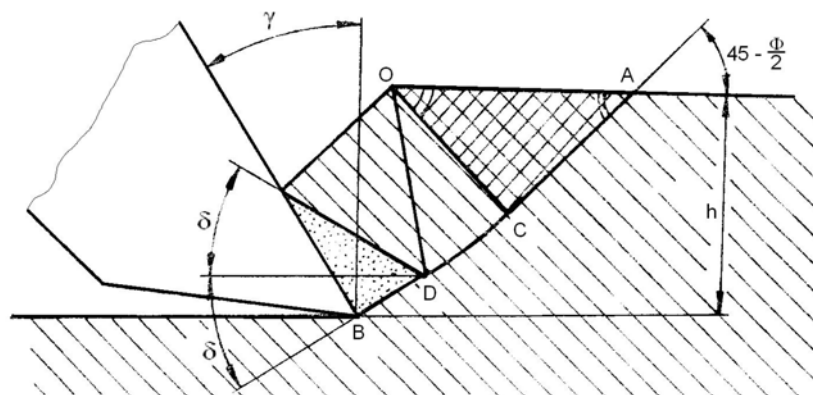
Rys. 3.14. Charakterystyczne parametry elementów wióra, A - strefa odspajania drobniejszych elementów wióra, B - główny element wióra, C- strefa zmiżdżenia materiału, l_1 - długość głównego elementu wióra, l_2 - maksymalny wymiar drobniejszych frakcji wióra, l_3 - droga skrawania, l_4 - zasięg strefy zmiżdżenia, h' - maksymalna grubość wióra, h - głębokość skrawania, r_n - promień zaokrąglenia krawędzi skrawającej, ω_1 -średni kąt odspojenia głównego elementu wióra, ω_2 - średni kąt odspajania w strefie wiórów rozdrobnionych [29].

Opis J. Jonaka poparty badaniami własnymi bardzo wartościowy z poznawczego punktu widzenia ma charakter deterministyczny. W rzeczywistości proces skrawania materiałów kruchych jest bardzo losowy (opis procesu – zał. 3) a przebieg i sekwencje (cykle odspajania) procesu ulegają przypadkowym zmianom.

3.3.3. Model Frołowa [61, 62, 86]

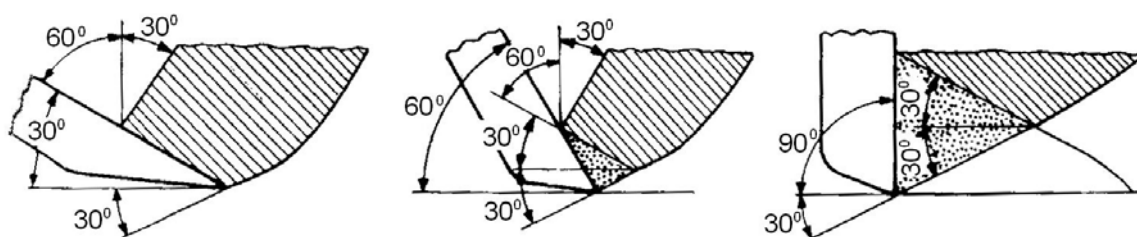
Model Frołowa jest oparty na teorii sypkich ciał spoistych i zakłada ścinanie z poślizgiem w całej płaszczyźnie odspojenia przypisując dużą rolę zastoinie i strefie sprasowania.

Frołow zakłada, że zmiażdżony przed ostrzem materiał obrabiany przyjmuje kształt klina, który podstawą opiera się o płaszczyznę natarcia ostrza, a ostrzem skierowany jest w kierunku ruchu noża. Klin ten ściśle związany jest kątem natarcia ostrza γ .



Rys. 3.15. Model skrawania wg Frołowa [86]

Frołow podkreśla, że duży wpływ na granulację urobku ma kąt natarcia γ ostrza - wraz ze zwiększaniem się tego kąta wzrastają rozmiary pasywnej strefy ADO (Rankinea) i powstają duże ziarna urobku.



Rys. 3.16. Strefa zmiżdżenia przed ostrzem noża stożkowego [61, 62]

3.4. Krytyczna ocena teoretycznych modeli skrawania materiałów kruchych – Teza pracy

Wszystkie omawiane modele traktują materiał obrabiany jako izotropowe continuum, którego własności wytrzymałościowe są niezmiennie, bądź zmieniające się według funkcji ciągłej określającej jego zachowanie wraz ze zmianą nacisków na powierzchnie odspajania. W rzeczywistości szereg materiałów kruchych (skały, materiały ceramiczne, konglomeraty węglowe, itp.) jest anizotropowych o własnościach wytrzymałościowych zmieniających się w sposób losowy uzależnionych od lokalnej koncentracji defektów budowy jak pory, uwarstwienia, mikropęknięcia, wtrącenia, itp. Wpływ nieregularności budowy jest tak silny, że uzyskane rezultaty dla pozornie identycznych materiałów mogą być statystycznie nieporównywalne.

Żaden z omawianych modeli nie analizuje ponadto efektów energetycznych towarzyszących procesowi skrawania.

Różnice między rezultatami teoretycznymi a rzeczywistymi wynikają ponadto z samych założeń modeli:

- modele pierwszej grupy hipotez (**Merchanta, Nishimatsu, Kasjana**) nawiązujące do skrawania materiałów plastycznych (stal) uwzględniają tylko naprężenia ścinające, a w przypadku skrawania materiałów kruchych nie tylko te naprężenia biorą udział w odspajaniu się wióra,

- w modelach z grupy drugiej (**Evansa, Zniszyńskiego, Bocsanczego**) zakłada się określony, krzywoliniowy kształt pęknięcia pod wpływem naprężeń ścinających, lub rozciągających, a obserwowane w rzeczywistości linie pęknięcia dla materiałów kruchych posiadają inny charakter,
- w modelach z trzeciej grupy (**Bierona, Frołowa, Opolskiego**) wprowadza się jednorodną strefę sprasowania między narzędziem a materiałem obrabianym a w rzeczywistych warunkach strefa sprasowania (zmiażdżona) jest warstwą o zmiennej grubości rozłożonej wzdłuż powierzchni natarcia narzędzia.

Analiza porównawcza wyników doświadczalnych i teoretycznych przy wyznaczeniu całkowitych sił skrawania działających na organ kombajnu prowadzona przez **K. Krauzego** [39] potwierdziła, że zastosowanie metod analitycznych (Evansa, Bierona, Nishimatsu, Frołowa) może posłużyć tylko do wstępnych, przybliżonych obliczeń inżynierskich.

Reasumując, konieczna jest rewizja opisu skrawania istniejących tworzyw kruchych odniesiona do rzeczywistego mechanizmu odspajania a uwzględniająca losowy charakter procesu.

Podstawowe obliczenia jak i dobór warunków procesu skrawania kruchych tworzyw w tym tworzywa węglowego WPW-65 powinny być oparte o charakterystyki siłowe i energetyczne rzeczywistego procesu skrawania uwzględniające losowe własności materiału obrabianego.

W oparciu o krytyczną analizę rezultatów dotychczasowych badań oraz o prowadzone badania własne było możliwe sformułowanie następującej tezy pracy:

Na podstawie analizy rzeczywistych charakterystyk procesu skrawania tworzyw węglowych WPW, możliwy jest taki dobór warunków obróbki, który będzie gwarantował spełnienie wymagań techniczno-ekonomicznych i ekologicznych procesu.

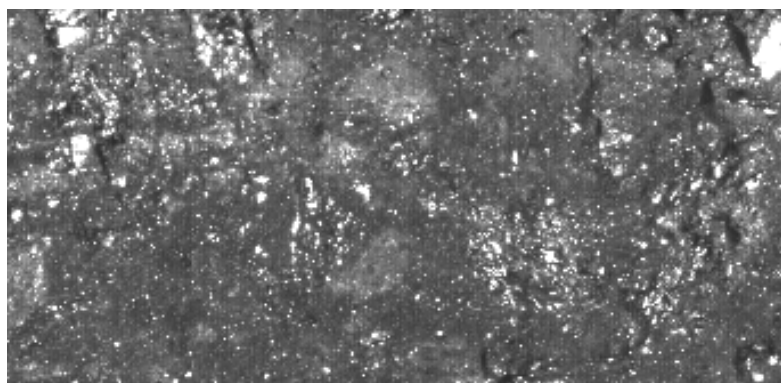
4. Badania laboratoryjne skrawalności tworzywa węglowego WPW-65 - metodyka

4.1. Cel badań

Celem badań było określenie wpływu: parametrów geometrycznych warstwy skrawanej wyrażonych za pomocą wskaźnika przekroju K_A , kąta natarcia ostrza narzędzia γ oraz sposobu skrawania (swobodny i nieswobodny) na powstawanie wióra, jego granulację i charakterystyki siłowo – energetyczne procesu.

4.2. Przedmiot badań

Przedmiotem badań było tworzywo węglowe WPW-65*. Tworzywo to jest sprasowanym, spiekany konglomeratem twardych ziaren antracytowych**, koksów: naftowego, pakowego normalnego i pakowego igłowego ze składnikami spoiwa. Spoiwo składa się z paku węglowego, paku naftowego, smoły węglowej i oleju antracenowego (Rys. 4.1).



Rys. 4.1. Powierzchnia tworzywa z widocznymi ziarnami antracytu i łomu węglowego.

* Wybór tworzywa węglowego WPW-65 był podyktowany faktem stosowania przez zakłady w Raciborzu tego tworzywa jako podstawowego (około 60% całej produkcji) przy wykonywaniu obudów wielkich pieców.

** antracyt jest twardą odmianą węgla kamiennego zawierającą co najmniej 92% czystego C o bardzo małej zawartości części lotnych i dużym cieple spalania.

Zawartość podstawowych składników używanych do produkcji tworzywa WPW – 65 podano w Tab. 4.1.

Tab. 4.1. Zawartość procentowa podstawowych składników używanych do produkcji tworzywa WPW-65 [68, 69, 70].

Nr	Podstawowe składniki użyte do produkcji tworzywa WPW -65	Zawartość procentowa
1	antracyt	48,5%
2	łomu węglowy	38,5%
3	pył węglowy	4,3%
4	lepiszcze (mieszanina smoły i paku węglowego)	8,7%

Tworzywo to charakteryzują następujące własności fizyko-mechaniczne podane w Tab. 4.2.

Tab. 4.2. Własności fizyko-mechaniczne badanego tworzywa WPW-65 [68, 69, 70].

Własności	Tworzywo węglowe WPW-65
Gęstość rzeczywista [g/cm ³]	1,9
Wytrzymałość na ściskanie [MPa]	30
Wytrzymałość na zginanie [MPa]	8
Rozszerzalność cieplna w 20 ⁰ C [μm/Km]	4
Przewodnictwo cieplne w 30 ⁰ C [W/Km]	9

Lepiszczem są surowce ciekłe używane jako materiały spajające, wiążące surowce stałe oraz syciwa, obniżające porowatość i podwyższające wytrzymałość mechaniczną nasycanych wyrobów. Zaliczamy do nich:

- pak węglowy (pak z węgla kamiennego)
- pak naftowy
- smoła węglowa (smoła z węgla kamiennego)
- olej antracenowy (środek obniżający punkt mięknięcia paku)

Proces produkcyjny tworzywa WPW-65 polega na wstępnym kruszeniu części jego składników w celu uzyskania rozdrobnienia

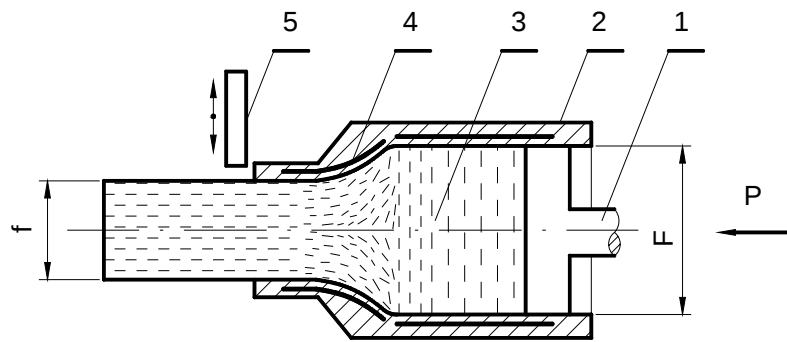
materiału o maksymalnym wymiarze ziaren 30-40 mm, mieleniu pozostałych surowców i ich termopreparacji. Wszystkie składniki podlegają dokładnemu mieszaniu, a otrzymana mieszanina poddawana jest kalcynacji mającej na celu zagęszczanie materiału. W procesie kalcynacji ma miejsce oddestylowanie części lotnych, częściowe odgazowanie siarki, obniżenie porowatości i oporu elektrycznego, zwiększenie wytrzymałości mechanicznej i zmniejszenie reaktywności chemicznej. Wyprażony materiał jest kruszony, mielony i przesiewany w celu nadania mu założonych wymiarów użytecznych w dalszym procesie produkcyjnym.

Kolejna operacja – dozowanie polega na połączeniu ziaren zmielonego materiału z lepiszczem o odpowiedniej recepturze gwarantującej uzyskanie określonego rodzaju wyrobu.

Otrzymaną porcję poddaje się mieszaniu przez określony czas i w określonej temperaturze zależnej od rodzaju lepiszcza. Poszczególne ziarna pokrywają się cienką warstwą roztopionego spoiwa. Tak otrzymaną masę zagęszcza się podczas wstępnego ugniatania. Kolejną operacją procesu wytwarzania WPW-65 jest prasowanie, w którym masa materiału otrzymuje wymagane kształty. Równocześnie postępuje proces zagęszczania.

Istnieją różne sposoby formowania wyrobów (bloków) z tworzywa WPW -65. Do najbardziej znanych należą:

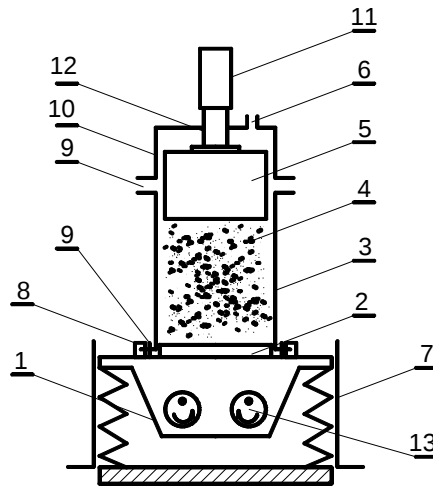
a) formowanie przelotowe - wyciskanie masy z charakterystyczną teksturą otrzymanego materiału. W pobliżu wylotu, warstwy materiału ulegają odkształceniu tak, że w strumieniu uformowanej już masy powstaje tekstura charakteryzująca się płaskimi wydłużonymi ziarnami równoległymi do kierunku wypływu (Rys. 4.2.),



Rys. 4.2. Schemat zmiany orientacji ziaren wypełniacza podczas prasowania przelotowego [68]; 1 – głowica tłoka prasującego, 2 – cylinder prasy, 3 – masa formowana, 4 – elementy grzewcze cylindra i części wylotowej, 5 – element zamykający wylot.

b) formowanie blokowe – masę materiału umieszcza się i prasuje w zamkniętej matrycy, a ciśnienie prasowania zależne jest od wymaganych własności wyrobu wyjściowego. W wyniku nacisku stempla z siłą P masa zagęszcza się, a poszczególne ziarna masy ulegają deformacji,

c) formowanie wibracyjne, które polega na dynamicznym zagęszczaniu i formowaniu mas plastycznych. Wyrób jest zagęszczany i przyjmuje kształt formy. Ściany boczne formy wibrując wprawiają cząstki masy w ruch drgający (Rys. 4.3). Zachowanie się masy przypomina zachowanie cieczy o dużej gęstości. Najwyższy stopień zagęszczenia otrzymuje się gdy pomiędzy płytą dolną, formą i płytą dociskową występują przemieszczenia względne.

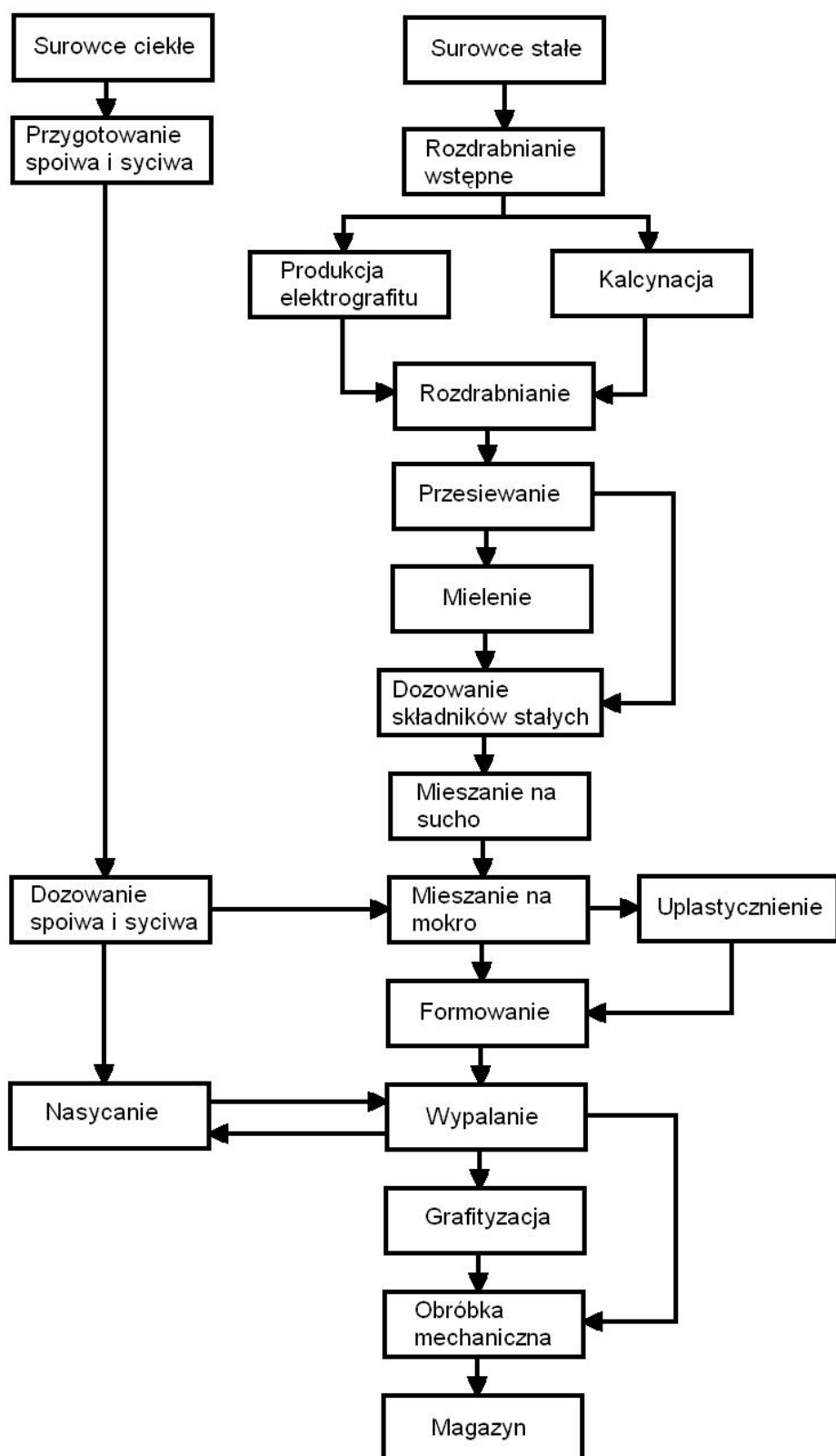


Rys. 4.3. Schemat konstrukcji formy wibracyjnej [68]; 1 – stół wibracyjny, 2 – dolna płyta, 3 – forma, 4 – formowana masa, 5 – górna płyta dociskowa, 6 – króciec do pompy próżniowej, 7 – prowadnica, 8 – zaciski mocujące formę, 9 – uszczelnienia podstawy formierki, 10 – okap próżniowy, 11 – cylinder, 12 – tłok, 13 – wał mimośrodowy.

Ostateczną operacją jakiej poddawane jest tworzywo WPW -65 w procesie przygotowania półfabrykatu jest wypalanie wyprasek w temperaturach do 1300°C , w trakcie którego zachodzi skoksowanie spoiwa łączącego ziarna wypełniacza. Powstały ze spoiwa koks tworzy wytrzymałą siatkę spajającą cząstki wypełniacza. Przebieg i wyniki spiekania wyrobów zależą od reżimu technologicznego wypalania, a głównie od szybkości wzrostu temperatury i jej wartości końcowej.

Tak przygotowane półfabrykaty przechodzą do ostatniego etapu produkcji jakim jest obróbka mechaniczna. Na tym etapie wyrobom z tworzywa WPW nadawany jest ostateczny kształt, wymiary oraz stan powierzchni obrabianych.

Schemat ideowy procesu produkcyjnego dla tworzyw WPW-65 podano na Rys. 4.4.



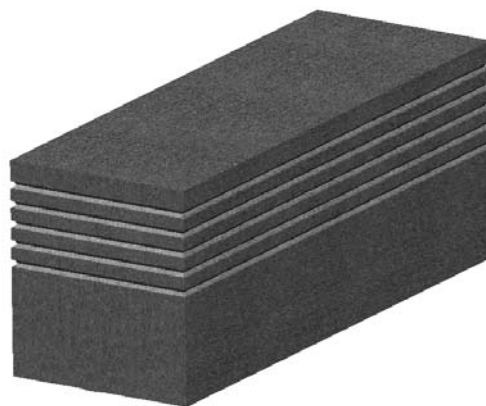
Rys. 4.4. Schemat ideowy produkcji wyrobów węglowych WPW [68, 69, 70].

Typowy wygląd uformowanych bloków z tworzywa WPW-65 przedstawiono na rysunkach 4.5 i 4.6.

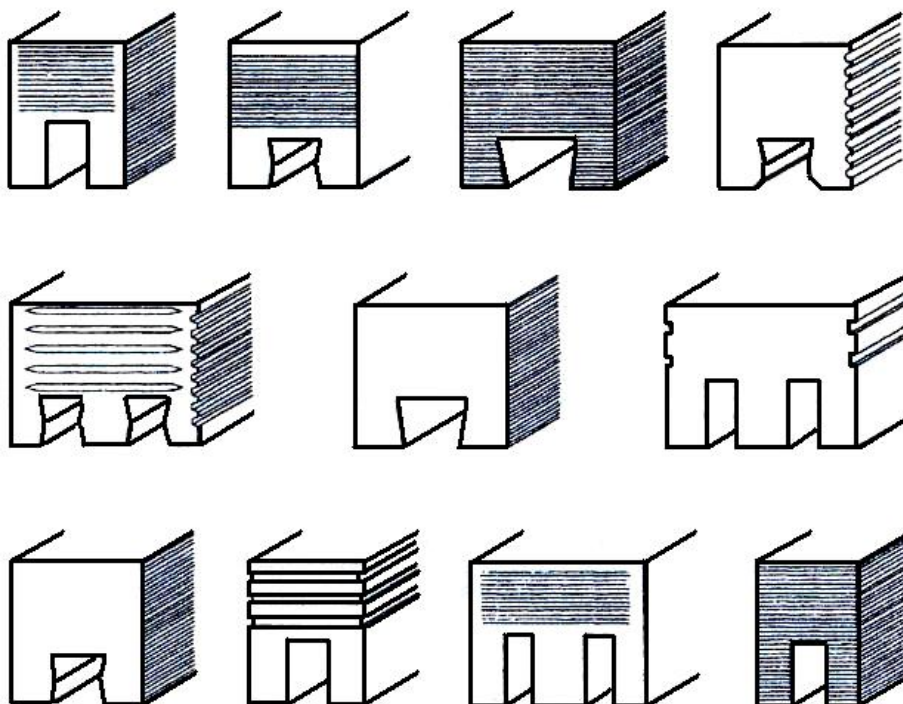
a)



b)



Rys. 4.5. Wygląd bloku węglowego WPW-65: a) przed obróbką, b) po obróbce.



Rys. 4.6. Typowe kształty bloków węglowych (katodowych) [68]. Duże rowki równoległe do osi podłużnej bloku są rowkami prądowymi a cienkie rowki wzdłuż powierzchni bocznych służą do uszczelniania bloku.

4.3. Metodyka badań

4.3.1. Uwagi ogólne

Udowodnienie postawionej w poprzednim rozdziale tezy pracy narzucało tok postępowania przy planowaniu badań prowadzonych we współpracy z zakładami SGL Carbon Polska S.A w Raciborzu. Należało poznać własności tworzywa WPW, jego proces produkcyjny i warunki przemysłowe jego obróbki. Aby uniezależnić się od zmiennych własności materiału obrabianego spowodowanych czynnikami zewnętrznymi wpływającymi na końcowe własności półfabrykatu, należało pobrać wystarczająco dużą serię próbek pochodzących z tego samego procesu synteryzacji. Z zakładów SGL Carbon Polska S.A otrzymano próbki tworzywa węglowego wycinane z jednego bloku katodowego oraz uzyskano zezwolenie na prowadzenie badań w warunkach przemysłowych.

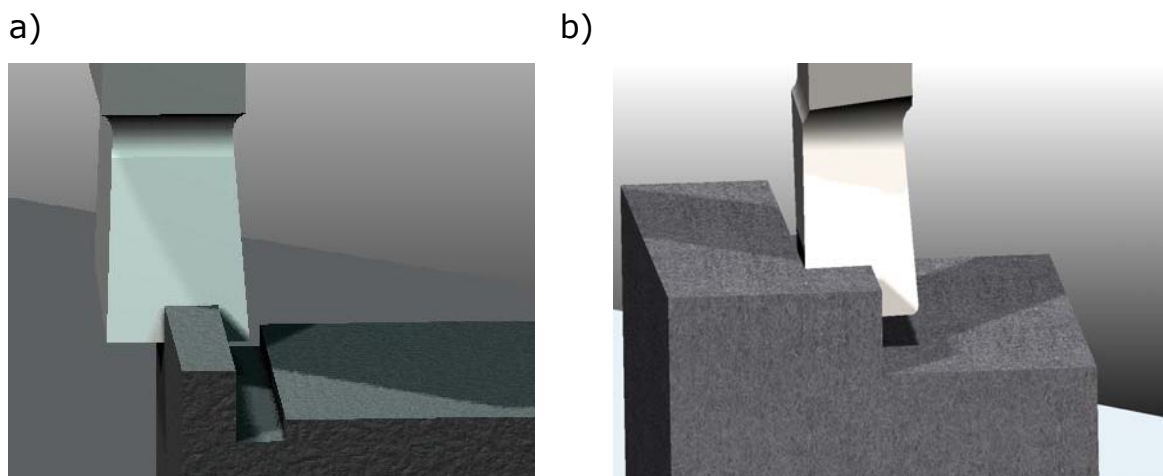
Poznanie wymagań technicznych stawianych przez zakłady procesowi obróbki tworzyw węglowych dało bezpośrednio podstawę do wyboru wskaźników procesu, a pośrednio wskazania charakterystyk procesu, których zapis i późniejsza analiza pozwoliły na optymalizację wybranych parametrów obróbki. W trakcie prób rejestrowano główną siłę skrawania działającą na ostrze skrawające i odpowiadające tej sile przemieszczenia narzędzia. Fotografowano szybkoklatkową kamerą cyfrową przebieg tworzenia się wióra podczas obróbki. Zeskrawany materiał klasyfikowano na sitach celem wyznaczenia jego granulacji. Zarejestrowane przebiegi sił i przemieszczeń oraz cyfrowy obraz przebiegu skrawania poddawano dalszej obróbce.

Ze względu na konieczność magazynowania dużej ilości danych niezbędne było zastosowanie w torze pomiarowym komputera o dużej pamięci i wysokiej szybkości dokonywania operacji.

Losowy charakter procesu narzucił wymagania odnośnie co do długości badanych próbek. Pozostałe wymiary próbki : jej szerokość i

wysokość miały zagwarantować dużą sztywność przedmiotu obrabianego.

Ilość stosowanych próbek wynikała z planu doświadczeń uwzględniającego zmienny sposób skrawania (swobodne* i nieswobodne - Rys. 4.7), zmienny kąt natarcia ostrza $\gamma = -20, -10, 0, 15, 25^\circ$ i zmienną geometrię warstwy skrawanej wyrażoną wskaźnikiem przekroju warstwy skrawanej $K_A = b/a$, wynoszącym odpowiednio 1,25; 2,83; 5,0 i 7,81 przy zachowanym stałym przekroju warstwy skrawanej $A_c = 80 \text{ mm}^2$. Próby powtarzano pięciokrotnie.



Rys. 4.7. Skrawanie swobodne (a) i nieswobodne (b).

Podstawowymi wskaźnikami procesu były: udział drobnoziarnistej frakcji o wymiarze charakterystycznym (szerokości ziarna) nie większym od 1 mm w powstających podczas obróbki wiórach** (w

* Badania w warunkach skrawania swobodnego nie posiadają znaczenia przemysłowego, tym nie mniej próby przy tym sposobie obróbki pozwalają na dokładną obserwację mechanizmu tworzenia wióra, weryfikację i ocenę przydatności hipotez dotyczących skrawania materiałów kruchych a szczególności tworzywa węglowego WPW -65.

** Około 25 ÷ 30% objętości bloków w stanie surowym (z drogiego tworzywa WPW) jest zamieniana w wiór (odpad) w procesie ich obróbki i dlatego odzysk dla procesu produkcyjnego jak największej części tego odpadu jest priorytetem dla Zakładów SGL Carbon Polska S.A..

postaci ziaren) oraz udział energii fragmentacji* w całkowitej energii wydatkowanej na obróbkę.

Uzyskane wyniki badań po analizie stanowiły podstawę do udowodnienia tezy i podania ostatecznych wniosków końcowych.

4.3.2. Stanowisko badawcze

Zasadniczą częścią stanowiska badawczego była frezarka pionowa FSS 400-V firmy WMW o dobrej sztywności i mocy silnika głównego $N_s = 13,5$ kW, dostatecznej dla prowadzenia prób z dużymi przekrojami warstwy skrawanej typowymi dla automatycznej linii do obróbki bloków węglowych LBK pracującej w Raciborzu (przekrój warstwy skrawanej 80 mm^2). Układ kinematyczny frezarki zapewniał niskie prędkości skrawania** pozwalające na dobrą obserwację i rejestrację przebiegu siły w czasie (Rys. 4.8). Miało to podstawowe znaczenie dla poznania charakterystycznego, nie badanego dotychczas mechanizmu oddzielania wióra, obrabianego tworzywa WPW-65.

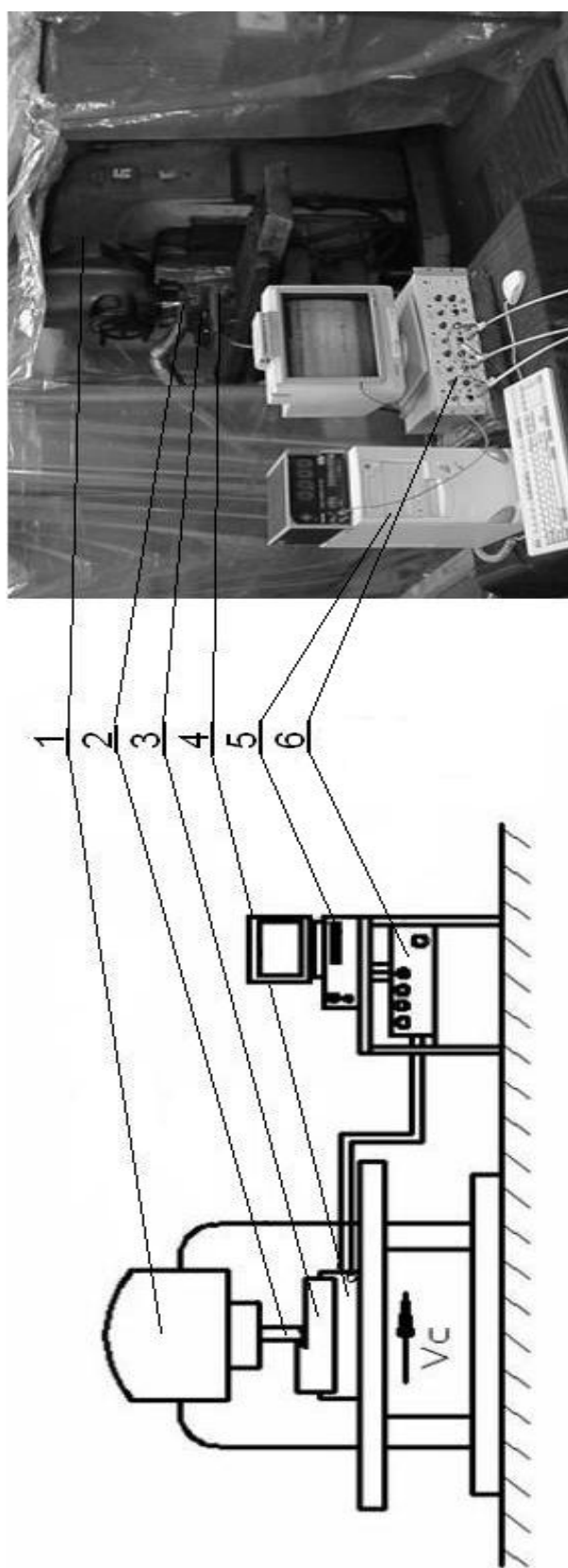
Przystosowanie frezarki do celów badawczych polegało na zamocowaniu na niej specjalnego narzędzia – imaka nożowego w specjalnej głowicy nożowej (Rys. 4.9) sztywno związanej z wrzeciennikiem obrabiarki (Rys. 4.10).

Ruch główny wykonywał przedmiot obrabiany ustawiany na stole frezarki. Kinematycznie proces skrawania odpowiadał struganiu

* Z badań nad rozdrabnianiem kruchych materiałów wynika, że wzrost energii fragmentacji na jednostkę objętości przetwarzanego materiału oznacza utworzenie większej powierzchni swobodnej urobku i zmniejszenie jego granulacji [73].

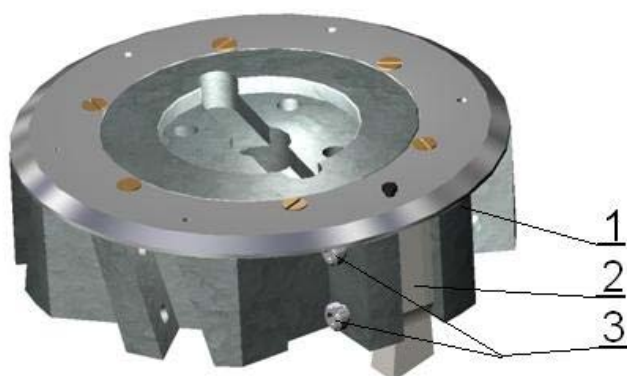
** Podczas obróbki materiałów dających kruchy wiór odpryskowy typowy dla tworzywa WPW nie obserwuje się istotnych zmian wartości siły F_c ze zmianą prędkości skrawania a specjalistyczne pozycje bibliograficzne potwierdzają to spostrzeżenia [26, 49]. Było więc możliwe stworzenie korzystnych dla obserwacji warunków obróbki przez prowadzenie procesu z prędkościami skrawania rzędu kilkuset milimetrów na minutę.

wzdłużnemu ze stałą prędkością skrawania z przedziału 200 do 800 mm/min.



Rys.4.8. Stanowisko badawcze stosowane we wstępnym etapie badań a) schemat ideowy, b) widok ogólny, 1- frezarka FSS 400-V, 2 - narzędzie skrawające, 3 - próbka skrawanego materiału, 4 - siłomierz piezoelektryczny, 5 - komputer pomiarowy, 6 - wzmacniacz ładunków.

Na przesuwным stole frezarki ustawiono i zamocowano trójskładowy siłomierz piezoelektryczny typu 9265 B firmy Kistler, wraz z imadłem maszynowym służącym do mocowania skrawanych próbek z tworzywa WPW-65. Sygnały pomiarowe z siłomierza poprzez wzmacniacz ładunku typu CL 111 firmy ZEP oraz kartę przetwornika A/C typu LC-02-0812 firmy Ambex były przesyłane i rejestrowane na twardym dysku komputera IBM PC przy użyciu programu SAAS*.



Rys. 4.9. Widok specjalnej konstrukcji głowicy nożowej stosowanej przy badaniach mechanizmu skrawania tworzywa WPW-65: 1. korpus głowicy, 2. narzędzie skrawające, 3. śruby mocujące narzędzie.



Rys. 4.10. Sposób blokowania ruchu obrotowego głowicy nożowej na frezarce:
1- jarko blokujące, 2 – głowica nożowa, 3 – narzędzie skrawające,
4 – próbka skrawanego tworzywa zamocowana w imadle maszynowym.

* SAAS – System Akwizycji i Analizy Sygnału firmy CompArt. Program ten składa się z dwóch oddzielnych pakietów, tj. pomiarowego z opcją archiwizacji sygnałów w postaci binarnej i tekstowej oraz analizy z rozbudowaną opcją obliczeń statystycznych i graficznej wizualizacji wyników pomiarów w postaci wykresów.

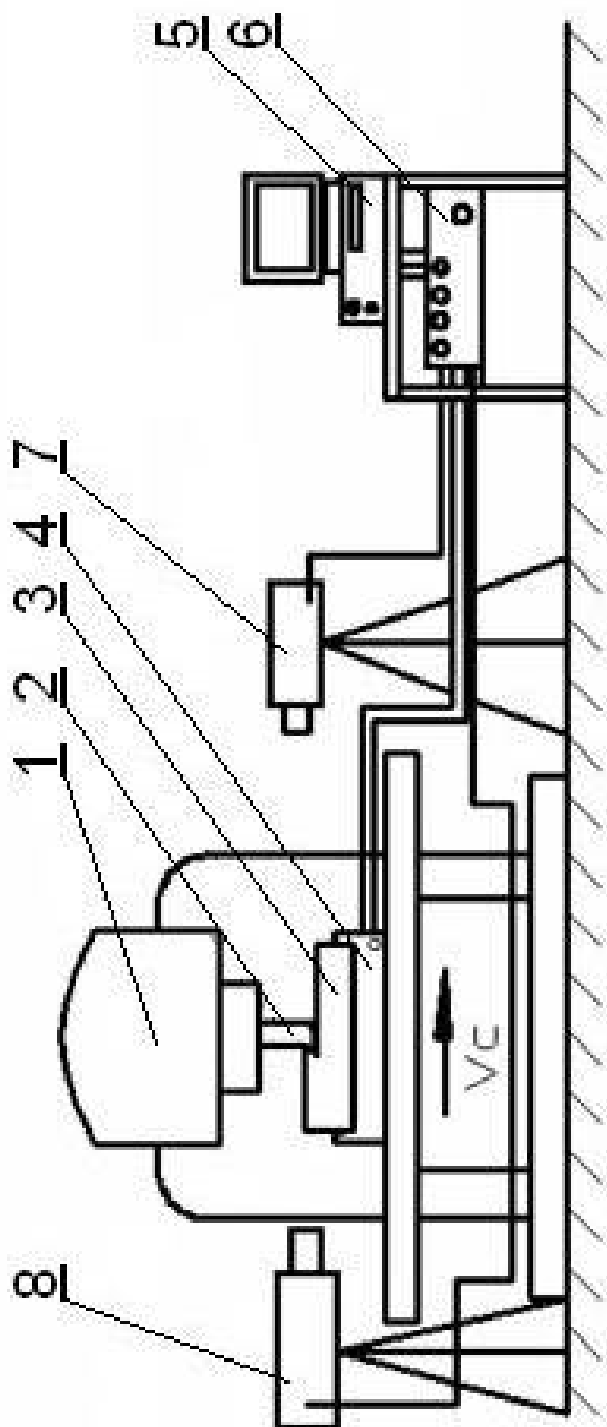
Rejestrowano przebieg głównej składowej siły skrawania F_c a obserwację procesu prowadzono wizualnie. Oceniano również stan geometryczny powierzchni obrobionej celem ewentualnej korekty geometrii narzędzia skrawającego.

Mimo niewątpliwych zalet stanowiska, które dobrze spełniało swoją funkcję przy wstępnych badaniach procesu skrawania tworzyw WPW-65, wymagało ono rozbudowy. Rozbudowa ta miała na celu umożliwienie cyfrowej: obserwacji i rejestracji mechanizmu powstawania wióra, równoległego zapisu siły skrawania i przemieszczenia narzędzia.

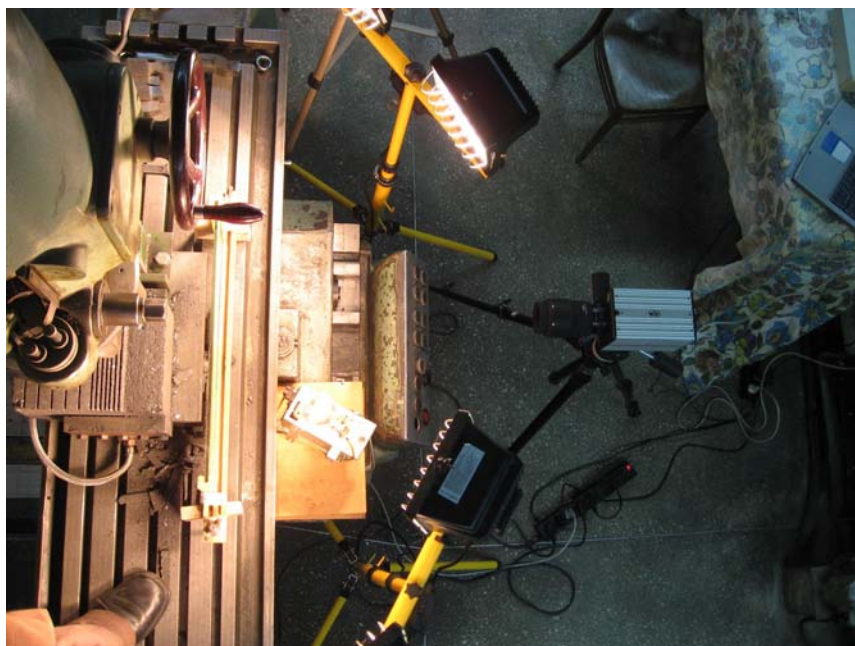
4.3.3. Zmodernizowane stanowisko badawcze

Modernizacja stanowiska badawczego polegała na uzupełnieniu jego wyposażenia o dodatkowe przyrządy pomiarowe (Rys. 4. 11). I tak celem rejestracji wizualnej mechanizmu skrawania* wprowadzono szybkoklatkową (do 10000 k/s) kamerę cyfrową X - Stream XS-3 firmy IDT. Przemieszczenia narzędzia mierzono wibrometrem laserowym typu 501 firmy Polytec. Wibrometr podłączony był do kontrolera typu 5000 tej samej firmy. Układ pomiarowy zezwalał na synchronizację zapisu obrazu mechanizmu powstawania wióra z rejestracją głównej składowej siły skrawania i przemieszczenia ostrza narzędzia skrawającego pod działaniem tej siły. Szczegółową charakterystykę urządzeń wchodzących w skład stanowisk badawczych na pierwszym i drugim etapie badań podano w załączniku 1 niniejszej pracy.

* Wprowadzenie obserwacji obrazu mechanizmu skrawania jak wykazały badania **Gawlika i Zębali** pozwala na budowę modeli procesu dobrze przystających do rzeczywistości obróbki skrawaniem [18, 84].



Rys. 4.11. Stanowisko badawcze na podstawowym etapie badań, 1- frezarka pionowa FSS 400 – V, 2 – narzędzie skrawające, 3 – próbka skrawanego materiału, 4 – siłomierz piezoelektryczny, 5 – komputer pomiarowy, 6 – wzmacniacz ładunków, 7 - laserowy wibrometr, 8 – kamera szybkobieżna.

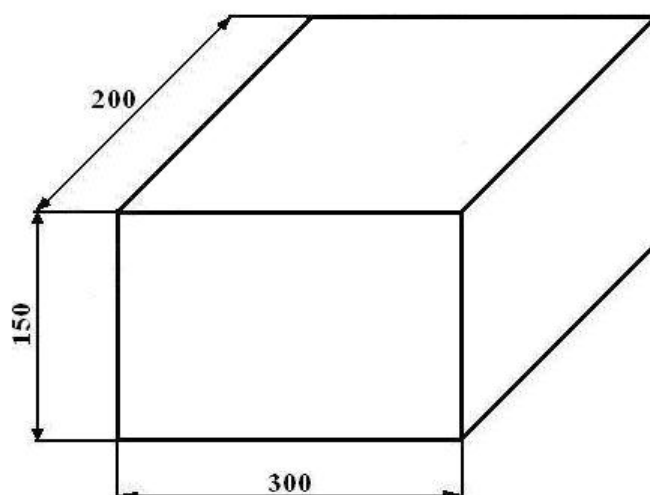


Rys. 4.12. Widok z góry stanowiska badawczego po modernizacji.

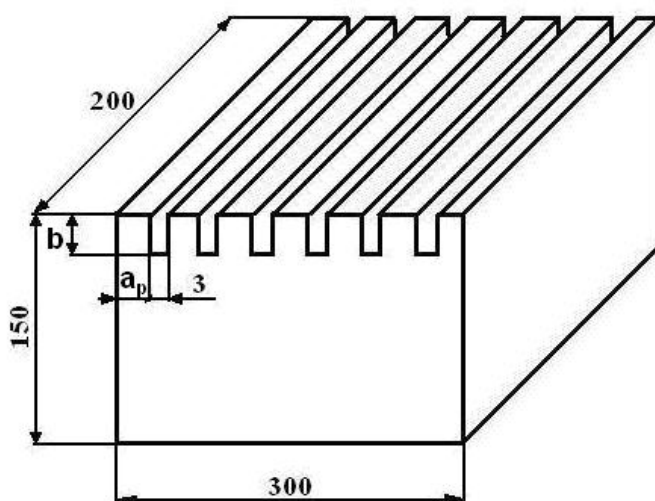
4.3.4. Przygotowanie próbek

Przygotowanie próbek do badań było uzależnione od sposobu prowadzenia procesu skrawania (skrawanie swobodne – Rys. 4.14 i nieswobodne – Rys. 4.13).

Były one wycinane ściernicą diamentową z jednego bloku katodowego. Wykonano badania uzupełniające, które wykazały, że w ramach jednego bloku katodowego nie występowały istotne różnice własności mechanicznych próbek, niezależnie od kierunku ich wycinania.



Rys. 4.13. Próbką do badań – skrawanie nieswobodne (wymiary w mm).



Nr	b[mm]	a _p [mm]
1	10	8
2	15	5,3
3	20	4
4	25	3,2

Rys. 4.14. Próbką do badań – skrawanie swobodne (wymiary w mm).

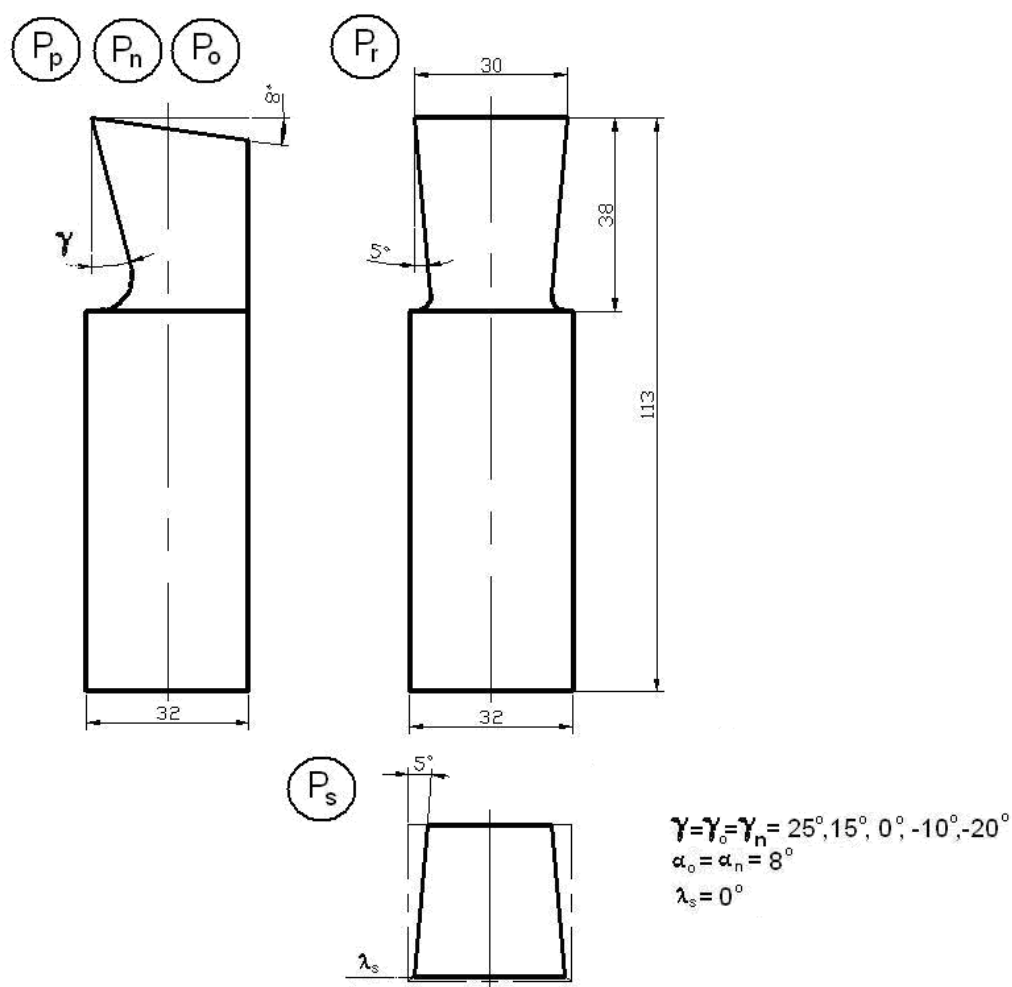
Wymiary gabarytowe próbek zostały tak dobrane, aby zagwarantować dobrą reprezentatywność statystyczną rejestrowanym przebiegom sił skrawania i przemieszczeń narzędzia, a także zapewnić ich dobrą sztywność postaciową.

Na próbkach do skrawania swobodnego nacinano rowki o wymiarach według tabeli z Rys. 4.14, odpowiadających zmiennym parametrom geometrycznym warstwy skrawanej. Wymiary parametrów

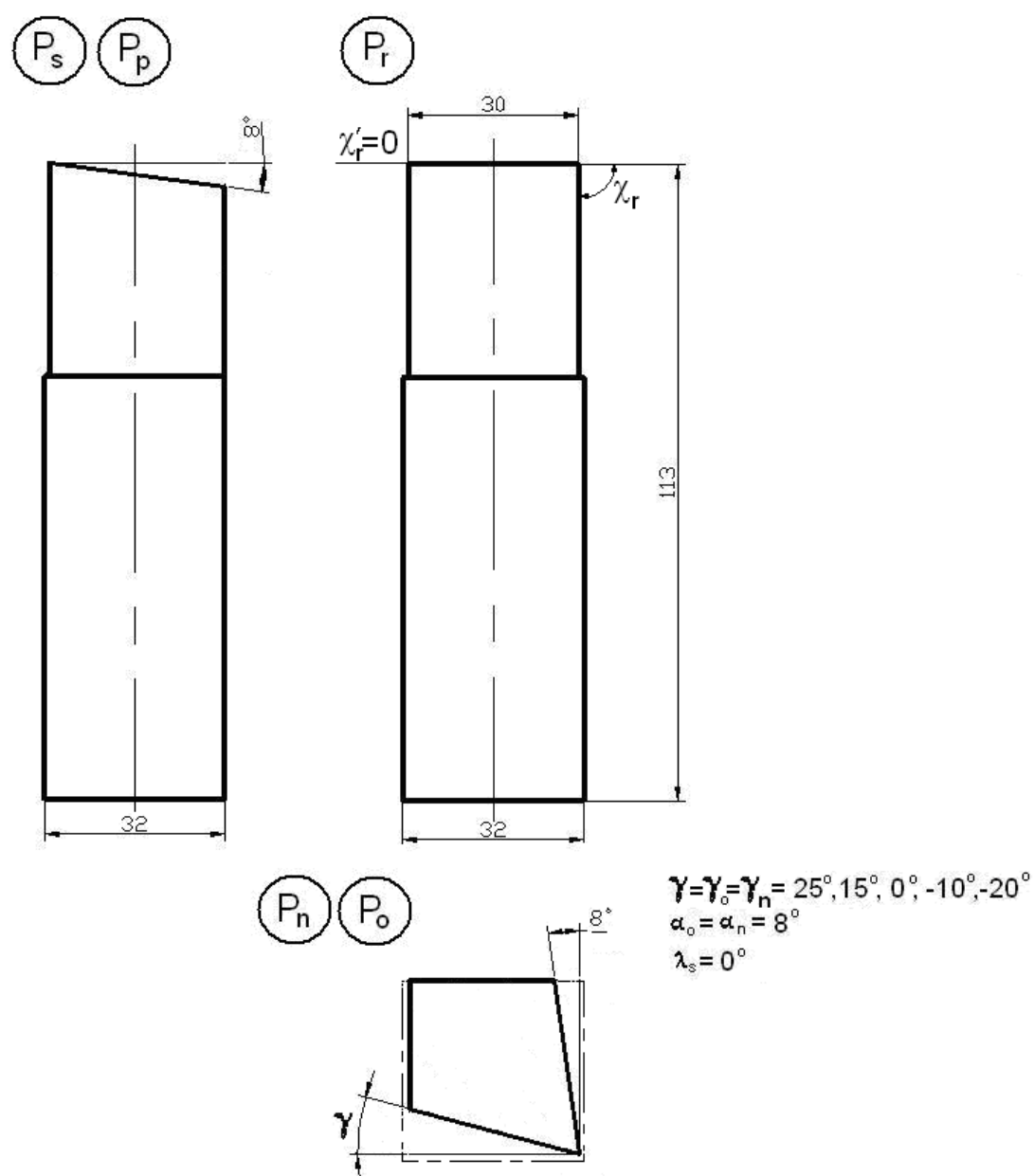
geometrycznych warstwy skrawanej we wszystkich przypadkach zostały tak dobrane aby przekrój warstwy skrawanej wynosił $A_c = 80 \text{ mm}^2$.

4.3.5. Przygotowanie narzędzi

Przygotowanie narzędzi skrawających do badań podobnie jak i próbek było uzależnione od sposobu skrawania. W badaniach użyto typowych noży NNPD o przekroju trzonka 32x32 [mm] o ostrzu ze stali SW18 i twardości części skrawającej 61 – 63 HRC. Noże zostały przeostrzone na szlifierce narzędziowej, zmianie ulegał kąt natarcia γ natomiast kąt przyłożenia α_0 i kąt pochylenia głównej krawędzi skrawającej λ_s pozostawały stałe (Rys. 4.15 i Rys. 4.16).



Rys. 4.15. Narzędzia skrawające – skrawanie swobodne (geometria w układzie narzędzia wg PN-ISO 3002-1+A1).



Rys. 4.16. Narzędzia skrawające – skrawanie nieswobodne (geometria w układzie narzędzia wg PN-ISO 3002-1+A1).

4.3.6. Sposób przygotowania i wykonania pomiarów

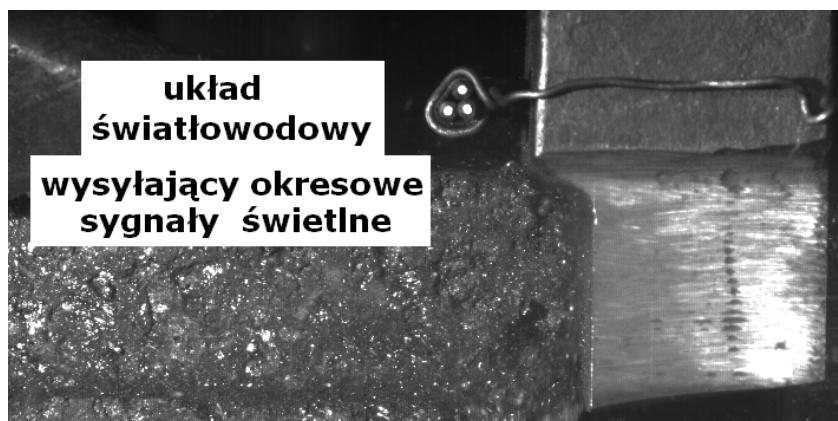
Przygotowanie stanowiska pomiarowego we wstępnym etapie badań było uproszczone i polegało na ustawieniu i zamocowaniu na stole obrabiarki, siłomierza pomiarowego wraz z próbką materiału obrabianego oraz na podłączeniu siłomierza do układu zasilająco-rejestrującego (Rys. 4.8). Do stołu frezarki mocowano specjalną wannę ułatwiającą zbieranie wiórów po każdej wykonanej próbie.

Ruchem głównym był ruch przesuwu wzdłużnego stołu frezarki z zamocowaną próbką materiału. Wartości grubości skrawania a oraz szerokości skrawania b ustawiano przemieszczeniami stołu obrabiarki.

Przygotowanie toru pomiarowego polegało na ustawieniu, wyzerowaniu i kalibrowaniu siłomierza. Po wykonaniu wszystkich czynności związanych z przygotowaniem toru pomiarowego realizowano próby skrawania z 4 krotnymi powtórzeniami. Program SAAS rejestrujący przebiegi głównej siły skrawania uruchamiano równocześnie z włączeniem ruchu posuwu mechanicznego stołu obrabiarki. Przebieg siły rejestrowano aż do momentu wyjścia ostrza narzędzia skrawającego z materiału. Układem rejestrującym przebiegi siły skrawania w trakcie obróbki był komputerowy system akwizycji i analizy sygnału, a całość informacji zapisywano na dysku twardym komputera pomiarowego. Zeskrawany materiał był zbierany, opisywany i klasyfikowany w próbie sitowej.

Przygotowanie stanowiska badawczego w podstawowym etapie badań (Rys. 4.11), polegało na dokładnym ustawieniu i zamocowaniu próbki materiału na stole obrabiarki w uchwycie siłomierza piezoelektrycznego (Rys. 4.18), ustawieniu (wysięg 60 mm) i zamocowaniu przeostrzonego narzędzia w głowicy – imaku (Rys. 4.9), założeniu przezroczystych osłon strefy skrawania. Z kolei instalowano elementy układu pomiarowego: kamerę cyfrową wraz z układem oświetlenia gwarantującym dobrą widoczność strefy skrawania, wibrometr laserowy skierowany na gładką płaszczyznę podstawową

narzędzia P_r (Rys. 4.15, 4.16), elementy zasilająco-rejestrujące toru pomiarowego (Rys. 4.11) oraz układ światłowodowy wysyłający okresowe sygnały optyczne (Rys. 4.17) ułatwiające synchronizację sygnałów pomiarowych (siła, przemieszczenie) z obrazem cyfrowym procesu skrawania.



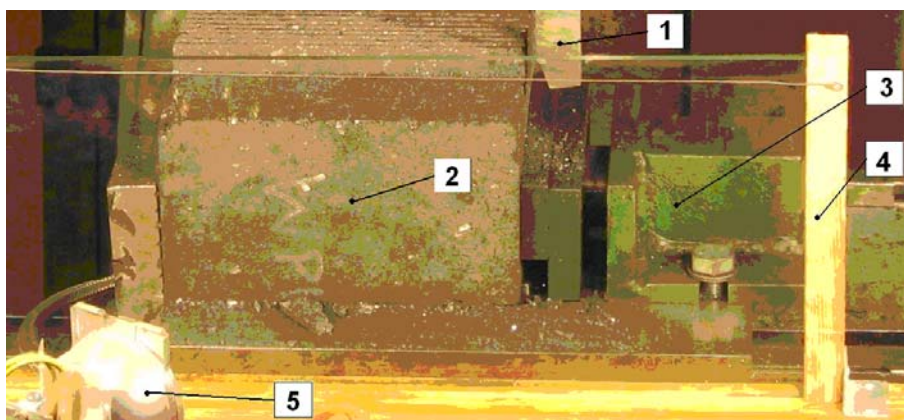
Rys. 4.17. Wygląd jednej klatki obrazu na którym widać błysk w układzie światłowodowym ułatwiający synchronizację obrazu powstawania wióra z przebiegiem siły skrawania i przebiegiem przemieszczenia narzędzia.

W trakcie pomiarów, podczas rejestracji obrazu szybkoklatkową kamerą, odsysano elementy oddzielanego materiału w celu zapewnienia dobrej widoczności strefy skrawania. Sam pomiar trwał około 15 sekund i w tym czasie dokonywano pełnej rejestracji przebiegów: siły skrawania, przemieszczenia narzędzia i obrazu tworzenia się wióra. Czas ten był wystarczający dla statystycznej oceny procesu przy danych warunkach obróbki. W niektórych przypadkach pomiary powtarzano celem dodatkowego sprawdzenia stacjonarności sygnałów (traktowanych jako realizacja procesu losowego) i reprezentatywności statystycznej zapisu procesu. Kolejne próby wykonywano zmieniając warunki obróbki przewidziane planem pracy.

Aby zapewnić synchronizację sygnałów pomiarowych: siły i przemieszczenia były one rejestrowane na dwóch równoległych ścieżkach jednej karty pomiarowej. Cały układ pomiarowy był konfigurowany przy użyciu programu LabVIEW. Sygnały siły i

przemieszczenia zapisywane były na komputerze centralnym, a obraz z kamery na komputerze sterującym kamerą.

Objętość zbiorów dla każdego pomiaru wynosiła około 40 Mb dla siły i przemieszczenia oraz 2 Gb dla obrazu cyfrowego.



Rys. 4.18. Sposób zamocowania próbki w siłomierzu piezoelektrycznym typu 9265B firmy Kistler: 1 – narzędzie, 2 – próbka skrawanego materiału, 3 - uchwyt mocujący, 4 - osłona, 5 - oświetlenie.

4.3.7. Wielkości rejestrowane podczas badań

Wielkościami rejestrowanymi podczas wstępnego etapu badań były:

- główna siła skrawania F_C ,
- granulacja wiórów powstających podczas obróbki *.

Wielkościami pochodnymi wyznaczanymi na podstawie zarejestrowanych przebiegów były:

- wartość średnia głównej siły skrawania $\overline{F_C}$,
- wartość maksymalna głównej siły skrawania F_{Cmax} ,
- współczynnik oporu właściwego skrawania k_C ,
- praca całkowita skrawania L_C ,
- wskaźnik względnego udziału frakcji ziaren o wymiarze charakterystycznym ≤ 1 mm,

* Nie brano pod uwagę wtórnej, nie pochodzącej od procesu odspajania fragmentacji skrawanego tworzywa.

Podczas podstawowego etapu badań na zmodernizowanym stanowisku badawczym zarejestrowano (oprócz wielkości z pierwszego etapu badań):

- przemieszczenia narzędzia,
- cyfrowe obrazy powstawania odspojenia materiału w procesie skrawania.

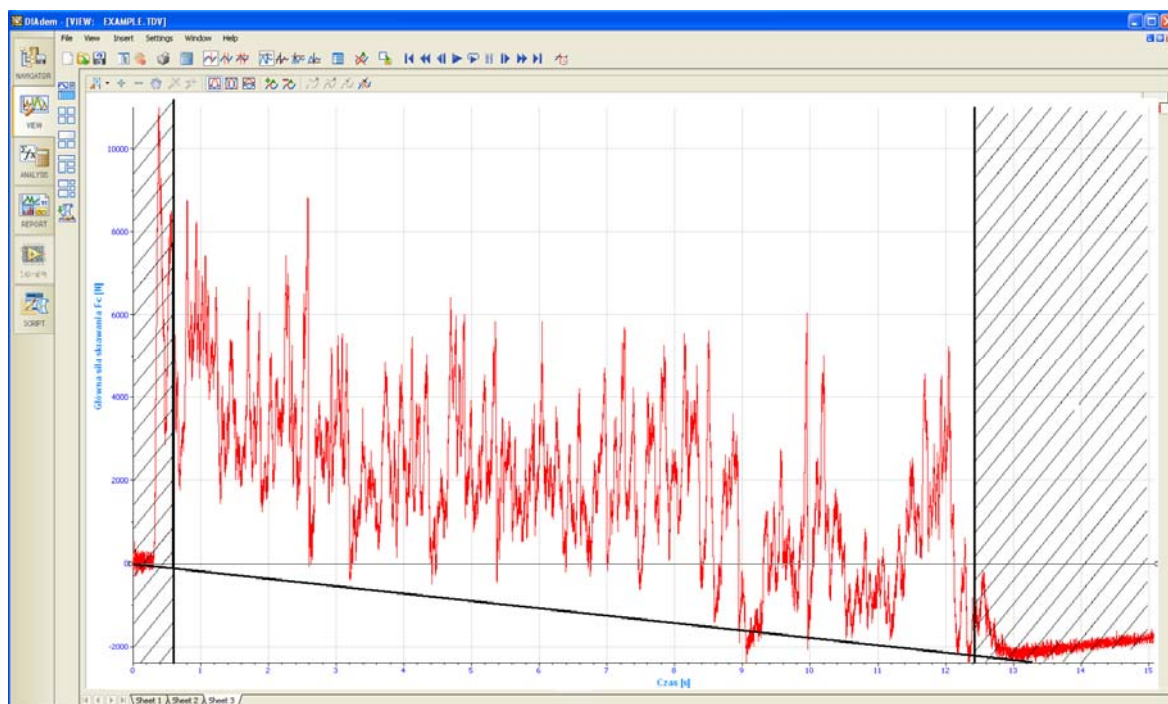
Wielkościami pochodnymi (oprócz wielkości pochodnych ze wstępnego etapu badań), wyznaczanymi na podstawie zarejestrowanych przebiegów były:

- praca na pokonanie oporów ruchu,
- energia fragmentacji,
- wskaźnik względnej energii fragmentacji,
- wskaźnik dynamiczności procesu skrawania K_d .

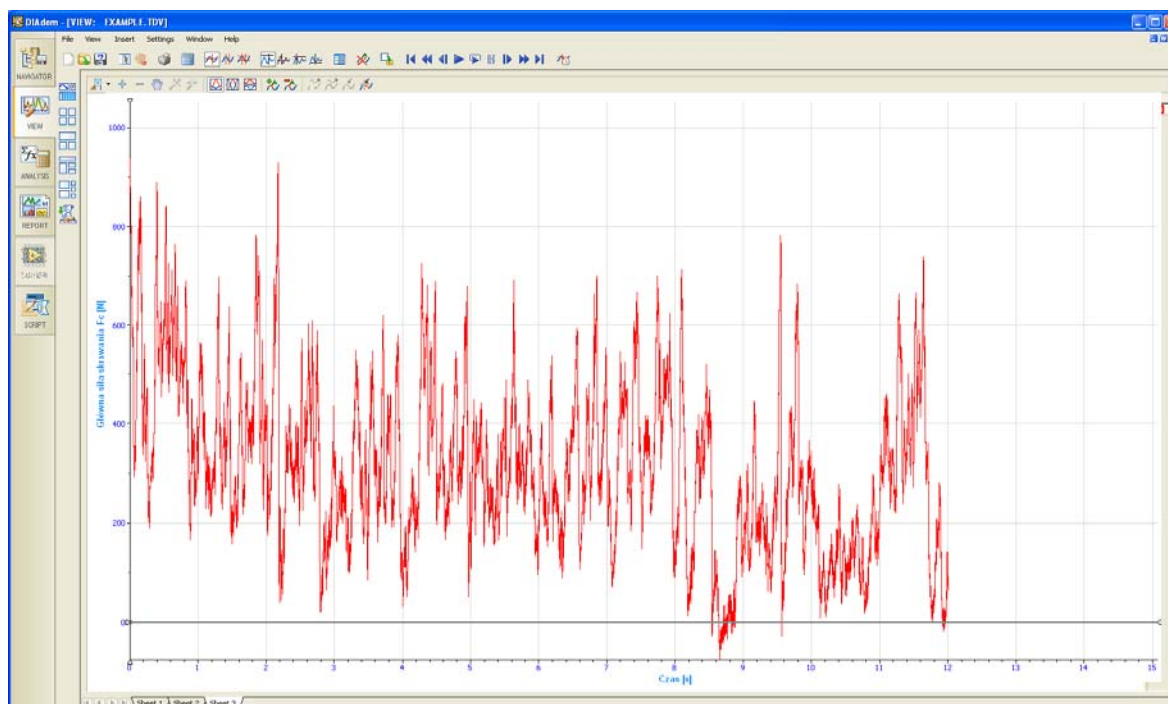
4.3.7.1. Zapis głównej siły skrawania $F_c(t)$

Sygnały przebiegu sił skrawania zarejestrowane podczas przeprowadzonych badań na stanowisku badawczym były poddawane obróbce cyfrowej. Ponieważ moment wejścia narzędzia, jak i jego wyjścia z materiału nie są typowe dla obserwowanego procesu obróbkowego (nadmierne obciążenie początkowe i obniżone zanikiem materiału obciążenie końcowe), dlatego z zarejestrowanego przebiegu wycinano początek i koniec zapisu co stanowiło od 5 % do 10 % całości sygnału. Tak przygotowywane sygnały były opracowywane w programie DIAdem 10.2 firmy National Instruments (Rys. 4.19). Z uwagi na charakterystyczne dla siłomierzy piezoelektrycznych płynięcie zera określano linię trendu i korektę wprowadzano do zarejestrowanego zapisu siły.

a)



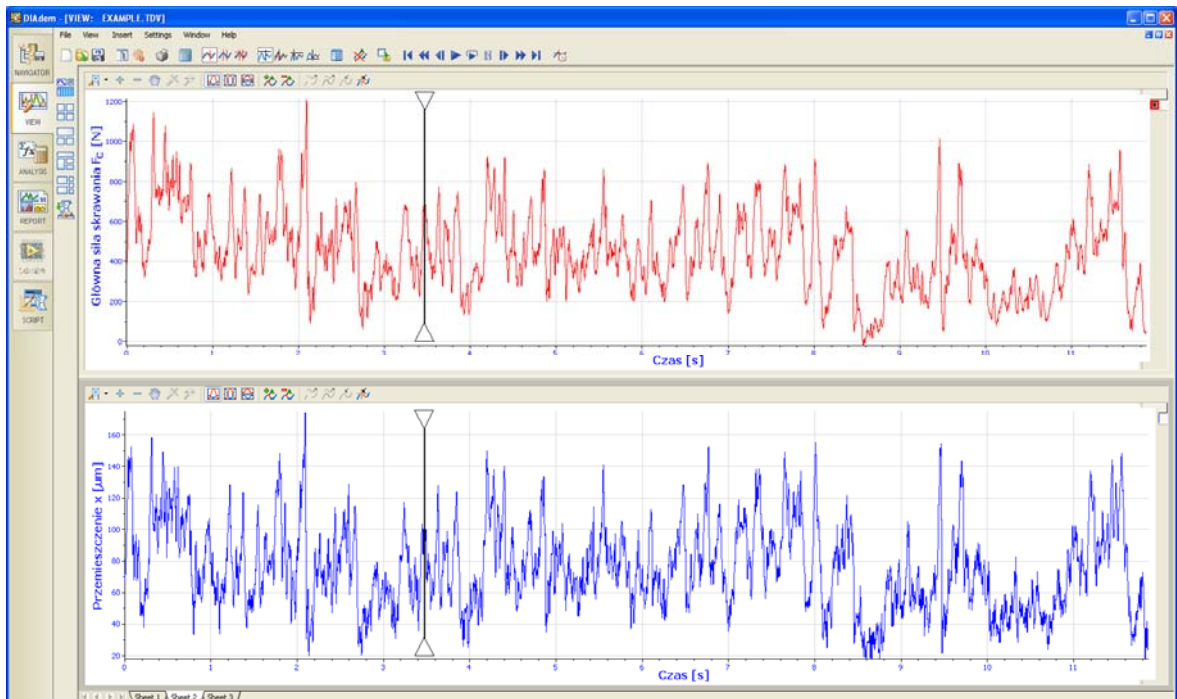
b)



Rys. 4.19. Przykładowy przebieg głównej siły skrawania F_c : a) przed korekcją, b) po korekcji.

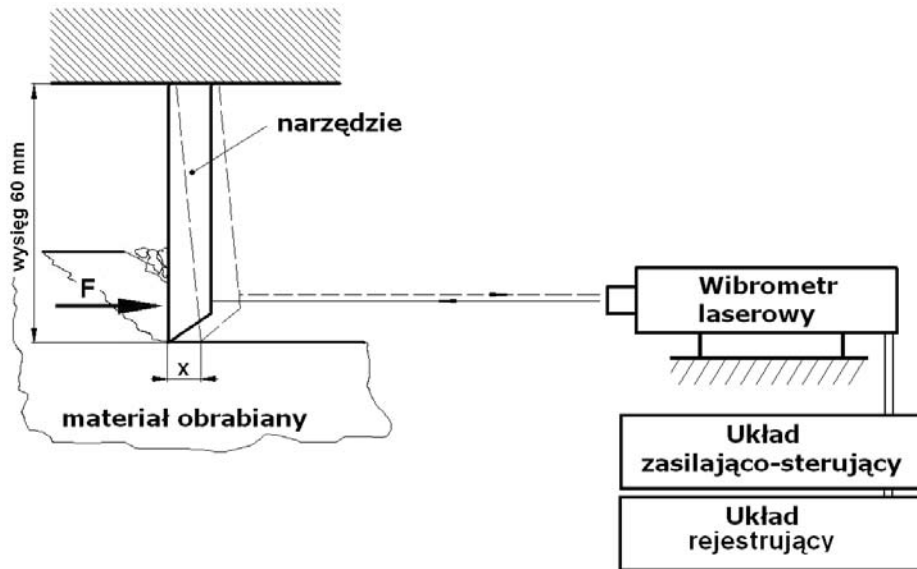
4.3.7.2. Zapis przemieszczeń narzędzia $x(t)$

Równoległe – synchronicznie do zapisu sygnału głównej siły skrawania F_c rejestrowano przemieszczenia narzędzia $x(t)$ wykonującego pracę skrawania. Wielkość tych przemieszczeń nie przekraczała $250\text{ }\mu\text{m}$. Równoległy zapis siły skrawania i przemieszczeń narzędzia pokazano na Rys. 4.20.



Rys. 4.20. Przykładowy przebieg zarejestrowanej głównej siły skrawania F_c i przemieszczenia narzędzia $x(t)$.

Na Rys. 4.21 pokazano schemat układu pomiarowego dla wyznaczania wielkości przemieszczeń $x(t)$ narzędzia. Podobnie jak w przypadku zapisu siły usuwano początek i koniec zarejestrowanego sygnału przemieszczeń. Na dodatkowym dysku twardym były przechowywane cyfrowe zapisy sygnałów przemieszczeń i siły wspólnie z cyfrowym zapisem obrazu skrawania. Digitalizację sygnału dokonywano w odstępach czasowych $\Delta T = 5 \times 10^{-5}$ [s].



Rys. 4.21. Schemat pomiaru przemieszczenia narzędzia $x(t)$ pod działaniem sił skrawania.

4.3.7.3. Określanie granulacji wiórów powstających podczas skrawania

Po przeprowadzonej próbie wióry były poddawane analizie granulometrycznej.

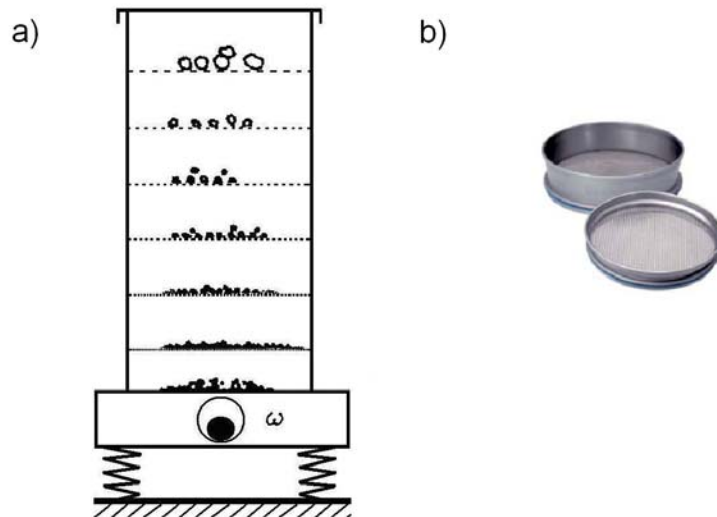
Przesiewano je przez kolumnę sit o oczkach: 1, 2 i 4 mm ustawionych na przesiewaczu wibracyjnym - Rys. 4.22.

W wyniku przesiewania otrzymywano 4 frakcje:

- I - od 0 do 1 [mm],
- II - od 1 do 2 [mm],
- III - od 2 do 4 [mm],
- IV - powyżej 4 mm.

Z uwagi na założenia ekologiczne o użytecznej dla recyklingu wielkości wiórów ziaren dzielono materiał na dwie frakcje:

- M_I o wymiarze charakterystycznym ziaren ≤ 1 [mm],
- M_{II-IV} o wymiarze charakterystycznym ziaren > 1 [mm].



Rys. 4.22. Kolumna sit ustawiona na wibratorze bezwładnościowym: a) schemat przesiewacza wibracyjnego, b) sita.

Procentowy udział u_v wiórów nieprzydatnych do recyklingu obliczano ze wzoru:

$$u_v = \left(\frac{M_I}{M_I + M_{II \div IV}} \right) \cdot 100\%$$

gdzie: M_I – waga frakcji o ziarnie ≤ 1 [mm],

$M_I + M_{II \div IV}$ – waga całego materiału poddanego analizie sitowej.

4.3.7.4. Wielkości pochodne wyznaczane na podstawie zarejestrowanych przebiegów

Na podstawie zarejestrowanych przebiegów sił i przemieszczeń wyznaczono szereg wskaźników i charakterystyk procesu obróbki tworzywa WPW-65. Na Rys. 4.23 przedstawiono graficzne wyznaczanie z zapisu przebiegu głównej siły skrawania F_C jej: wartości średniej $\overline{F_C}$ (wraz z niepewnością pomiarową u), wartości maksymalnej F_{Cmax} oraz

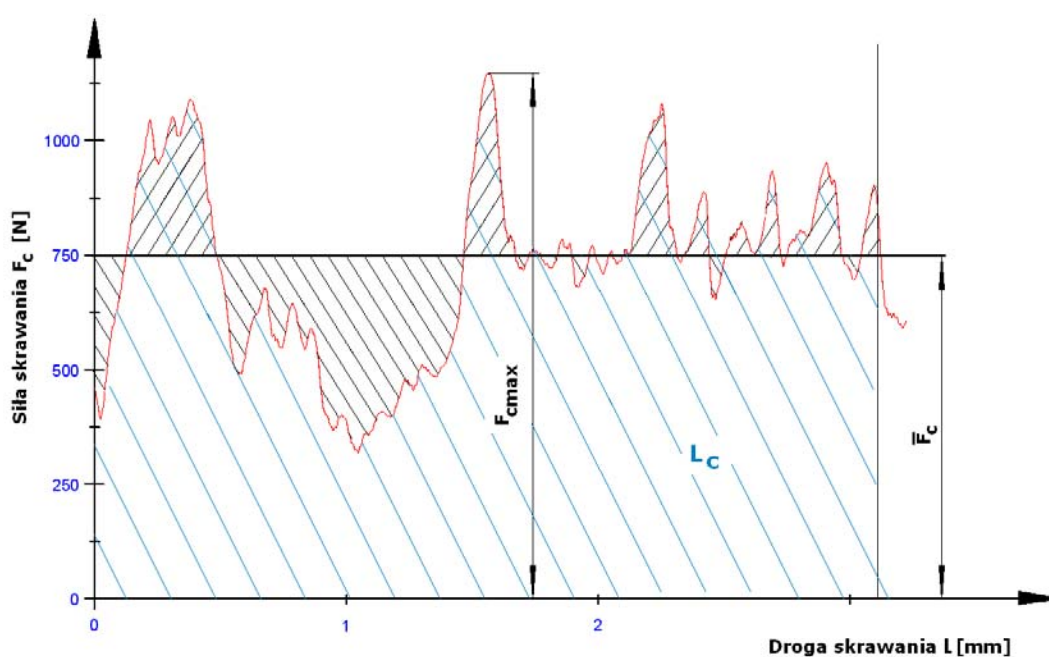
L_c - całkowitej pracy skrawania na długości pomiarowej drogi skrawania l (gdzie $l = t \cdot v$).

Mamy odpowiednio:

$$- \overline{F_C} = \frac{1}{l} \int F_C dl$$

$$- F_{Cmax} = \sup F_C(l),$$

$$- L_C = \int_0^l F_C dl *$$



Rys. 4.23. Sposób wyznaczenia wartości $\overline{F_C}$, F_{Cmax} i L_C .

W celu numerycznego wyznaczenia F_{Cmax} , $\overline{F_C}$ i L_C wykorzystano program DIAdem 10.2 firmy National Instruments.

* W rozważaniach zakładamy że cała energia dostarczona do układu jest wykorzystywana do wykonania pracy L_C .

Wartość współczynnika oporu właściwego skrawania, k_c :

$$k_c = \frac{\overline{F_C}}{A_C} \text{ [MPa]}$$

gdzie: k_c - współczynnik oporu właściwego skrawania [MPa],

$\overline{F_C}$ - średnia wartość głównej siły skrawania [N],

A_C - przekrój warstwy skrawanej [mm²],

Wartość współczynnika dynamiczności procesu skrawania K_d

Wartość tego współczynnika była wyznaczana dla 50 największych przyrostów siły skrawania F_C obserwowanych podczas próby i obliczana ze wzoru:

$$K_d = \frac{1}{50} \frac{\sum_{i=1}^{50} \Delta F_{ci}}{\overline{F_C}}$$

gdzie: ΔF_{ci} - i - ta wartość przyrostu głównej siły skrawania,

$\overline{F_C}$ - wartość średnia głównej siły skrawania.

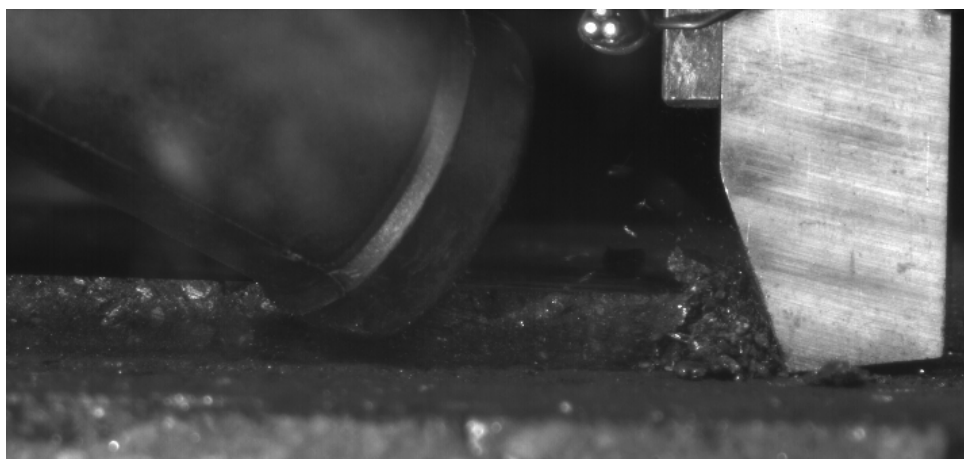
4.3.7.5. Cyfrowy zapis obrazu powstawania odspojenia – mechanizmu procesu

Badania nad mechanizmem skrawania tworzywa węglowego WPW prowadzono przy zastosowaniu szybkiej kamery cyfrowej (400 [kl/s]), podczas skrawania swobodnego i nieswobodnego dla różnych geometrii ostrza skrawającego i różnych geometrii warstwy skrawanej (K_A).

Ograniczeniem szybkości zapisu były wymagana jasność układu oświetlającego oraz objętość zbiorów cyfrowych reprezentujących zapis

wizualny procesu skrawania. Objętość ta była bardzo duża (dla czasu skrawania próbki równego 15 [s] wynosiła ona około 2 GB). Stanowiło, to poważne ograniczenie dla zwiększania szybkości zapisu, co utrudniało obserwację mechanizmu odspajania wióra. W oryginalnym zapisie trudno było rozgraniczyć powstające elementy – wióry odpryskowe, czy obserwować przebieg powstającego pęknięcia niszczącego spójność materiału. Dopiero wprowadzenie programu konturującego umożliwiło dobrą obserwację pęknięć, określenie wielkości oddzielanych wiórów odpryskowych, śledzenie drogi przemieszczeń oddzielanego materiału, nawet w warunkach skrawania nieswobodnego. Na Rys. 4.24 pokazano cyfrowy obraz mechanizmu odspajania materiału: a) oryginalny bez dodatkowej obróbki obrazu i b) z zastosowaną konturyzacją.

a)

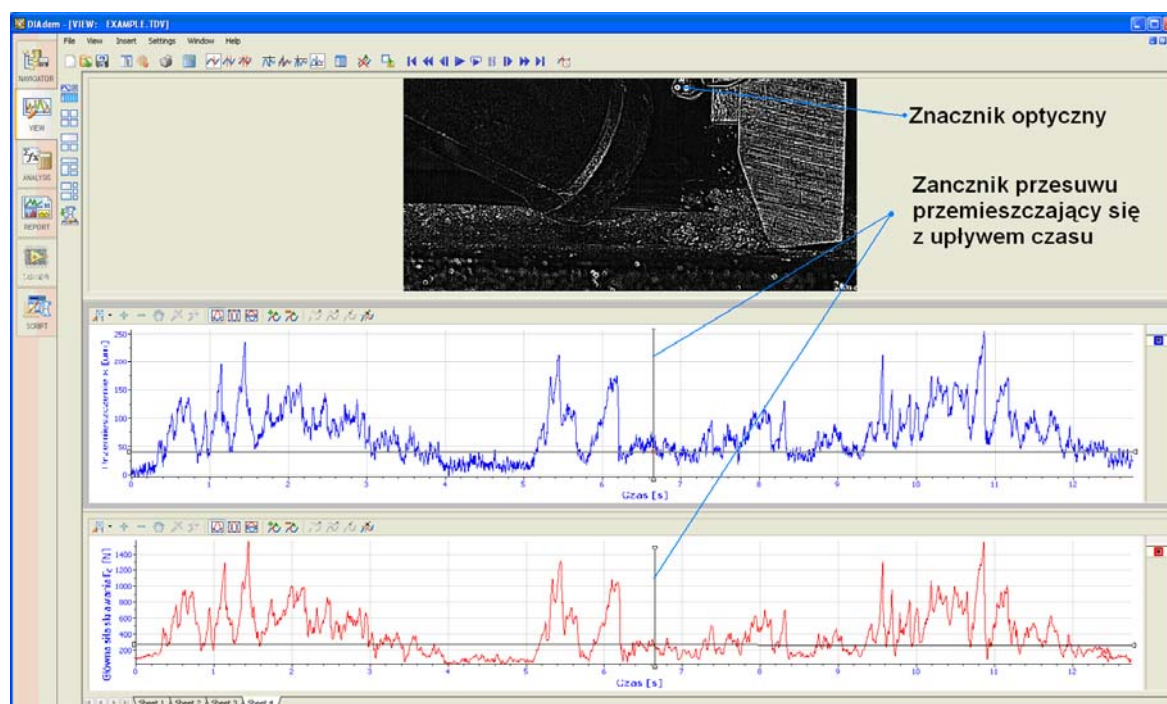


b)



Rys. 4.24. Cyfrowy obraz mechanizmu odspajania materiału: a) oryginalny bez dodatkowej obróbki obrazu i b) z zastosowaną konturyzacją.

Istotne znaczenie dla celów analizy miała synchronizacja zapisu obrazu z zapisami rejestrowanych równolegle sygnałów: głównej siły skrawania F_C i przemieszczenia narzędzia $x(t)$. Chodziło, mianowicie o wskazanie momentu wzrostu siły skrawania do wielkości gwarantującej oddzielenie kolejnej objętości materiału i równoczesną obserwację przebiegu tego oddzielenia. Dzięki równoczesnej rejestracji światłowodowego sygnału świetlnego na obrazie i na zapisie siły i przemieszczenia (dodatkowy synchroniczny kanał zapisu) była możliwa pełna synchronizacja trzech sygnałów. Na Rys. 4.25 pokazano efekt równoczesnej synchronizacji obrazu z sygnałem siły i przemieszczenia narzędzia określanych dodatkowym znacznikiem przemieszczającym się wraz z upływem czasu. W materiałach aneksu pracy na DVD zebrano przykłady przebiegów : głównej siły skrawania F_C , przemieszczenia narzędzia $x(t)$ i obrazu video zarejestrowanych dla wybranych prób skrawania.

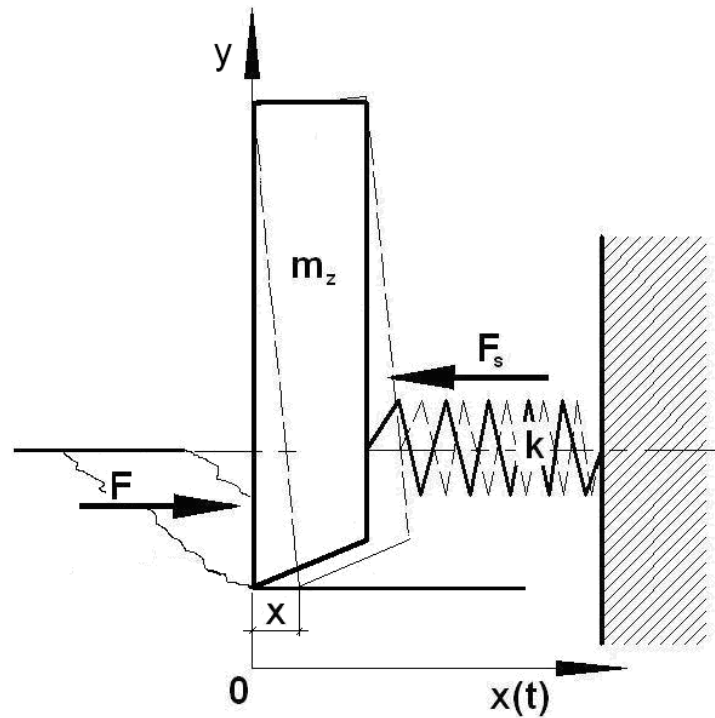


Rys. 4.25. Równoczesna synchronizacja obrazu z sygnałem siły i przemieszczenia określana dodatkowym znacznikiem przesuwu przemieszczającym się z upływem czasu.

4.3.7.6. Energetyczne wskaźniki procesu skrawania tworzywa węglowego

Jak wynika z analizy teorii i praktyki rozdrabniania materiałów kruchych [73, 74] podstawową wielkością służącą do scharakteryzowania procesu jest energia potrzebna do jego realizacji. Proces skrawania tworzywa węglowego jest rozdrabnianiem materiału, który zostaje oddzielony od przedmiotu obrabianego. Dlatego było wskazane, aby opis obróbki tworzywa węglowego został uzupełniony o energetyczną charakterystykę procesu.

Aby uniezależnić się od właściwości dynamicznych stanowiska pomiarowego obniżono do 0.8 [m/min] prędkość skrawania, a na stanowisko badawcze wybrano bardzo sztywną obrabiarkę – frezarkę pionową. Niesztywnym elementem, który podlegał odkształceniom w procesie skrawania było narzędzie jednoostrzowe zamocowane w specjalnym imaku narzędziowym. Sztywność tak zbudowanego układu wynosiła podczas badań 6,7 [N/μm], a jej zmiany w pełnym zakresie pomiarowym nie przekraczały 5% wartości nominalnej. Układ mechaniczny stanowiska badawczego przyrównano do układu o jednym stopniu swobody z tarciem (przedstawiony na Rys. 4.26) na który działa siła F powodująca jego napięcie. Na narzędzie o masie zredukowanej m_z oddziałuje siła bezwładności $m_z \ddot{x}$, siła sprężystości $F_s = kx$ z jaką narzędzie dociskane jest do materiału obrabianego oraz siły F oporu tarcia i usuwanych nierówności materiału. Układ pracuje jak sprężyna, która napina się i magazynuje energię. Ta energia jest przekazywana na narzędzie skrawające w postaci impulsów niszczących materiał obrabiany. Proces przebiega w sposób probabilistyczny.



Rys. 4.26. Model układu mechanicznego stanowiska pomiarowego drgającego o jednym stopniu swobody z tłumieniem.

Ruch narzędzia po odspojeniu objętości materiału można zapisać równaniem:

$$m_z \ddot{x} = -kx + F$$

gdzie: $m_z \ddot{x}$ - reprezentuje siłę bezwładności,

kx - reprezentuje siłę sprężystości w układzie,

F - reprezentuje siłę oporu tarcia i usuwanych nierówności materiału.

Mnożąc równanie ruchu przez dx oraz uwzględniając, że $\ddot{x} dx = \frac{d(v^2)}{2}$,

gdzie $v(t) \equiv \dot{x}(t)$ otrzymujemy

$$\frac{1}{2} m_z dv^2 + kx dx - F dx = 0 .$$

Całkując powyższe równanie przy uwzględnieniu warunków początkowych $x(0)=x_0$ $v(0)=v_0$ można zapisać zasadę zachowania energii dla rozpatrywanego układu mechanicznego

$$\frac{1}{2} m_z (v^2 - v_0^2) + \frac{1}{2} k (x^2 - x_0^2) - F (x - x_0) = 0 .$$

Porządkując równanie otrzymuje się równanie bilansu energii w postaci:

$$\frac{1}{2} k (x^2 - x_0^2) = -\frac{1}{2} m_z (v^2 - v_0^2) + F (x - x_0) ,$$

gdzie energia potencjalna układu sprężystego $\frac{1}{2} k (x_1^2 - x_0^2)$ jest wydatkowana na pracę skrawania i częściowo zamieniana na energię kinetyczną układu.

Ruch narzędzia w kierunku położenia równowagi zostaje powstrzymany oporami ruchu i następuje sprężyste napinanie układu aż do przekroczenia wytrzymałości kolejnej objętości materiału.

Bilans energii można więc zapisać następująco:

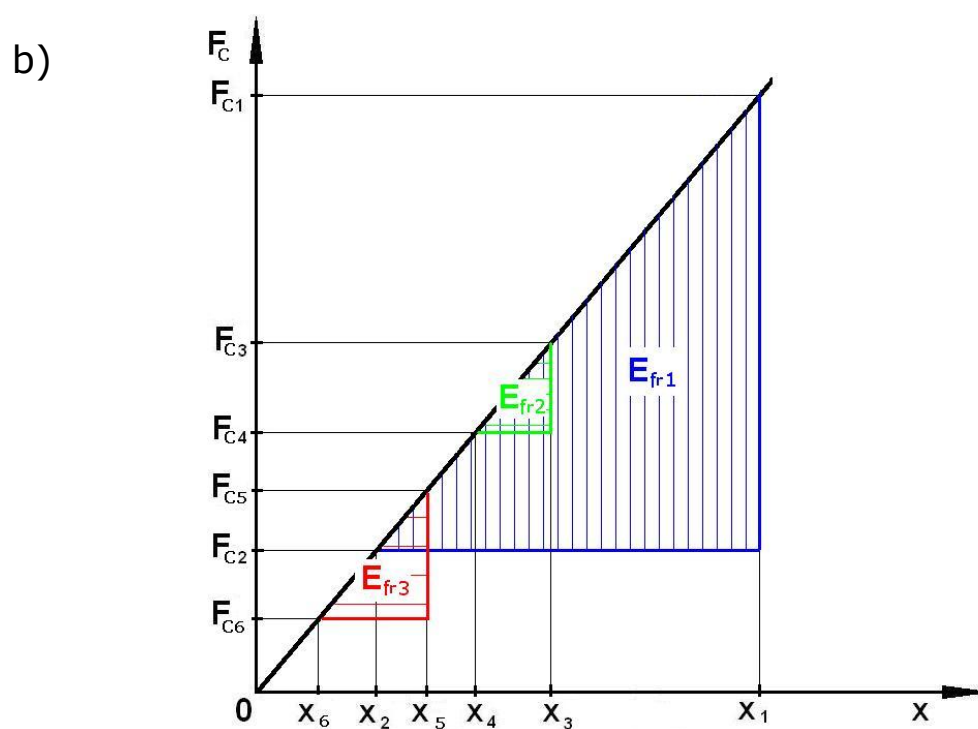
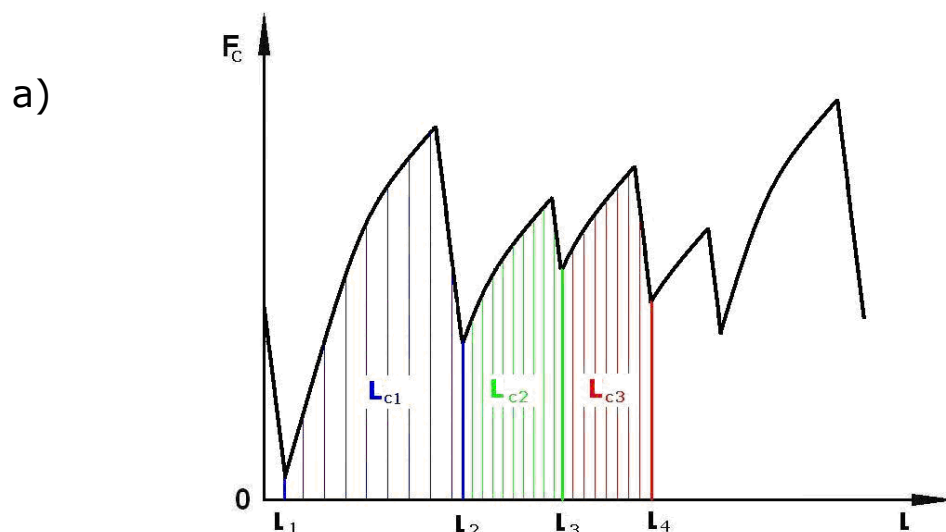
$$L_c = E_{fr} + L_o$$

Na pracę skrawania L_c składa się praca fragmentacji - E_{fr} oraz praca na pokonanie oporów ruchu - L_o .

Analizując wykresy siły skrawania w funkcji drogi przebytej przez narzędzie w materiale obrabianym można wyznaczyć dwie wielkości występujące w powyższym wzorze E_{fr} i L_c .

Na Rys. 4.27 przedstawiono graficznie wyznaczanie składowych:

a – pracy skrawania L_c , b - energii E_f .



Rys. 4.27. Wykres przedstawiający sposób wyznaczenia a) pracy skrawania L_c i b) jednostkowej energii E_{fr} .

Bilans energii dla pierwszego zeskrwanego fragmentu materiału

$$L_{C1} = E_{fr1} + L_{o1}$$

Podstawiając do równania na wartość pracy skrawania wydatek energii na fragmentację pierwszej objętości materiału (obliczanego według Rys. 4.27 b) mamy:

$$L_{C1} = \int_{l_1}^{l_1 + \Delta l_1} F_C dl = \frac{1}{2} \Delta F_{C1} \Delta x_1 + L_{o1}$$

Analogicznie dla i-tego zeskrwanego fragmentu otrzymujemy:

$$L_{Ci} = E_{fri} + L_{oi}$$

i

$$L_{Ci} = \int_{l_i}^{l_i + \Delta l_i} F_C dl = \frac{1}{2} \Delta F_{Ci} \Delta x_i + L_{oi}$$

Całkowita praca skrawania jest równa sumie wszystkich jednostkowych prac skrawania

$$L_C = \sum L_{ci}$$

będących sumą energii fragmentacji E_{fri} i pracy L_{oi} na pokonanie oporów ruchu.

$$L_C = \sum E_{fri} + \sum L_{oi}$$

Znając energię fragmentacji procesu E_{fr} jak i wyznaczoną w rozdziale 4.3.7.4 całkowitą pracę skrawania L_c można operować zarówno wartościami bezwzględnymi tych wielkości jak i względnymi

wskaźnikami energetycznymi procesu. W pracy wykorzystywano wielkości: całkowitej energii fragmentacji ΣE_{fri} i względnej (procentowej) energii fragmentacji e_{fr}

$$e_{fr} = \frac{\Sigma E_{fri}}{L_c} \cdot 100 [\%]$$

Obliczenia tych wskaźników wykonywano przy użyciu programu Microsoft Excel, który obliczał z wykresów głównej siły skrawania $F_c(t)$ i przemieszczeń narzędzia $x(t)$ pojedyncze energie fragmentacji, sumował je, a w przypadku wskaźnika względnego dzielił uzyskaną wartość przez wyznaczoną wcześniej całkowitą pracę skrawania L_c .

5. Badania laboratoryjne skrawalności tworzywa węglowego WPW-65 – wyniki pomiarów i ich wstępna analiza

W tym rozdziale przedstawiono wyłącznie najważniejsze wyniki badań bez ich podziału na etapy, w sposób pozwalający na wskazanie najkorzystniejszych warunków obróbki tworzyw węglowych. Pozostałe wyniki badań i inne materiały zostały umieszczone w Załączniku 4 pracy na nośniku DVD.

5.1. Główna siła skrawania i wartości pochodne

Na podstawie zapisów głównej siły skrawania F_c wyznaczono szereg wartości pochodnych jak maksymalną wartość siły skrawania F_{cmax} , wartość średnią głównej siły skrawania $\overline{F_c}$, opór właściwy skrawania k_c i współczynnik dynamiczności procesu K_d . W tablicach 5.1 i 5.2 podano wartości maksymalne (określane dla 5 powtórzeń) głównej siły skrawania $F_{c max}$ we wszystkich analizowanych przypadkach. Podano tam również niepewności pomiarowe wyliczane wg. zaleceń ISO (zał. 2). Prawie we wszystkich przypadkach wartości maksymalne głównej siły skrawania otrzymane przy skrawaniu nieswobodnym przewyższały odpowiednie wartości otrzymane dla skrawania swobodnego. Znaczne osłabienie skrawanego materiału było szczególnie widoczne przy skrawaniu przekrojów o wydłużonym kształcie ($K_A = 7.83$). Skrawanie narzędziem o kącie natarcia $\gamma = -20^\circ$ sprzyjało zwiększeniu oporów skrawania również w przypadkach skrawania swobodnego. Jednak największe wartości $F_{c max}$ obserwowano przy skrawaniu nieswobodnym narzędziami o kącie natarcia $\gamma = 0^\circ$. Rejestrowano wówczas siły $F_{c max}$ znacznie powyżej 4000 [N]. Niepewności pomiarowe podczas wyznaczania wartości $F_{c max}$ sięgały 20% wartości obserwowanych sił.

Tab. 5.1. Wartości maksymalne głównej siły skrawania F_{Cmax} przy skrawaniu swobodnym.

Kąt natarcia γ [°]	Wskaźnik przekroju warstwy skrawanej $K_A = b/a_p$							
	1,25		2,83		5		7,81	
	F_{Cmax} [N]	u^*	F_{Cmax} [N]	u	F_{Cmax} [N]	u	F_{Cmax} [N]	u
25	1429.43	276	1234.04	239	1876.02	363	813.90	157
15	968.17	187	1202.51	233	1439.26	278	595.97	115
0	1344.92	260	1411.61	273	1761.99	341	551.74	107
-10	1586.63	307	1939.40	375	2584.59	500	1279.45	247
-20	2225.68	430	2408.49	466	2614.62	506	1656.40	320

Tab. 5.2. Wartości maksymalne głównej siły skrawania F_{Cmax} przy skrawaniu nieswobodnym

Kąt natarcia γ [°]	Wskaźnik przekroju warstwy skrawanej $K_A = b/a_p$							
	1,25		2,83		5		7,81	
	F_{Cmax} [N]	u	F_{Cmax} [N]	u	F_{Cmax} [N]	u	F_{Cmax} [N]	u
25	1999.43	387	1677.41	324	2061.94	399	1553.34	300
15	2052.44	397	1676.02	324	2578.40	499	1582.95	306
0	2527.96	489	3428.88	663	4419.28	855	2291.00	443
-10	3171.97	613	2546.39	492	2861.80	553	1505.26	291
-20	2218.28	429	3196.38	618	1842.22	356	1638.09	317

Wartości średnie głównej siły skrawania $\overline{F_C}$ zostały zebrane w tablicach 5.3 i 5.4. Uzyskane wyniki przedstawiono graficznie na czterech wykresach $F_C(\gamma)$ każdy dla innego wskaźnika K_A (Rys. 5.1 – 5.4) . Na wszystkich wykresach nanoszono po dwie krzywe, jedną dla skrawania swobodnego, drugą dla nieswobodnego. Ponieważ we wszystkich przypadkach stosowano stały przekrój warstwy skrawanej $A_c = 80 \text{ mm}^2$, stąd na wykresy naniesiono również skalę wartości współczynnika oporu właściwego skrawania k_C .

* u – niepewność pomiarowa wyznaczana wg ISO załącznik 2 pracy.

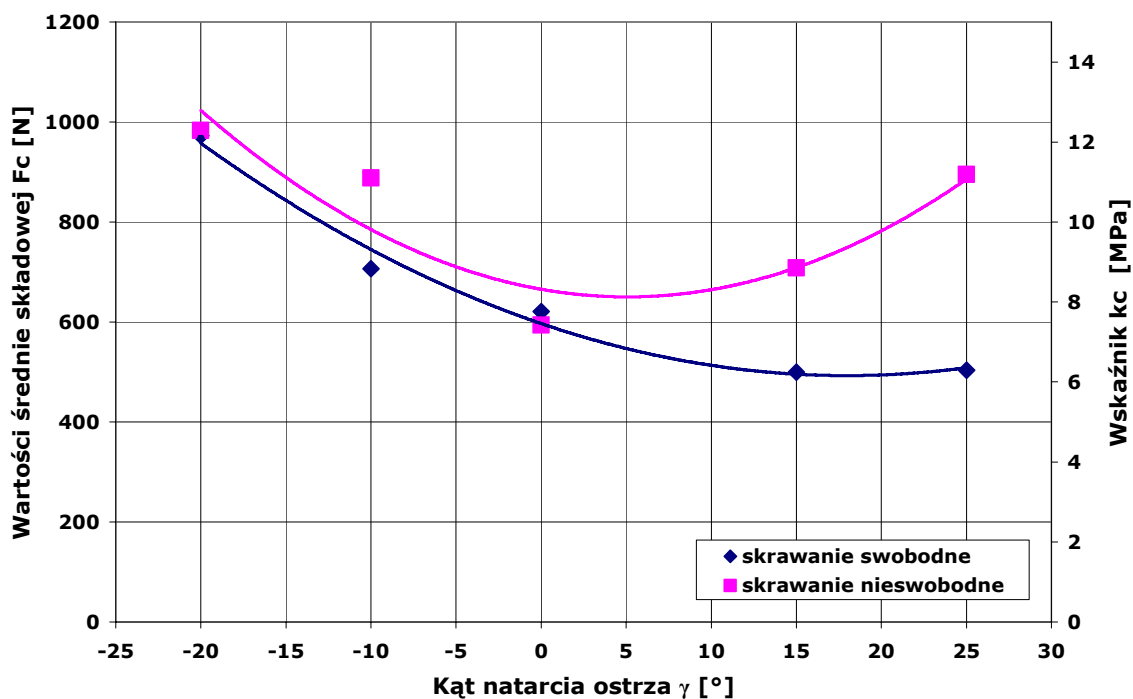
Tab. 5.3. Wartości średnie głównej siły skrawania $\overline{F_C}$ przy skrawaniu swobodnym

Kąt natarcia γ [°]	Wskaźnik przekroju warstwy skrawanej $K_A = b/a_p$							
	1,25		2,83		5		7,81	
	$\overline{F_C}$ [N]	u	$\overline{F_C}$ [N]	u	$\overline{F_C}$ [N]	u	$\overline{F_C}$ [N]	u
25	503.267	127	490.367	78	970.528	74	1139.472	65
15	499.761	163	606.34	71	695.167	76	851.256	17
0	620.75	112	684.501	83	1062.381	25	983.977	134
-10	706.78	141	1092.185	62	1309.649	138	1391.26	31
-20	973.062	209	1123.739	266	1433.261	36	1707.055	157

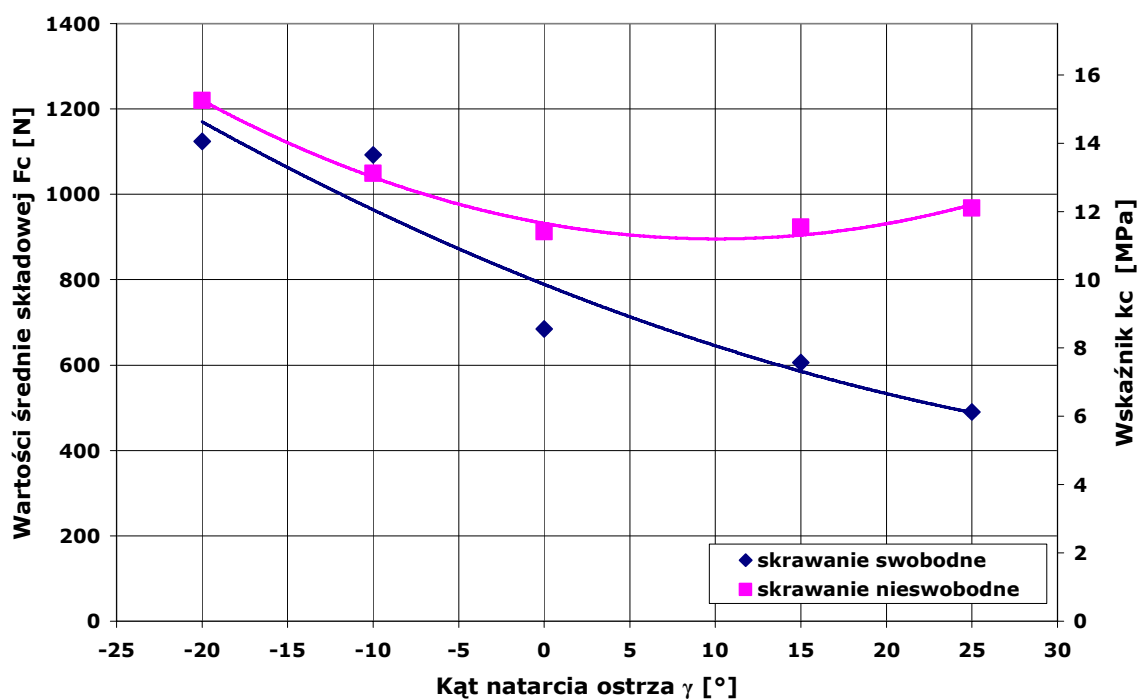
Tab. 5.4. Wartości średnie głównej siły skrawania $\overline{F_C}$ przy skrawaniu nieswobodnym

Kąt natarcia γ [°]	Wskaźnik przekroju warstwy skrawanej $K_A = b/a_p$							
	1,25		2,83		5		7,81	
	$\overline{F_C}$ [N]	u	$\overline{F_C}$ [N]	u	$\overline{F_C}$ [N]	u	$\overline{F_C}$ [N]	u
25	894.859	106	967.689	119	1107.08	53	1192.197	105
15	708.403	64	923.822	124	992.315	34	1112.64	102
0	593.613	92	912.42	134	1024.28	79	1110.155	147
-10	887.852	70	1048.927	141	1152.193	113	1180.606	52
-20	983.02	104	1220.092	293	1231.796	35	1397.711	89

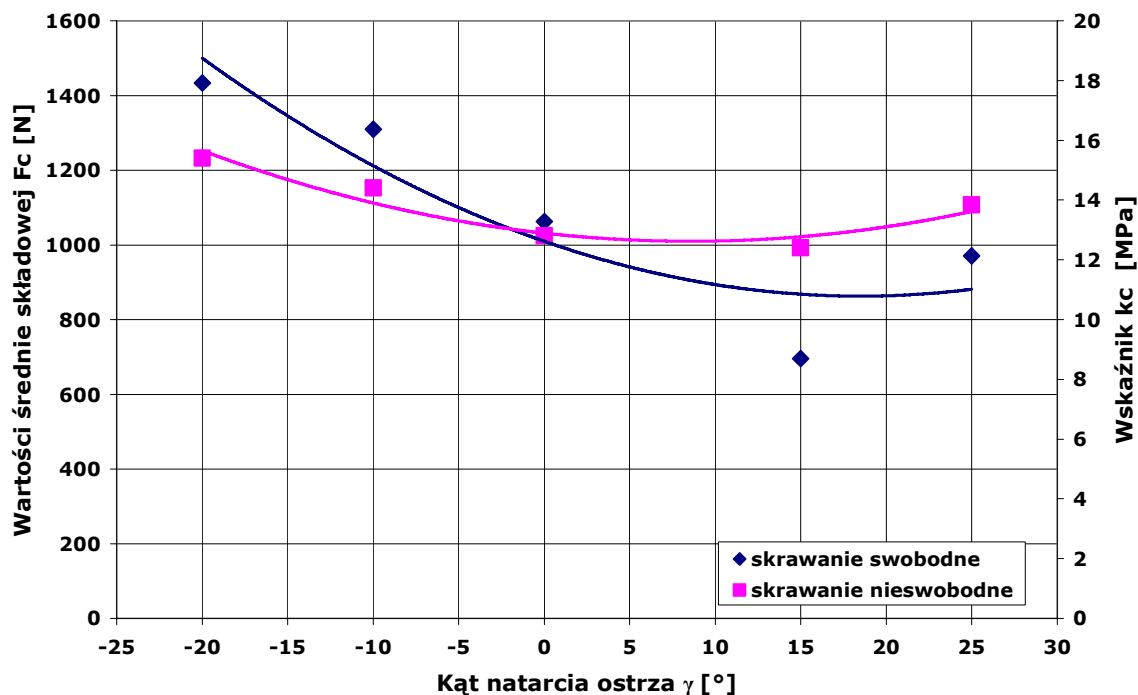
We wszystkich przypadkach dla dodatnich wartości kątów γ obserwowano wzrost wartości oporu właściwego skrawania k_c (i wartości średniej siły) przy przejściu od skrawania swobodnego do nieswobodnego. Wzrost ten był szczególnie widoczny dla kąta $\gamma = 25^\circ$ gdzie różnice sięgały 50% obliczanych wartości. We wszystkich przypadkach obserwowano wystąpienie minimalnej wartości średniej siły skrawania $\overline{F_C}$ (i k_c) w obszarze wartości dodatnich kątów γ .



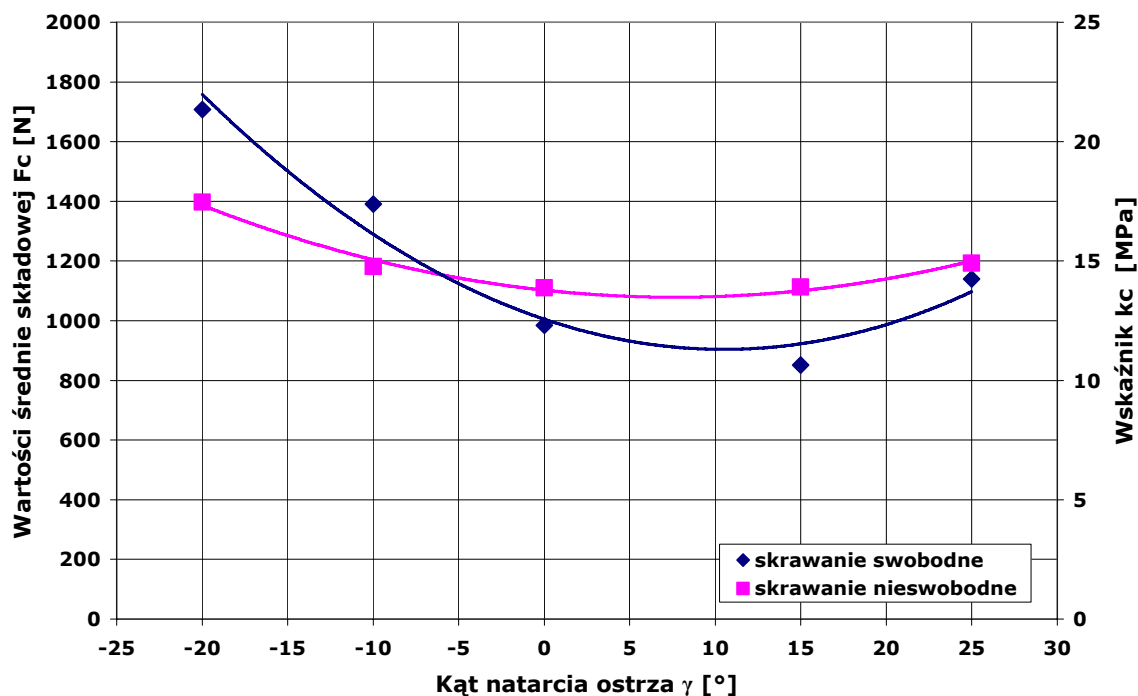
Rys. 5.1. Wpływ kąta γ na wartość średniej siły skrawania $\overline{F_C}$ i k_C w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika przekroju warstwy skrawanej $K_A = 1,25$.



Rys. 5.2. Wpływ kąta γ na wartość średniej siły skrawania $\overline{F_C}$ i k_C w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika przekroju warstwy skrawanej $K_A = 2,83$.



Rys. 5.3. Wpływ kąta γ na wartość średniej siły skrawania $\overline{F_C}$ i k_C w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika przekroju warstwy skrawanej $K_A = 5$.



Rys. 5.4. Wpływ kąta γ na wartość średniej siły skrawania $\overline{F_C}$ i k_C w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika przekroju warstwy skrawanej $K_A = 7,81$.

Na podstawie wykresów $F_c(t)$ wyznaczono dla każdej próby współczynnik dynamiczności procesu jako wartość średnią z 50 największych przyrostów siły skrawania. Wyniki zostały przedstawione w tablicach zbiorczych Tab. 5.5, 5.6. Dla przypadku skrawania nieswobodnego istnieje wyraźne maksimum przy kącie $\gamma = 0^\circ$. Ze wzrostem bezwzględnej wartości kąta γ współczynnik K_d wyraźnie maleje. Zmniejszenie współczynnika dynamiczności K_d towarzyszące małym wartościom kąta γ nie stanowi jednak przesłanki dla stosowania ujemnych kątów natarcia narzędzi przy obróbce tworzywa WPW – 65, ze względu na malejącą granulację wiórów.

Tab. 5.5. Wskaźnik K_d dynamiczności procesu skrawania przy skrawaniu swobodnym.

Kąt natarcia $\gamma [^\circ]$	Wskaźnik przekroju warstwy skrawanej $K_A = b/a_p$							
	1,25		2,83		5		7,81	
	K_d	u	K_d	u	K_d	u	K_d	U
25	3.21	0.052	2.74	0.033	2.34	0.031	2.50	0.031
15	2.78	0.025	2.73	0.047	2.17	0.035	1.80	0.014
0	3.33	0.055	2.54	0.030	2.30	0.028	2.34	0.027
-10	2.93	0.050	2.72	0.046	2.35	0.039	3.35	0.037
-20	3.23	0.084	2.63	0.048	2.53	0.056	3.07	0.030

Tab. 5.6. Wskaźnik K_d dynamiczności procesu skrawania przy skrawaniu nieswobodnym.

Kąt natarcia $\gamma [^\circ]$	Wskaźnik przekroju warstwy skrawanej $K_A = b/a_p$							
	1,25		2,83		5		7,81	
	K_d	u	K_d	u	K_d	u	K_d	U
25	1.74	0.047	1.30	0.040	1.63	0.038	0.86	0.066
15	2.20	0.070	1.36	0.058	2.17	0.089	0.97	0.042
0	3.35	0.058	2.32	0.115	3.05	0.168	1.63	0.039
-10	2.41	0.111	1.68	0.092	2.52	0.088	0.97	0.041
-20	1.65	0.066	1.93	0.058	1.45	0.038	0.87	0.052

Dla przypadków skrawania swobodnego nie udało się zaobserwować żadnej prawidłowości. Znacznie silniejszy wpływ

* Zwiększenie współczynnika dynamiczności dla tego kąta we wszystkich przypadkach skrawania nieswobodnego można tłumaczyć utrudnionym usuwaniem wiórów gromadzących się przed narzędziem i potrzeba stosowania większych przyrostów siły skrawania dla oderwania kolejnej objętości tworzywa. Obserwacje obrazu skrawania potwierdzają tę hipotezę.

posiadają tutaj lokalne losowe zmiany własności mechanicznych materiału obrabianego.

W Tab. 5.7 i 5.8 przedstawiono zebrano wartości całkowitej pracy skrawania wyznaczonej jako pole pod wykresem $F_c(l)$ dla wszystkich badanych przypadków.

Tab. 5.7. Praca całkowita skrawania L_c dla skrawania swobodnego.

Kąt natarcia γ [°]	Wskaźnik przekroju warstwy skrawanej $K_A = b/a_p$							
	1,25		2,83		5		7,81	
	L_c [Nm]	u	L_c [Nm]	u	L_c [Nm]	u	L_c [Nm]	u
25	57,683	3.58	64,83	3.81	107,438	7.08	47,755	2.77
15	50,549	2.95	56,347	3.43	84,868	4.55	49,917	2.87
0	54,625	3.10	85,774	4.95	101,586	7.08	29,062	1.83
-10	62,397	4.01	91,512	5.25	131,788	8.37	56,632	3.65
-20	96,756	5.21	102,08	5.57	134,277	8.01	41,584	4.67

Tab. 5.8. Praca całkowita skrawania L_c dla skrawania nieswobodnego.

Kąt natarcia γ [°]	Wskaźnik przekroju warstwy skrawanej $K_A = b/a_p$							
	1,25		2,83		5		7,81	
	L_c [Nm]	u	L_c [Nm]	u	L_c [Nm]	u	L_c [Nm]	u
25	84,615	5.00	70,659	4.18	81,531	4.82	76,634	4.53
15	67,279	3.98	70,039	4.14	86,082	5.09	87,214	5.15
0	101,313	5.99	95,786	5.66	66,58	3.93	98,204	5.80
-10	84,713	5.01	79,224	4.68	100,94	5.96	67,282	3.98
-20	61,622	3.64	116,174	6.87	86,467	5.11	76,725	4.53

Oslabienie wytrzymałości materiału narzucone warunkami skrawania swobodnego sprawia, że wartości pracy skrawania L_c zwłaszcza dla największego współczynnika kształtu $K_A = 7,81$ są znacznie mniejsze od obserwowanych dla skrawania nieswobodnego.

5.2. Granulacja wiórów powstających podczas skrawania

Wyniki pomiarów granulacji bezpośrednio przeliczano na procentowy udział wiórów nieprzydatnych do recyklingu i ujęto w tablicy 5.9. a następnie przedstawiono na wykresach – Rys. 5.5 – 5.8.

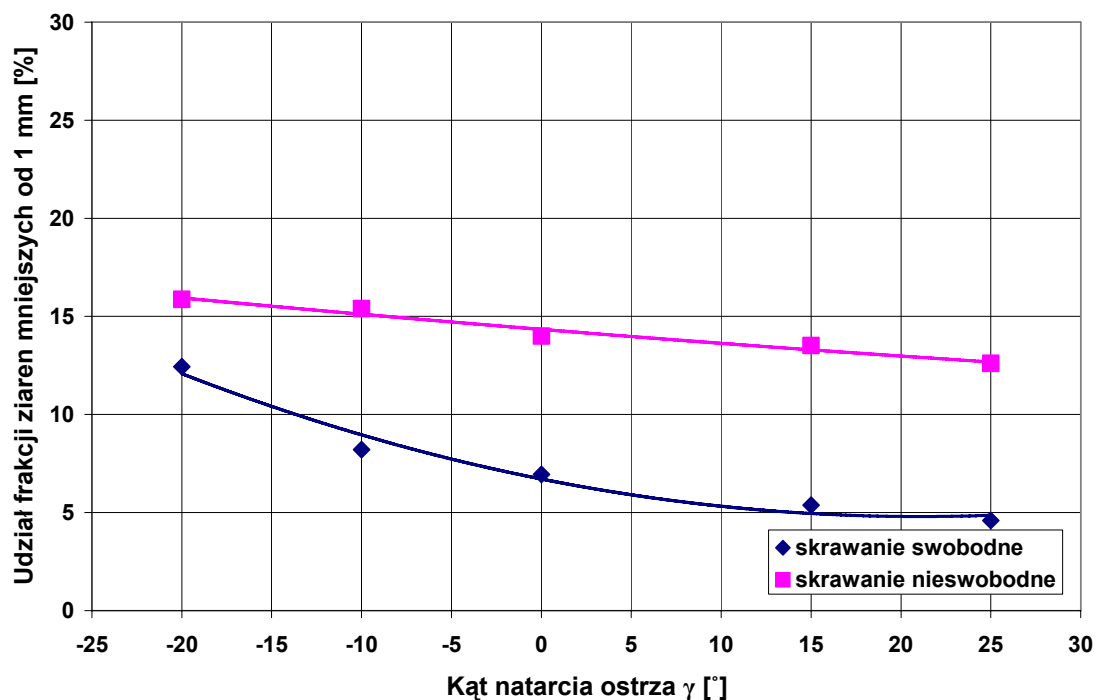
We wszystkich przypadkach skrawania swobodnego dla kątów natarcia ostrza dodatnich i ujemnych i wszystkich K_A - współczynników kształtu przekroju warstwy skrawanej (w porównaniu ze skrawaniem nieswobodnym) obserwowano zawsze mniejszą ilość wiórów niezdatnych do recyklingu.

Tab. 5.9. Procentowy udział u_v wiórów ≤ 1 [mm] (nieprzydatnych do recyklingu).

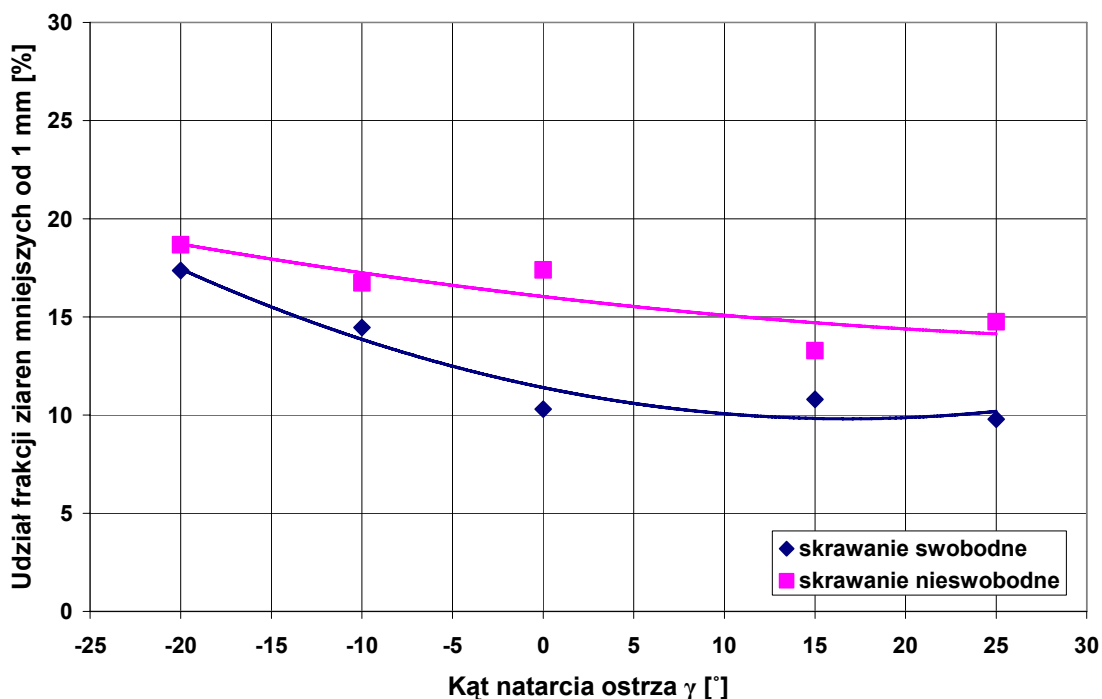
Kąt natarcia γ [°]	Skrawanie swobodne				Skrawanie nieswobodne			
	Wskaźnik przekroju warstwy skrawanej K_A							
	1,25	2,83	5	7,81	1,25	2,83	5	7,81
	u_v [%]	u_v [%]	u_v [%]	u_v [%]	u_v [%]	u_v [%]	u_v [%]	u_v [%]
25	4.6	9.79	11.85	15.06	12.6	14.75	21.6	25.98
15	5.37	10.8	11.84	18.71	13.51	13.29	14.3	24.13
0	6.94	10.3	16.06	24.26	13.99	17.39	17.97	27.48
-10	8.21	14.46	24.69	27.25	15.39	16.73	27.32	29.86
-20	12.44	17.37	20.04	24.12	15.87	18.68	20.81	24.47

Różnice w procentowym udziale u_{vI-IV} wiórów niezdatnych do recyklingu w przypadku skrawania swobodnego i u_{vI-IV} obliczonego dla przypadku skrawania nieswobodnego sięgały 10 % (Rys. 5.5 do 5.8).

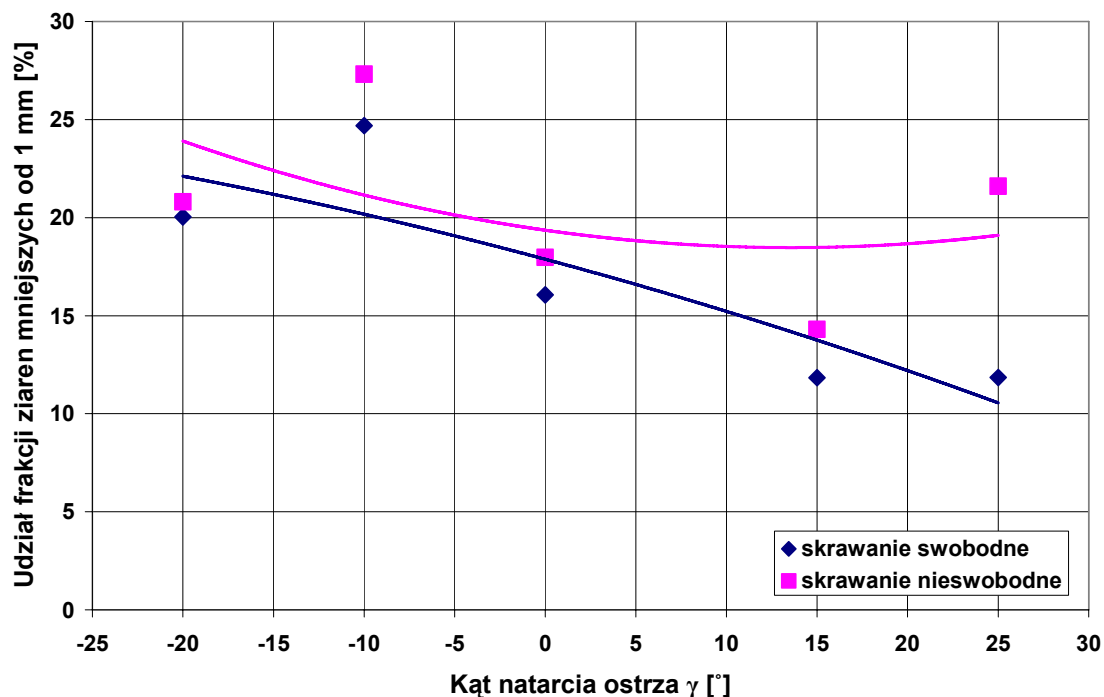
Uwaga: przebieg zależności $u_v = f(\gamma)$ podczas analizy regresji przybliżano krzywymi drugiego stopnia, przy współczynniku korelacji większym od 0,9.



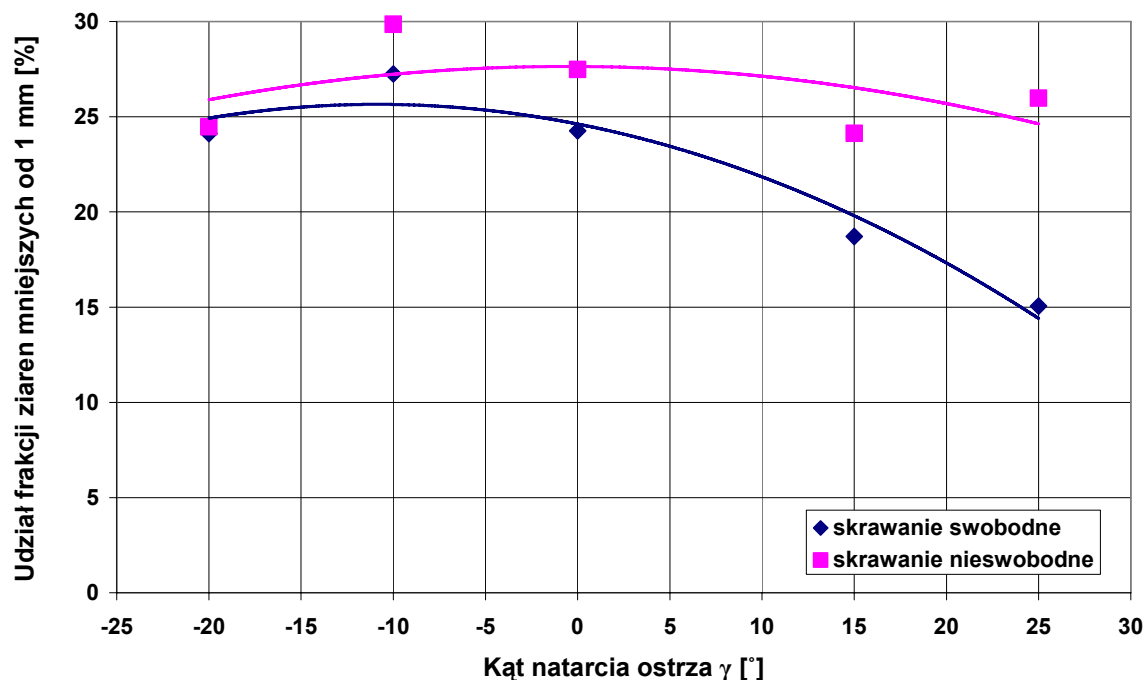
Rys. 5.5. Procentowy udział ziaren ≤ 1 mm w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika kształtu przekroju warstwy skrawanej $K_A = 1,25$.



Rys. 5.6. Procentowy udział ziaren ≤ 1 mm w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika kształtu przekroju warstwy skrawanej $K_A = 2,83$.



Rys. 5.7. Procentowy udział ziaren ≤ 1 mm w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika kształtu przekroju warstwy skrawanej $K_A = 5$.



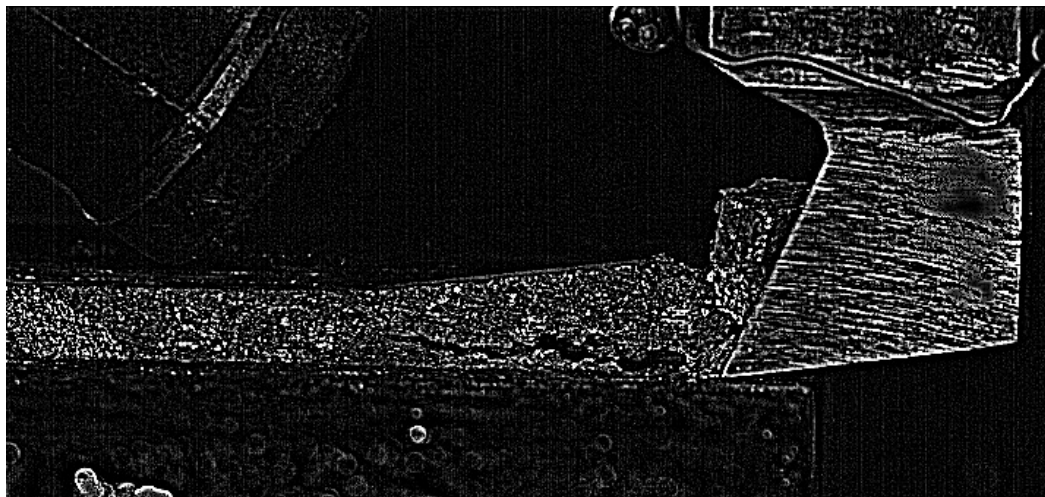
Rys. 5.8. Procentowy udział ziaren ≤ 1 mm w zależności od sposobu skrawania dla wskaźnika kształtu przekroju warstwy skrawanej $K_A = 7,81$.

5.3. Mechanizm powstawania wiórów przy obróbce tworzywa węglowego WPW-65

Oddzielanie odkształcanego materiału obrabianego może dokonać się bez naruszania jego spójności (rozdzielenie materiału następuje wzdłuż powierzchni największych naprężeń tnących) bądź przez naruszenie spójności materiału przebiegające prostopadłe do kierunku największego z naprężeń głównych (naprężenia rozciągające) i jest typowe dla materiałów kruchych. Zachowanie się materiału w procesie rozdzielania zależy też od stanu naprężenia [21]. Sposób rozdzielania materiału w procesie skrawania może być oceniany na podstawie kąta poślizgu Φ , zawartego pomiędzy kierunkiem przesuwu narzędzia a płaszczyzną oddzielania wióra. Wprowadzenie zwiększonego nacisku w strefie skrawania przez ujemną geometrię kąta natarcia ostrza może przyczyniać się do bardziej „plastycznego” zachowania się tworzywa węglowego, zwiększenia kąta poślizgu Φ . Większym wartościom kąta poślizgu Φ odpowiadają, mniejsze objętościowo fragmenty odłupywanego materiału, co posiadać może istotne znaczenie dla ekologicznej oceny jakości procesu. Niejednorodności tworzywa węglowego WPW będą w istotny sposób modyfikowały sam mechanizm powstawania wióra. W przypadku obróbki tworzyw węglowych istotne znaczenie dla sposobu rozdzielania posiada tekstura materiału obrabianego uzyskana w procesie wytwarzania półfabrykatu tworzywa węglowego. Zagęszczanie przez prasowanie z późniejszym spiekaniem może dawać efekt podobny do walcowania stali, gdzie układające się zgodnie z kierunkiem odkształcania warstwy materiału wraz z wtrąceniami mogą być przyczyną późniejszych pęknięć lamelarnych [5].

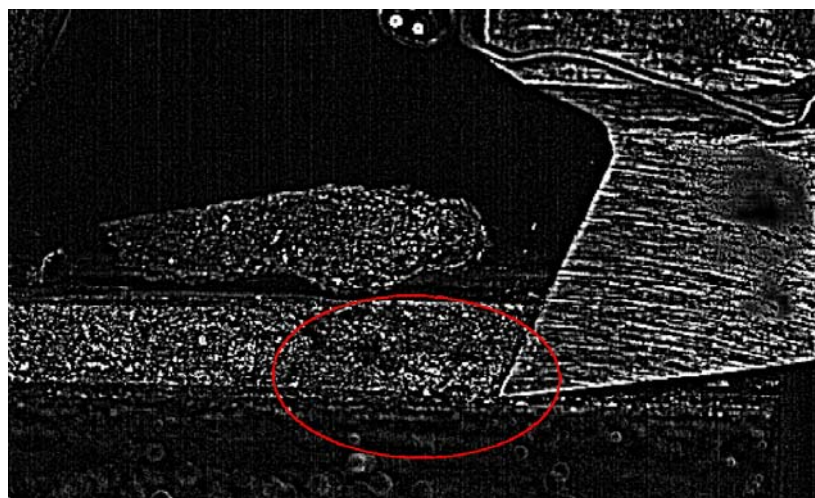
Prowadzone obserwacje zarejestrowanych na video obrazów mechanizmu oddzielania potwierdziły hipotetyczne przypuszczenia. W przypadku obróbki tworzywa węglowego narzędziem o kącie $\gamma = + 25^\circ$ oddzielanie materiału odbywało się zazwyczaj stycznie do kierunku

przesuwu narzędzia co sprzyjało powstawaniu dużych wiórów fragmentowych (Rys. 5.9).



Rys. 5.9. Oddzielanie się odłamków tworzywa węglowego WPW-65 – skrawanie swobodne ostrzem o kącie natarcia $\gamma = 25^\circ$ przy wskaźniku przekroju warstwy skrawanej $K_A = 1,25$.

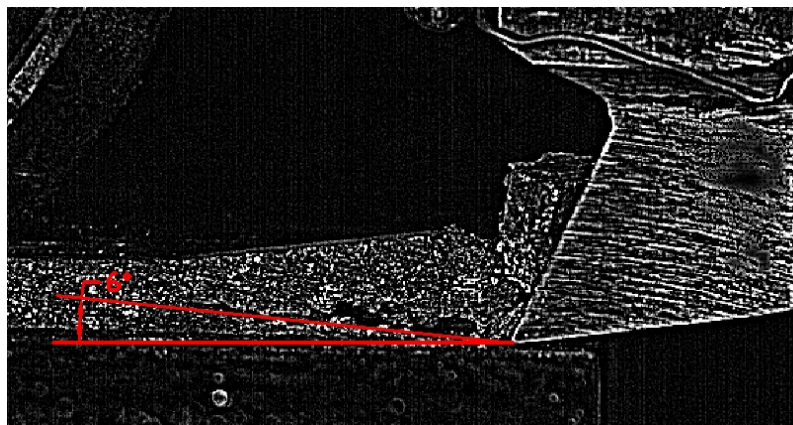
Miedzy kolejnymi oddzieleniami większych cząstek tworzywa miało miejsce usuwanie pozostałych fragmentów materiału pozostającego na drodze narzędzia skrawającego (Rys. 5.10), czy ewentualne ich prasowanie do momentu kolejnego odłupania większej objętości.



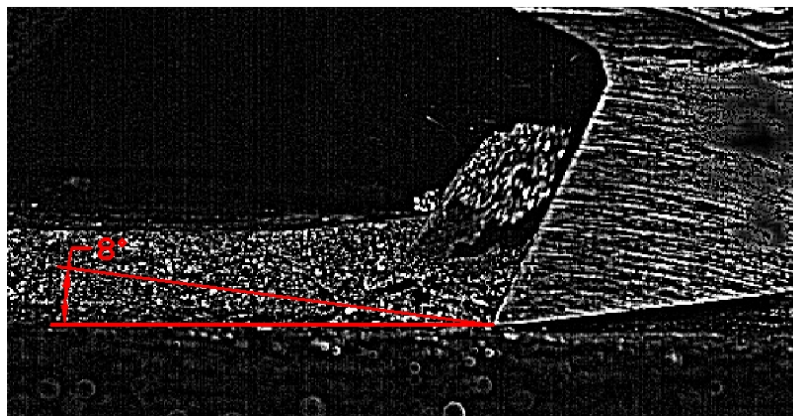
Rys. 5.10. Usuwanie pozostałych fragmentów materiału pozostającego na drodze narzędzia skrawającego.

Z uwagi na niejednorodność budowy tworzywa i anizotropię jego własności proces był wysoce aperiodyczny. Można, to było zaobserwować zarówno na wykresach – siły skrawania F_c oraz przemieszczenia narzędzia $x(t)$ i zarejestrowanym obrazie odspajanego materiału. Kierunek przebiegu płaszczyzny rozdziału fragmentów materiału od calizny określany kątem poślizgu Φ zmieniał się w niewielkim zakresie, a jego wartość średnia obliczana dla całej długości skrawanej próbki wynosiła $6,75^\circ$ - Rys. 5.11. Oddzieleniu dużych fragmentów towarzyszyło występowanie wysokich chwilowych wartości siły skrawania F_c - Rys. 5.12.

a)



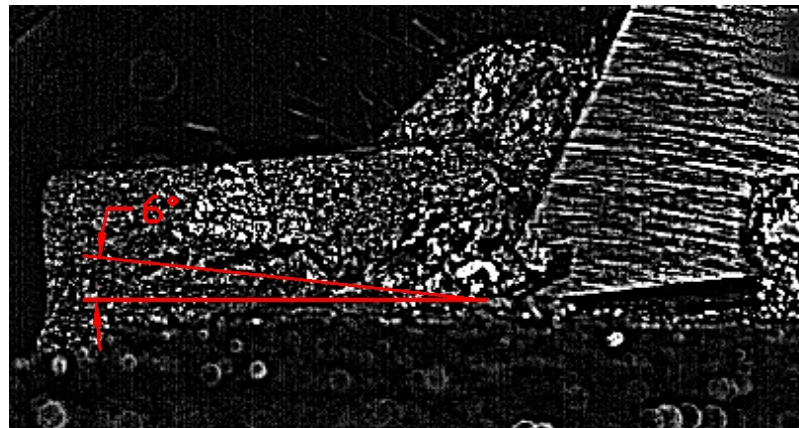
b)



c)

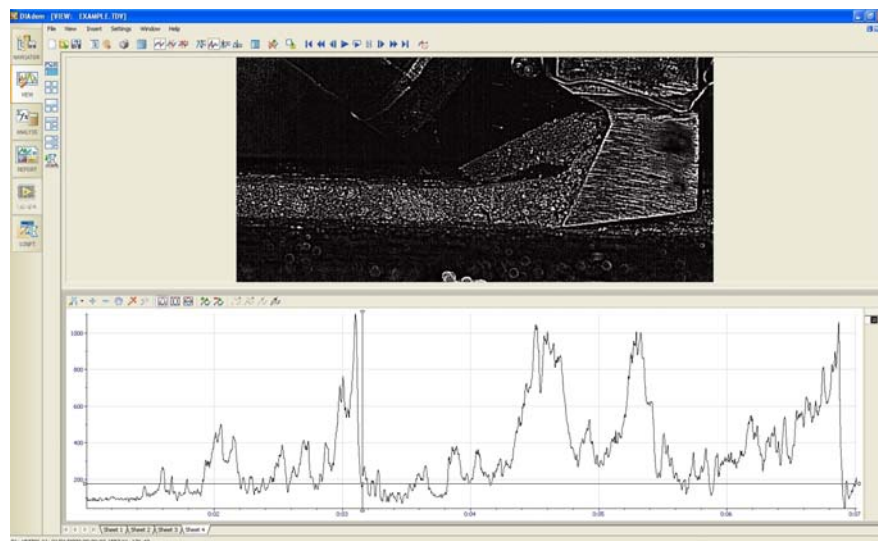


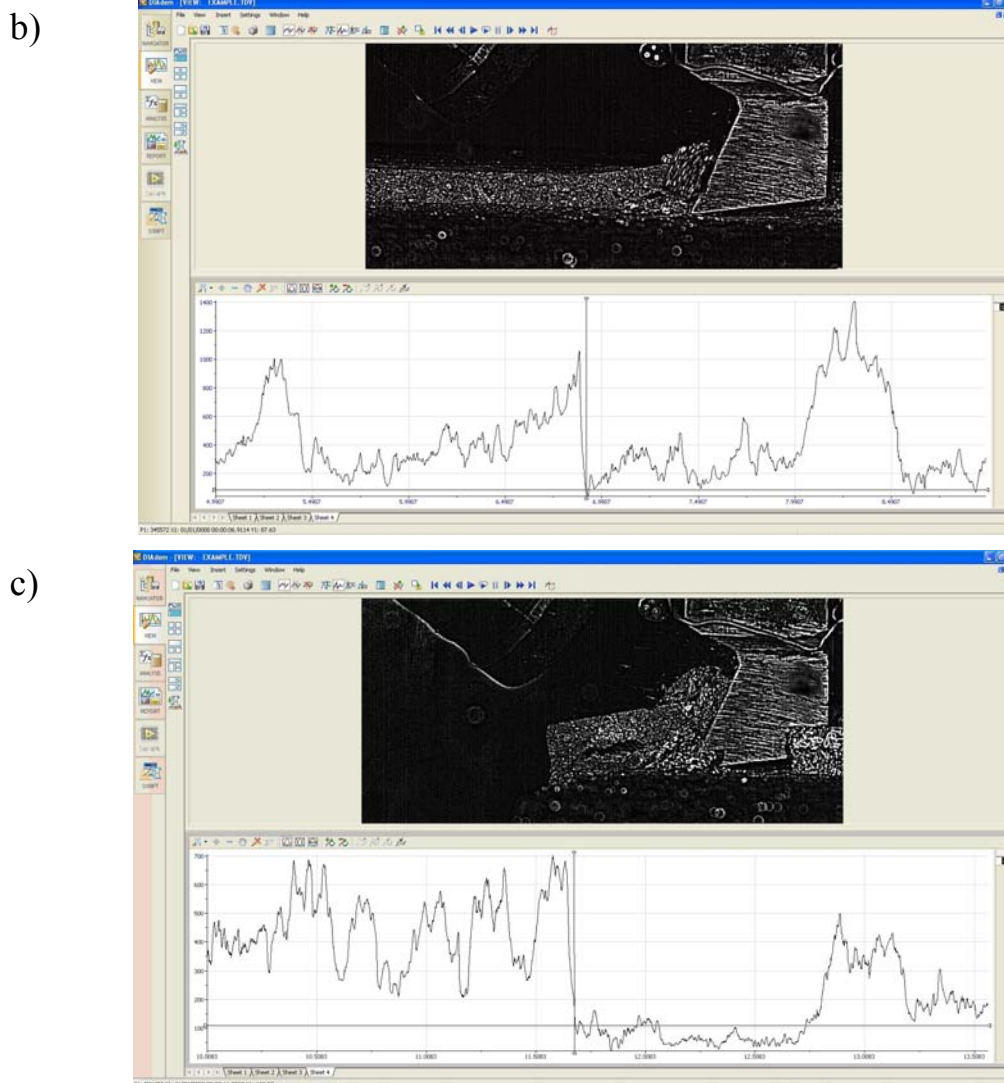
d)



Rys. 5.11. Wyznaczenie kąta poślizgu w danej chwili czasowej przebiegu dla kąta natarcia ostrza skrawającego $\gamma = 25^\circ$: a) w 1,5 [s], b) w 4 [s], c) w 6 [s], d) w 12 [s].

a)

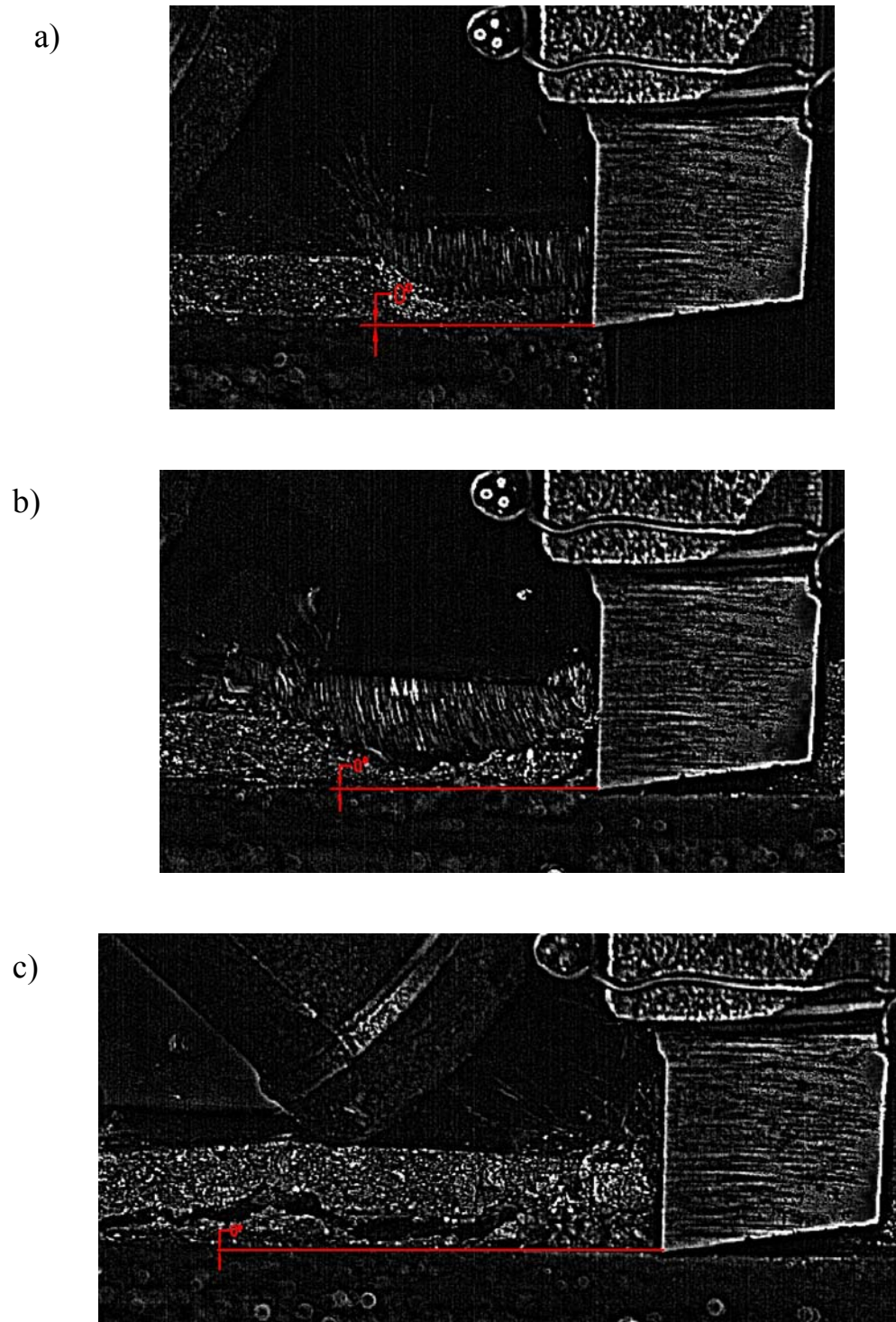




Rys. 5.12. Przebieg siły skrawania przed i po oddzieleniu dużych kawałków podczas skrawania nożem o kącie natarcia ostrza $\gamma = 25^\circ$ w chwilach czasowych: a) 3,2 [s], b) 7 [s], c) 12 [s].

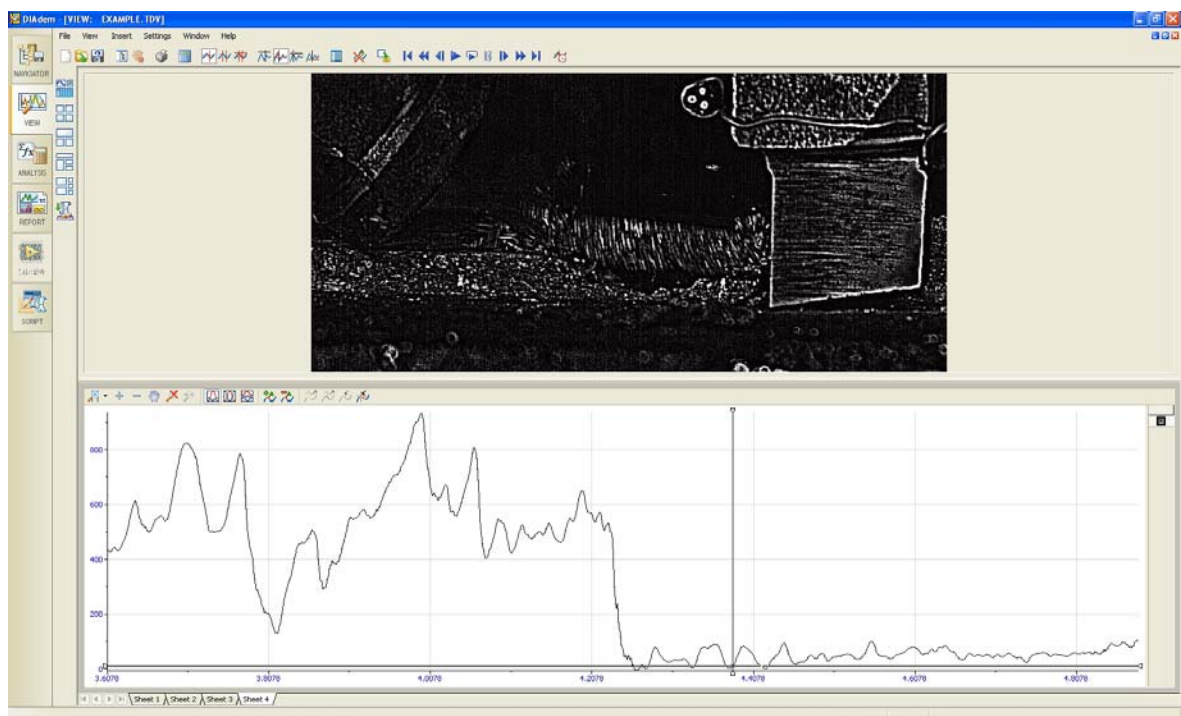
Wraz ze zmianą kąta natarcia γ (jego zmniejszaniem) następowały zmiany w mechanizmie fragmentacji tworzywa węglowego. Podczas skrawania z kątem $\gamma = 0^\circ$ większy udział prasowania materiału oddzielanego od calizny powodował zwiększenie głównej składowej siły skrawania F_c (jej wartości średniej i maksymalnej) (Tab. 5.1 do 5.4, Rys. 5.1 do 5.4). Na rys. 5.13 a) i b) można zaobserwować odrywanie się kawałków materiału w wyniku przekroczenia dopuszczalnych naprężeń na rozerwanie. Powstające pęknięcie propaguje w materiale

prostopadle do powierzchni natarcia. Natomiast odspojone kawałki materiału wyrzucane są prostopadle do propagacji pęknięcia.

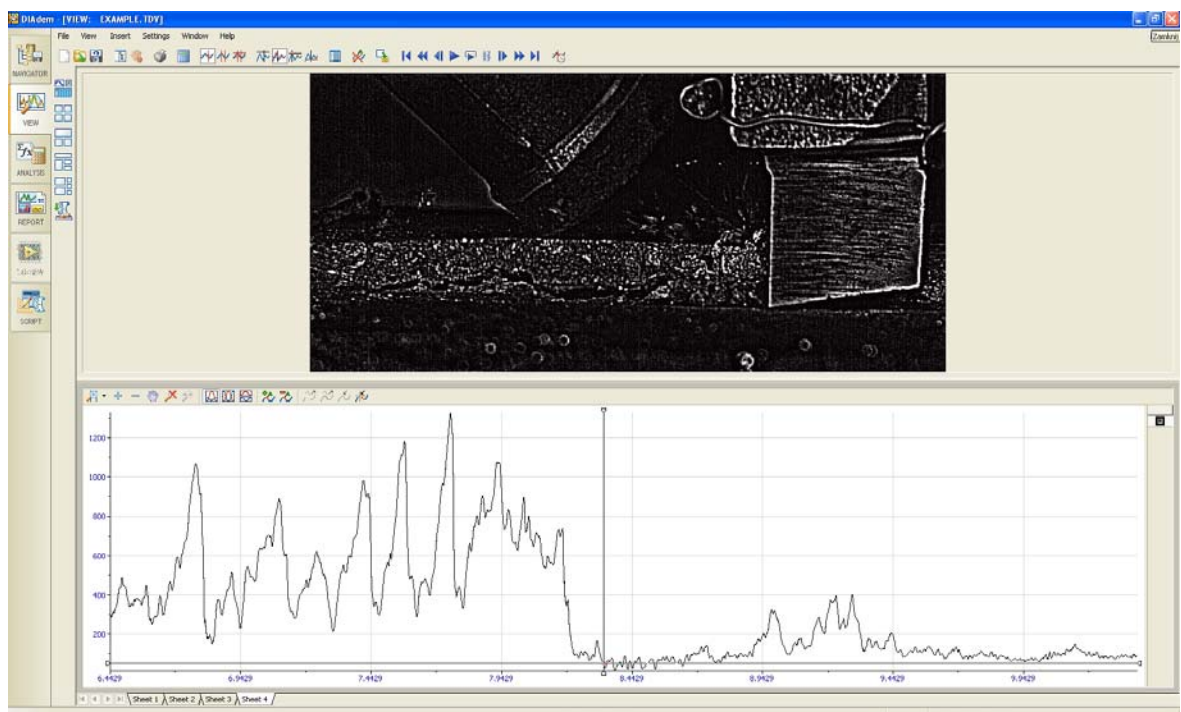


Rys. 5.13. Powstawanie podczas skrawania pęknięć typu lamelarnego w tworzywie WPW-65. Pęknięcia w chwilach przebiegu a) w 1 [s] , b) w 4,5 [s], c) w 8,5 [s] powstały przez połączenie pod działaniem siły skrawania wad materiałowych ułożonych pod powierzchnią prasowanego materiału.

a)



b)



Rys. 5.14. Przebieg siły skrawania przed i po oddzieleniu dużych kawałków podczas skrawania nożem o kącie natarcia ostrza $\gamma = 0^0$: a) w 4,5 [s], b) w 8,5 [s].

Wraz ze zmniejszaniem się wartości kąta γ następowały istotne zmiany w mechanizmie powstawania wiórów.

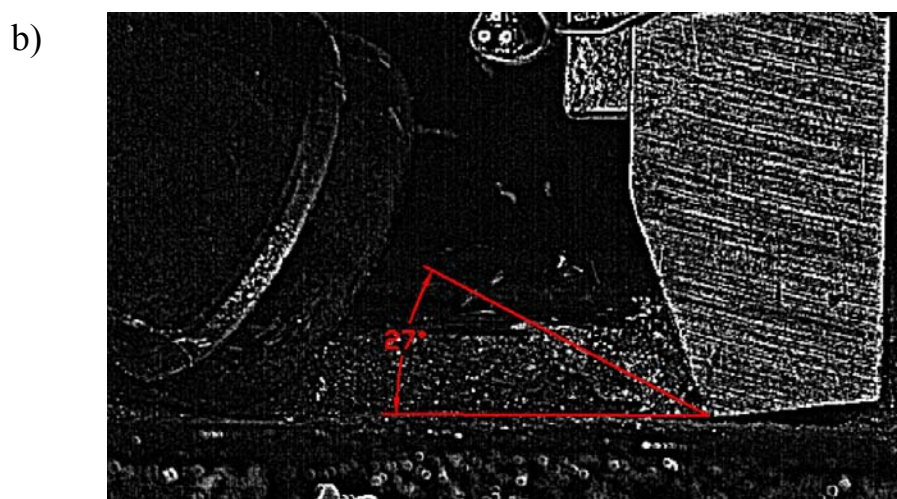
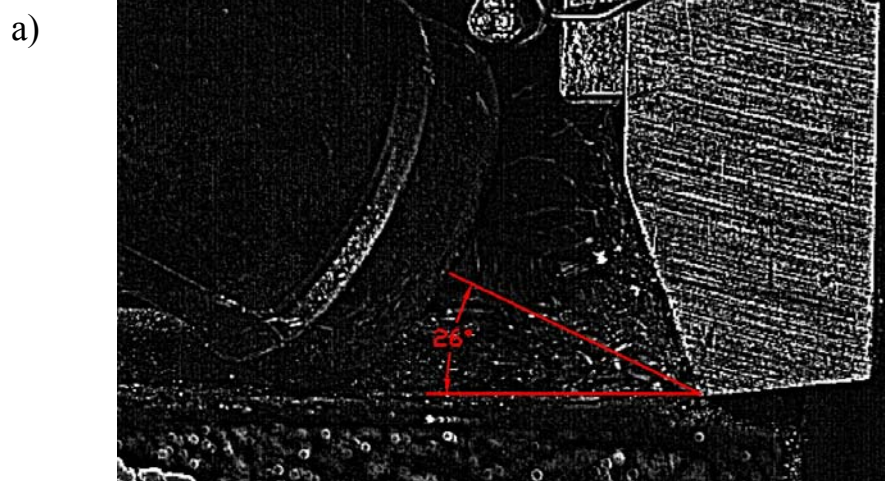
Po przejściu do $\gamma = -20^{\circ}$ przebieg skrawania różnił się już zasadniczo od opisywanego przy kącie $\gamma = 25^{\circ}$. Postępująca zmiana charakteru procesu skrawania wyrażała się wzrostem kąta Φ (jego wartości średniej Tab. 5.10 – Rys. 5.15) oraz obserwowanej ilości odspojen wiórów na długości próbki.

Tab. 5.10. Wartości średnie kąta poślizgu Φ w zależności od kąta natarcia ostrza γ i sposobu skrawania ($K_A = 1,25$).

Nr	Kąt natarcia ostrza γ	Kąt poślizgu Φ	
		Skrawanie swobodne	Skrawanie nieswobodne
1	25°	$6,75^{\circ}$	-
2	0°	0°	0°
3	-20°	27°	-

Tab. 5.11. Ilość odspojen wiórów zarejestrowana na długości próbki.

Kąt natarcia γ [°]	Skrawanie swobodne				Skrawanie nieswobodne			
	Wskaźnik przekroju warstwy skrawanej K_A							
	1,25	2,83	5	7,81	1,25	2,83	5	7,81
25	2110	2181	3614	2065	2557	2538	2940	2606
-20	2686	3228	4093	2061	2501	4270	3402	3235



Rys. 5.15. Wyznaczenie kąta poślizgu dla kąta natarcia ostrza skrawającego $\gamma = -20^\circ$:
a) w 0,6 [s], b) w 2 [s], c) w 10 [s]

Analizując cyfrowy obraz procesu skrawania można było zaobserwować, jak zmiana sposobu skrawania ze swobodnego na nieswobodne oraz kąta natarcia ostrza γ zmienia mechanizm procesu skrawania. Przy dodatnich kątach natarcia γ narzędzie odrywa duże fragmenty tworzywa WPW w nieregularnych odstępach czasu, a następnie usuwa drobne pozostałe elementy, które znajdują się na drodze narzędzia. Przy ujemnych kątach γ maleją wielkości usuwanych fragmentów tworzywa WPW w procesie skrawania, a sam proces przebiega w sposób bardziej regularny niż w przypadku skrawania narzędziem o dodatnim kącie natarcia γ . Interesujący jest przebieg procesu dla zerowego kąta natarcia. W przypadkach kąta poślizgu Φ (Tab. 5.10), obserwuje się występowanie wartości ekstremalnych właśnie dla tego kąta*.

5.4. Energetyczne wskaźniki procesu skrawania

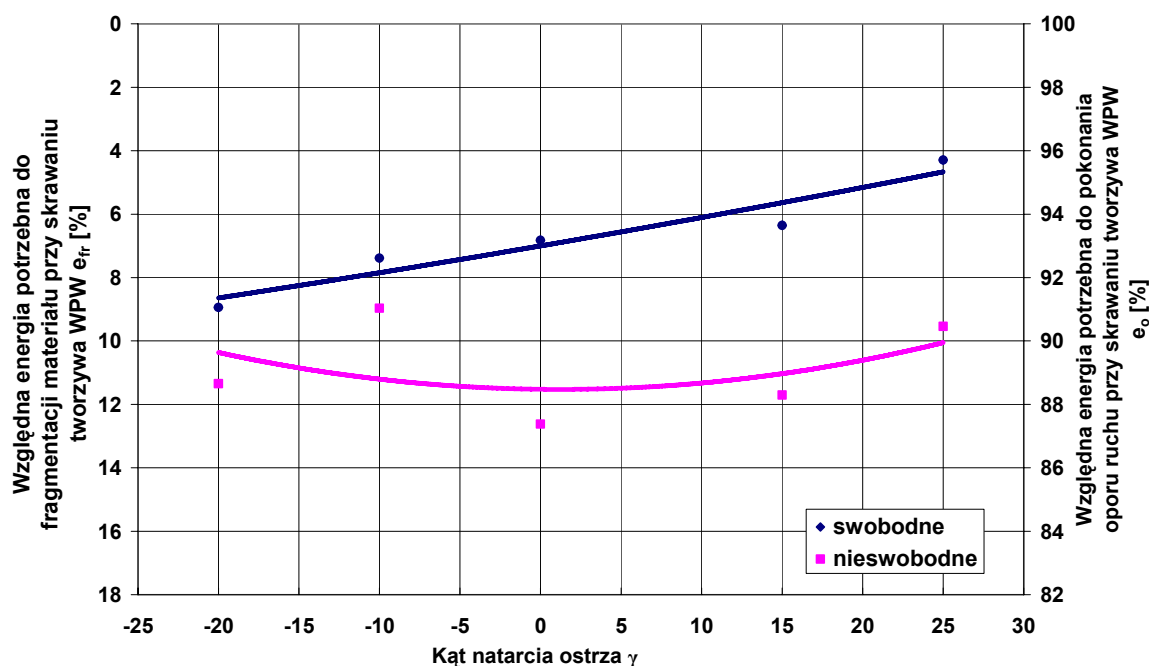
Na podstawie wyznaczonych przy użyciu programu Microsoft Excel wartości energii pojedynczych fragmentacji, obliczano sumaryczną energię fragmentacji ΣE_{fri} oraz względną energię fragmentacji (wyrażaną w procentach) jako stosunek sumarycznej energii fragmentacji do całkowitej pracy skrawania L_c (z Tab. 5.7 i Tab. 5.8). Wyniki obliczeń przedstawiono w Tab. 5.12 i na Rys. 5.16 do 5.19. Na wykresach naniesiono również skalę względnej pracy (w %) potrzebnej do pokonania oporów ruchu przy skrawaniu tworzywa WPW – 65 określaną jako udział ΣL_{oi} w całkowitej pracy skrawania L_c .

*Analizie mechanizmu skrawania materiałów kruchych narzędziami o kącie natarcia zerowym zostaną poświęcone kolejne badania w ramach planowanego międzywydziałowego projektu badawczego.

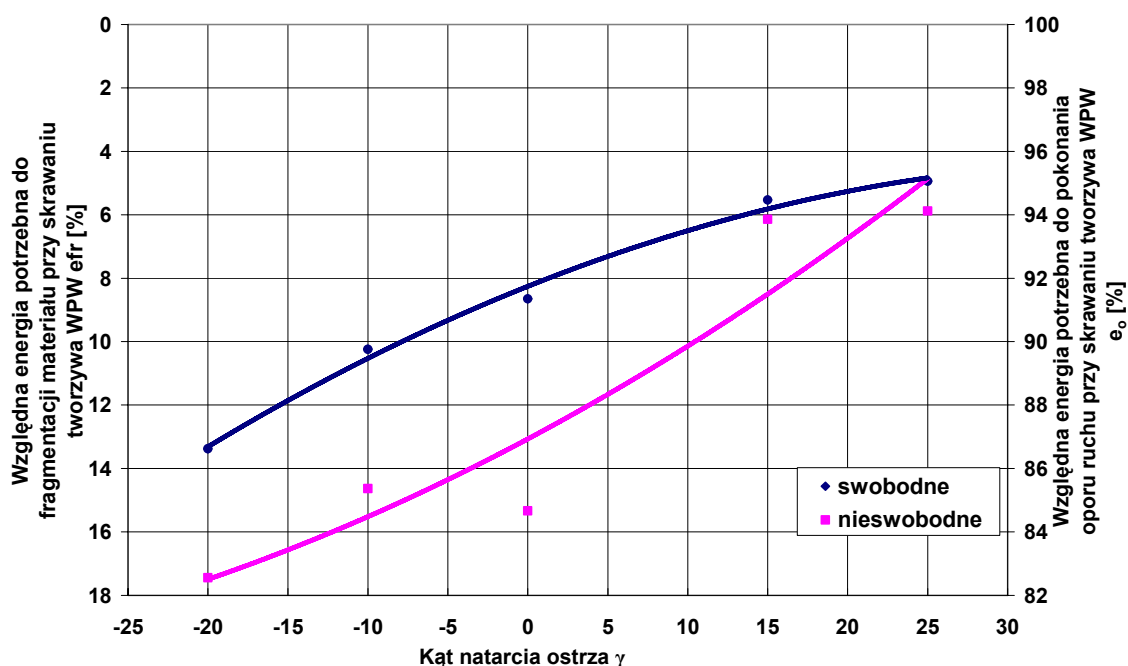
Tab. 5.12. Wartość energii fragmentacji E_{fr} w zależności od kąta natarcia γ i wskaźnika przekroju K_A dla skrawania swobodnego i nieswobodnego.

Kąt natarcia γ [°]	Skrawanie swobodne				Skrawanie nieswobodne			
	Wskaźnik przekroju warstwy skrawanej K_A							
	1,25	2,83	5	7,81	1,25	2,83	5	7,81
	E_{fr} [Nm]	E_{fr} [Nm]	E_{fr} [Nm]	E_{fr} [Nm]	E_{fr} [Nm]	E_{fr} [Nm]	E_{fr} [Nm]	E_{fr} [Nm]
25	2,46	3,19	7,53	1,07	8,07	4,16	7,90	1,98
15	3,20	3,11	5,98	0,73	7,88	4,30	8,50	4,13
0	3,71	7,40	11,73	0,60	12,78	14,69	9,60	7,44
-10	4,59	9,36	18,01	1,20	8,96	11,59	14,33	4,47
-20	8,64	13,64	14,05	2,01	6,99	20,27	8,53	4,55

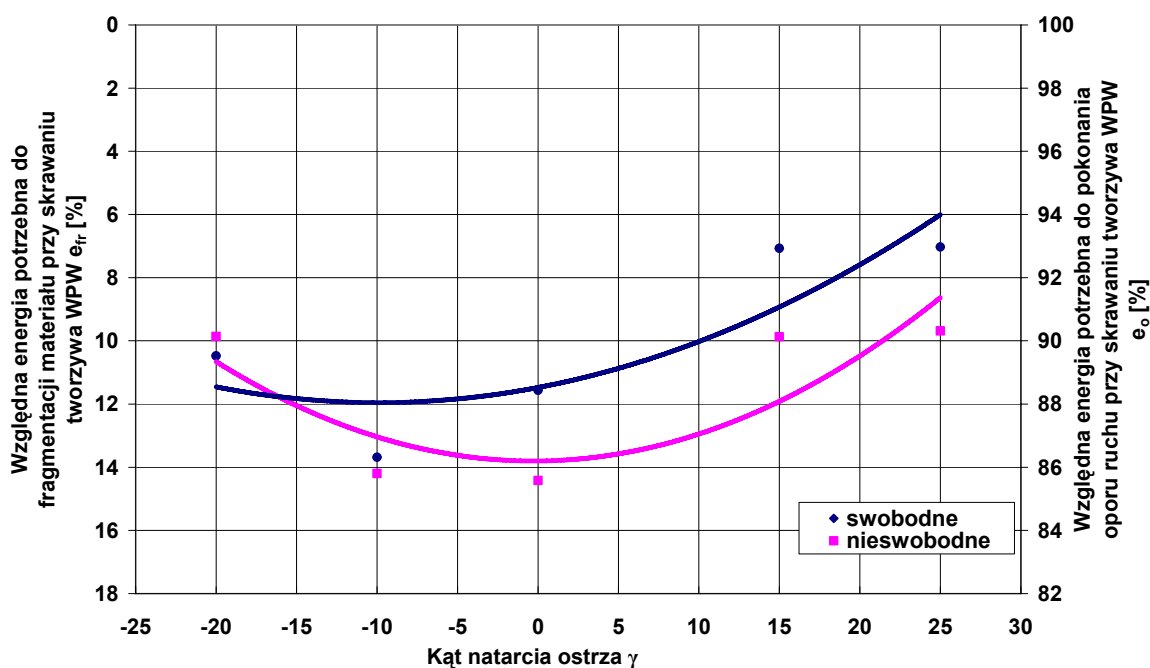
Badania wykazały, że udział energii fragmentacji w całkowitej energii potrzebnej do wykonania pracy skrawania jest nieznaczny i wynosi od 1% do 20%. Wartość energii potrzebnej do wykonania pracy skrawania jest niewielka co wynika z niskich własności wytrzymałościowych tworzywa węglowego i nie stanowi istotnego ograniczenia przy doborze warunków procesu. Z ekologicznego punktu widzenia najistotniejszy jest wskaźnik względnego udziału fragmentacji w całkowitej energii procesu.



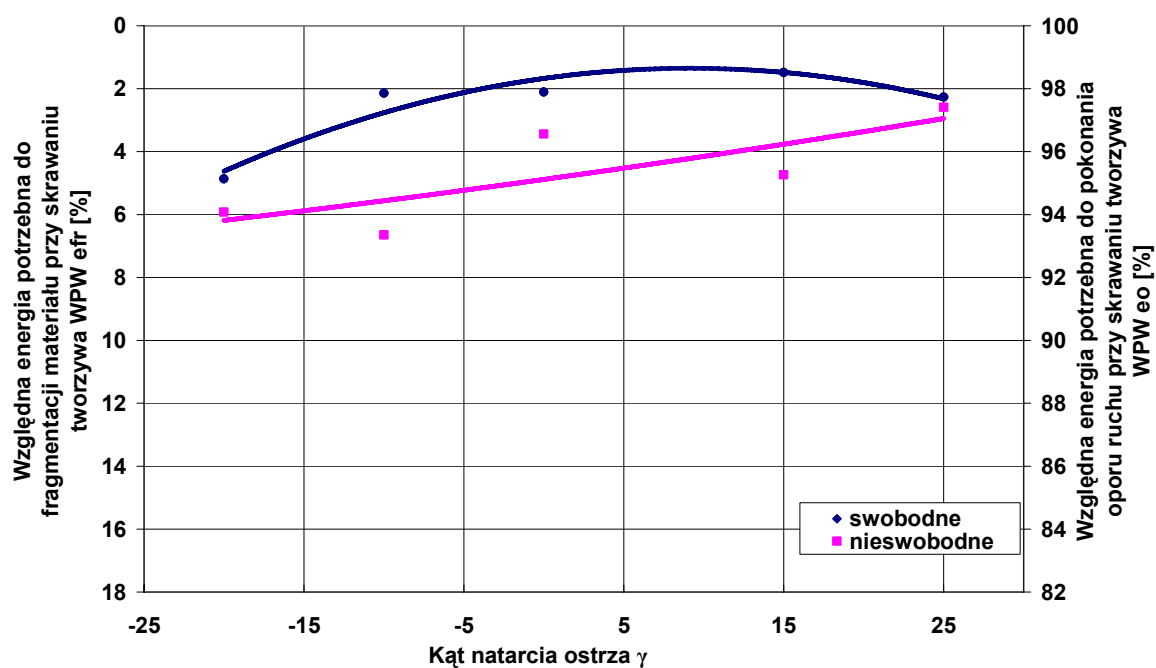
Rys. 5.16. Wykres względnej energii e_{fr} oraz względnej energii e_o dla skrawania swobodnego i nieswobodnego dla wskaźnika przekroju $K_A = 1,25$.



Rys. 5.17. Wykres względnej energii e_{fr} oraz względnej energii e_o dla skrawania swobodnego i nieswobodnego dla wskaźnika przekroju $K_A = 2,83$.



Rys. 5.18. Wykres względnej energii e_{fr} oraz względnej energii e_o dla skrawania swobodnego i nieswobodnego dla wskaźnika przekroju $K_A = 5$.



Rys. 5.19. Wykres względnej energii e_{fr} oraz względnej energii e_o dla skrawania swobodnego i nieswobodnego dla wskaźnika przekroju $K_A = 7,81$.

6. Podsumowanie otrzymanych wyników badań

W trakcie badań stanowiskowych mających stanowić podstawę dla doboru korzystnych warunków obróbki zaobserwowano silnie losowy przebieg głównej składowej siły skrawania $F_c(t)$ i przemieszczeń $x(t)$. Z uwagi na związane z tą losowością wysokie niepewności pomiarowe ostateczne konkluzje wynikające z uzyskanych rezultatów mają charakter bardzo ogólny - oceniano w pierwszej kolejności tendencje w przebiegu zjawisk obserwowanych w trakcie obróbki. Do opisu wykorzystano szereg znanych wskaźników procesu skrawania jak: wartość średnia głównej siły skrawania - F_c , opór właściwy skrawania - k_c , praca skrawania L_c , współczynnik dynamiczności pracy K_d , oraz nowe wskaźniki wynikające ze specyficznych potrzeb ekologicznych obróbki tworzyw węglowych WPW jak procentowy udział frakcji wiórów o wymiarach mniejszych od 1 mm w całkowitej objętości odpadów skrawania, względny udział energii potrzebnej do fragmentacji (lub procentowy udział energii fragmentacji w całkowitej pracy skrawania). Ostatecznie można było podać następujące obserwacje dotyczące analizowanego procesu:

- odnośnie do mechanizmu procesu odspajania materiału w procesie obróbki tworzywa WPW – 65

- odspajanie materiału odbywa się w sposób losowy, można zaobserwować zarówno odspajanie przebiegające prostopadle do kierunku maksymalnych naprężeń głównych (rozciągających) jak i odspojenia przebiegające wzdłuż płaszczyzny maksymalnych naprężeń ścinających. Bardzo duży wpływ wywierają lokalne właściwości obrabianego materiału, zwłaszcza tekstura powstająca w procesie wytwarzania półfabrykatu, która sprzyja powstawaniu pęknięć ukierunkowanych wzdłuż płaszczyzn osłabień materiału (Rys. 5.11, 5.13, 5.15).

Obserwowano zmienne tendencje do tworzenia dużych (wymiar ziarna $> 1\text{mm}$) lub małych (wymiar ziarna $< 1\text{mm}$) odłamków

materiału, zmiany w udziale energii fragmentacji w stosunku do całkowitej pracy skrawania i zmiany we wskaźnikach siłowych (F_c , k_c) procesu.

- odnośnie do wpływu geometrii ostrza skrawającego na proces skrawania.

- obserwuje się istotny wpływ kąta natarcia ostrza na mechanizm odspajania. Wzrost kąta natarcia γ sprzyja powstawaniu warunków korzystnych dla większej granulacji wiórów powstających w procesie skrawania (Rys. 5.5 do 5.8). Zmniejszenie kąta natarcia ostrza sprzyja powstawaniu mniejszych fragmentów obrabianego materiału, rośnie siła i opór właściwy skrawania (Tab. 5.3 i 5.4), ale zmniejsza się dynamiczność obróbki wyrażana współczynnikiem K_d (Tab. 5.5, 5.6).

- odnośnie do wpływu sposobu obróbki (skrawanie swobodne i nieswobodne).

- odsłonięcie obszaru skrawanego przy skrawaniu swobodnym osłabia znacznie materiał obrabiany. Rośnie wpływ lokalnych defektów budowy tworzywa na jego wytrzymałość. Wyraża się to zmniejszeniem wartości siły skrawania F_c (i oporu właściwego skrawania k_c) dla całego zakresu kątów γ dla przypadku skrawania swobodnego, przy czym różnice w wartości siły rosną wraz ze wzrostem kąta γ . Wpływ sposobu skrawania jest wyraźny również dla fragmentacji odłamków odspojonego materiału. Rośnie udział większej frakcji odpadu w procesie skrawania swobodnego, a udział energii fragmentacji w całkowitej pracy skrawania ulega zwiększeniu (Tab. 5.12, Rys. 5.16 do 5.19).

- odnośnie do wpływu współczynnika kształtu przekroju warstwy skrawanej K_A na powstawanie wióra.

- wpływ współczynnika kształtu na mechanizm procesu skrawania i jego wskaźniki zależy w pierwszej kolejności od sposobu skrawania. Większa smukłość przekroju warstwy skrawanej w przypadku skrawania swobodnego (większe K_A) powoduje znaczne osłabienie materiału skrawanego, który jest związany z calizną na

niewielkim odcinku szerokości warstwy skrawanej. Istnienie lokalnych osłabień materiału na trasie przemieszczającego się narzędzia wpływa w decydującym stopniu na mechanizm skrawania, wartość siły skrawania czy opór właściwy skrawania.

Spośród wielkości rejestrowanych w trakcie badań oraz na podstawie wymagań przemysłowych co do ekologicznego aspektu obróbki, wybrano wskaźniki dla celów analizy optymalizacyjnej. Ze względu na małe w porównaniu z innymi materiałami siły skrawania oraz bardzo wysoką trwałość poprawnie dobranych narzędzi (powyżej 480 minut –jak obserwowano w warunkach przemysłowych), wskaźniki takie jak opory właściwe, czy praca właściwa skrawania, będą miały znaczenie marginalne, natomiast wskaźniki granulacji i energii fragmentacji (wiążącej się z tworzeniem powierzchni swobodnej odspojeń wiórów) zostaną wykorzystywane przy podejmowaniu decyzji o zalecanych do stosowania warunkach procesu obróbki tworzywa WPW – 65. Będą wskaźnikami jakości dopasowania warunków obróbki do wymagań przemysłowych.

7. Dobór optymalnych parametrów obróbki tworzyw węglowych WPW-65

Jak stwierdzono w rozdziale 6 pracy podstawowe wskaźniki jakości procesu obróbki tworzywa węglowego WPW-65, to granulacja produktów skrawania i udział energii fragmentacji w całkowitej energii procesu. W przypadku granulacji wielkością ziarna jakie może być uznane za poprawne ze względów ekologicznych jest ziarno o wymiarze charakterystycznym $b_f \geq 1 \text{ mm}$. Odnośnie energii procesu, to proces obróbki powinien być prowadzony przy możliwie najmniejszym wydatku energii traconej na fragmentację materiału w procesie skrawania.

$$L_c = E_{fr} + L_o$$

gdzie: L_c - praca całkowita wydatkowana przy skrawaniu,

E_{fr} - energia fragmentacji,

L_o - praca na pokonanie oporów ruchu narzędzia w materiale obrabianym.

Celem uniezależnienia się od wartości bezwzględnych energii fragmentacji i frakcji ziaren o wymiarze $b_f \leq 1 \text{ mm}$, posłużono się unormowanymi wskaźnikami jakości:

- względną energią fragmentacji

$$e_{fr} = \frac{E_{fr}}{L_c} \cdot 100[\%]$$

- względnym udziałem frakcji ziaren o wymiarze charakterystycznym $b_f \leq 1 \text{ mm}$

$$u_v = \frac{M_{<1}}{M_c} \cdot 100[\%]$$

gdzie:

$M_{<1}$ - masa frakcji ziaren o wymiarze charakterystycznym
 $b_f < 1 \text{ mm}$,

M_c - całkowita masa wszystkich frakcji.

Poszukiwanie najlepszego rozwiązania będzie prowadzone przy założeniu, że zarówno energia fragmentacji jak i masa frakcji nie nadającej się do recyklingu będzie najmniejsza z możliwych.

Dla określenia optymalnych warunków obróbki tworzyw węglowych WPW-65 zastosowano metodę minimaksymalizacji [8, 54]. Metoda ta pozwala na wskazanie rozwiązania – w rozpatrywanym przypadku wyboru jednego (lub kilku) z badanych zestawów warunków obróbki najlepiej spełniającego (ych) założoną funkcję celu.

Zadanie optymalizacyjne w metodzie minimaksowej, w odniesieniu do zadania poszukiwania najlepszego zestawu warunków obróbki tworzywa WPW – 65, może być wyrażone jako poszukiwanie takiego zestawu warunków obróbki opisanego punktem $\bar{x}$ o współrzędnych $(r_1, r_2, \dots, r_n)$ należącego do obszaru X_0 znajdującego się w przestrzeni R^n , który to punkt realizuje minimum funkcji celu.

$$\bar{x} \in X_0, \quad X_0 \neq \emptyset$$

W przypadku obróbki tworzywa WPW – 65 zadanie upraszcza się do poszukiwania punktu $\bar{x}$ o współrzędnych (u_v, e_{fr}) w przestrzeni R^2 .

Zapis matematyczny zadania optymalizacyjnego można przedstawić następująco w odniesieniu do funkcji celu $Q(\bar{x})^*$:

$$Q(\bar{x}) \rightarrow Q_{opt}(\bar{x}) = Q_{min},$$

* Funkcja celu jest sumą ważonych wskaźników e_{fr} i u_v i jest została zapisana następująco:

$$Q(x) = a_1 u_v + a_2 e_{fr}$$

Współczynniki a_1 i a_2 są przyjętymi wagami wskaźników u_v i e_{fr} spełniającymi warunki

$$a_1 + a_2 = 1, \quad 1 \geq a_1, a_2 \geq 0.$$

Wagi będą uzależnione od wymagań przemysłowych Zakładu.

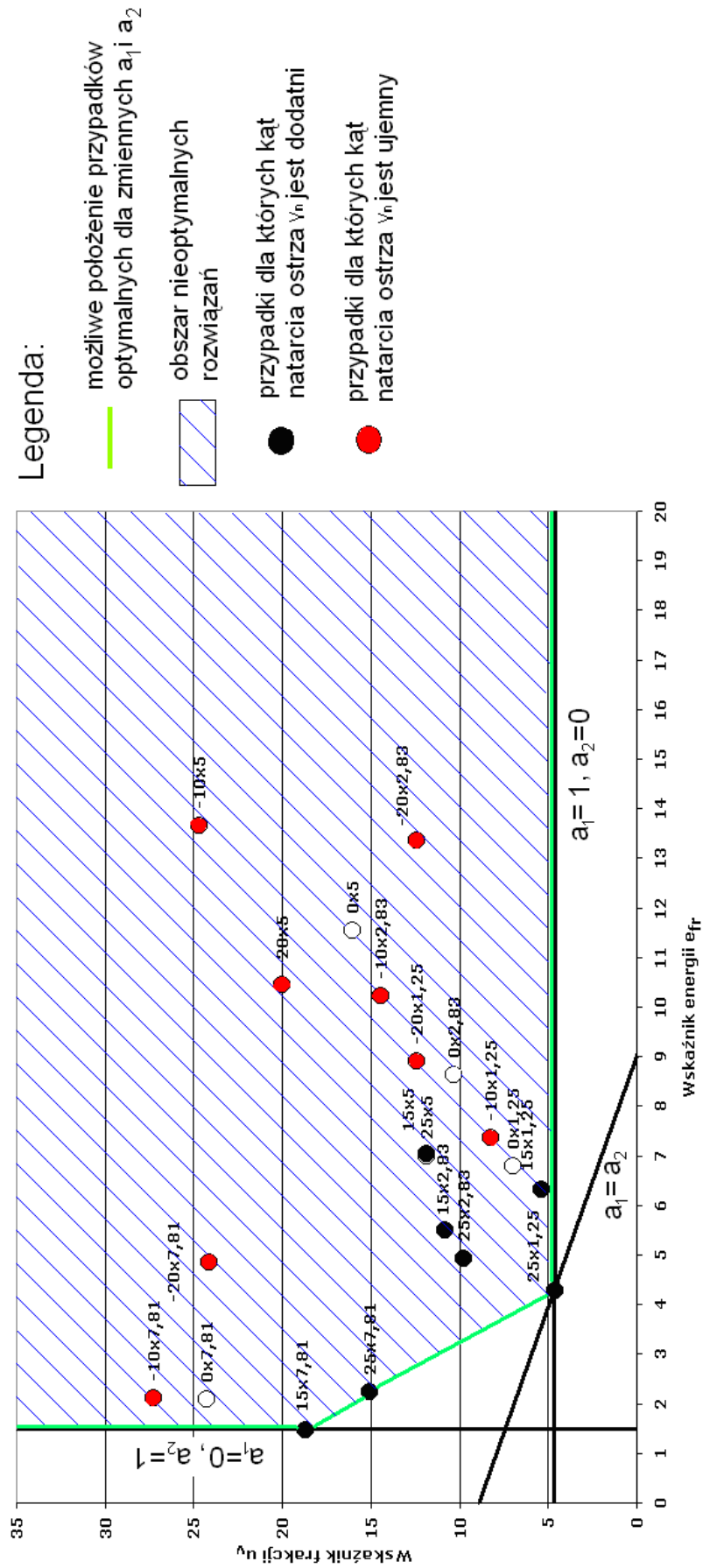
Ograniczeniami obszarowymi funkcji celu są $e_{fr} < 100$ i $u_v < 100$.

$$Q(\bar{x}) \rightarrow \min\{a_1 u_v + a_2 e_{fr}\}$$
$$(u_v, e_{fr}) \in X_0 = \{X_0 \subset R^2, u_v, e_{fr} < 100\}.$$

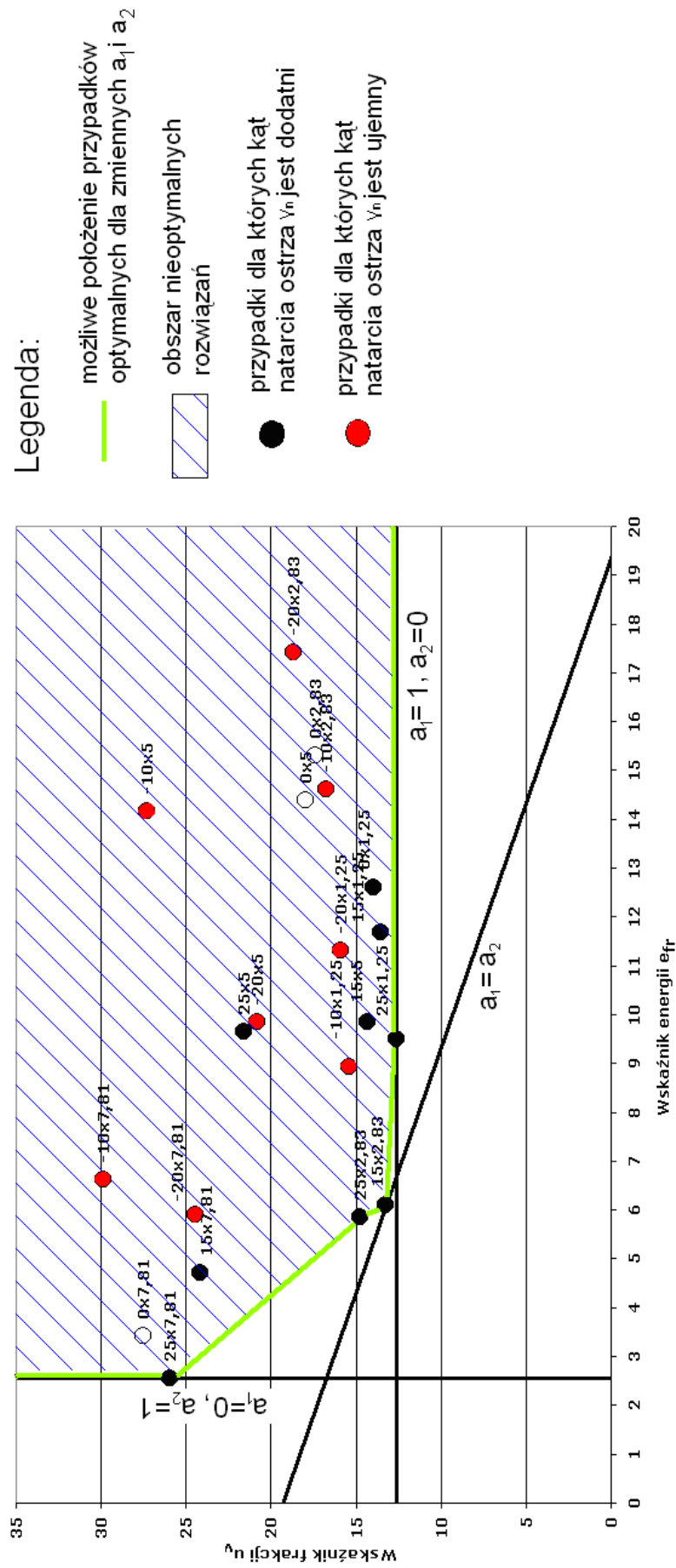
Takie zadanie optymalizacyjne najprościej rozwiązuje się metodą graficzną na płaszczyźnie wytyczonej współrzędnymi u_v i e_{fr} . Na rysunkach 7.1 i 7.2 przedstawiono zbiory X_0 - odpowiednio dla przypadków skrawania swobodnego i nieswobodnego.

Na wykresach Rys. 7.1 i 7.2 naniesiono przypadki szczególne funkcji celu dla $a_1 = 1, a_2 = 0$ i $a_1 = 0, a_2 = 1$, które ograniczają pole możliwych rozwiązań zadania optymalizacyjnego. Zieloną linią łamaną połączono wszystkie punkty odpowiadające możliwym rozwiązaniom tego zadania. Pole rozwiązań nieoptymalnych zakreskowano linią niebieską. Punkty zaczerńnione odpowiadają rozwiązaniom uzyskanym przy pracy narzędzia o dodatnim kącie natarcia γ , a punkty zaczerwienione odpowiadają rozwiązaniom pracy narzędzia z ujemnym kątem natarcia γ , pozostałe punkty odpowiadają pracy narzędzia z zerowym kątem natarcia γ .

Już pobieżna analiza przedstawionych na rysunkach rezultatów badań wskazuje na to, że geometria narzędzia, która spełnia najlepiej funkcje celu odpowiada dodatnim wartościom kąta natarcia ostrza γ . Jest, to szczególnie dobrze widoczne dla przypadku skrawania nieswobodnego, dla których czynnik losowych własności materiału w znacznie mniejszym stopniu wpływa na uzyskane wyniki skrawania.



Rys. 7.1 Wykres przedstawiający optymalne parametry dla skrawania swobodnego



Rys. 7.2 Wykres przedstawiający optymalne parametry dla skrawania nieswobodnego

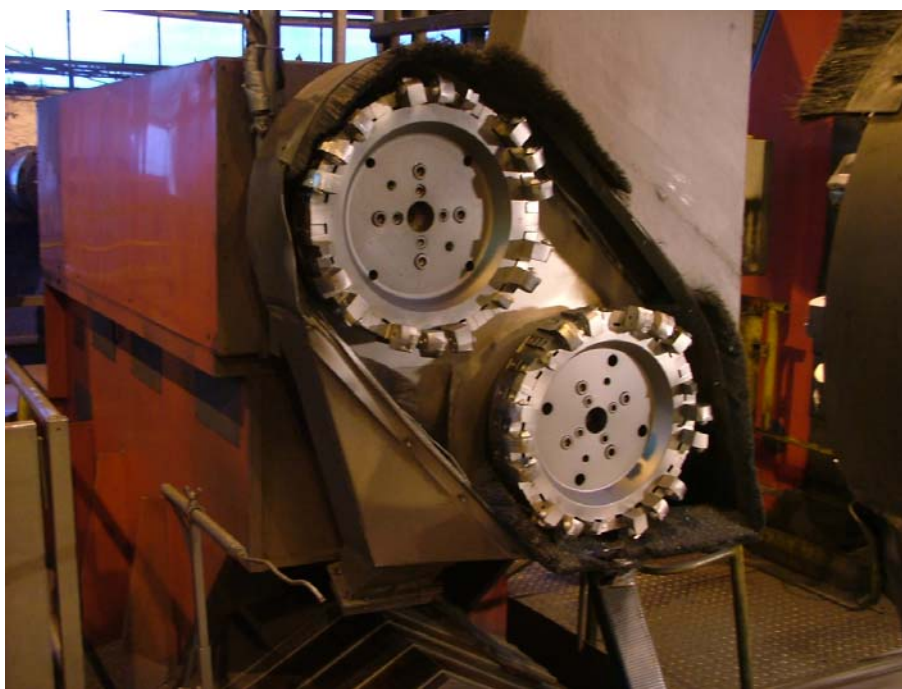
Istotne znaczenie dla przebiegu procesu skrawania tworzyw węglowych WPW-65 posiada również wskaźnik kształtu przekroju warstwy skrawanej K_A ($K_A = b/a_p$, gdzie: b – jest posuwem, a a_p – głębokością skrawania). W obu przypadkach skrawania (skrawanie swobodne i nieswobodne) najlepsze wyniki uzyskano z reguły dla współczynnika kształtu przekroju $K_A = 1,25$ lub $2,83$.

Reasumując najlepsze warunki skrawania uzyskiwano dla następujących przedziałów wartości:

$$\gamma = 15^\circ - 25^\circ,$$

$$K_A = 1,25 - 2,83,$$

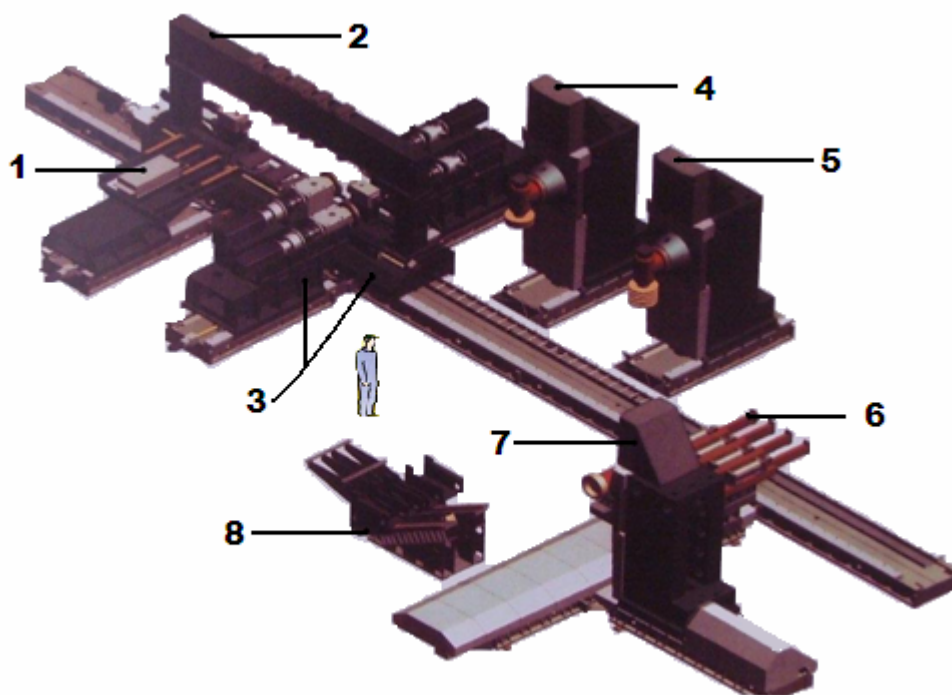
i takie wartości zostały wykorzystane przy realizacji projektu konstrukcji specjalnych narzędzi (rys. 8.3) do obróbki tworzyw węglowych WPW-65 wykonywanych dla SGL Carbon Polska S.A. w Raciborzu [34, 35, 36]*.



Rys. 7.3. Zdjęcie przedstawiające specjalne narzędzie skrawające w zakładzie SGL Carbon Polska S.A. w Raciborzu.

* Przeniesienie wyników laboratoryjnych uzyskiwanych w specyficznych warunkach badawczych było możliwe dzięki charakterystycznej budowie narzędzi przemysłowych (duże gabaryty głowic i podziałek międzyzębnych).

Narzędzia te zamocowane są na jednostkach frezarskich do obróbki powierzchni bocznych bloków (Rys. 7.4 poz. 3) znajdujących się na sterowanej komputerowo automatycznej linii obróbkowej LBK – 400 (Rys. 7.4).



Rys. 7.4. Automatyczna linia obróbkowa LBK – 400 [35]: 1 - urządzenie załadowcze, 2 - stół roboczy, 3 - jednostki frezarskie do obróbki powierzchni bocznej bloków, 4 - jednostka frezarska do obróbki zgrubnej rowka prądowego, 5 - jednostka frezarska do obróbki rowków na powierzchniach bocznych bloków, 6 - stół przesuwny z możliwością obrotu, 7 - centrum obróbkowe do frezowania powierzchni czołowych bloku oraz obróbki wykańczającej rowka prądowego i rowków na powierzchni czołowej, 8 - urządzenie wyładowcze.

Podczas prób przemysłowych linii specjalnych narzędzi z dobraną na podstawie prób geometrią narzędzia i kształtem warstwy skrawanej zbierano i klasyfikowano granulometrycznie odspojony podczas procesu obróbki materiał. Procentowa zawartość frakcji o ziarnach przydatnych do recyklingu przekraczała zawsze 75 % badanego materiału.

8. Wnioski końcowe

Wnioski ogólne

- Proces tworzenia wióra przy obróbce tworzywa WPW-65 ma charakter powtarzalny, ale nieokresowy. Obserwuje się losowy przebieg tworzenia wiórów i dużą zmienność charakterystyk procesu. Losowość procesu zależy od parametrów technologicznych obróbki. Charakterystyki procesu: siła główna skrawania - $F_c(t)$ czy przemieszczenie narzędzia $x(t)$ są realizacjami stacjonarnych, ergodycznych procesów losowych.
- Zaproponowana metoda badań umożliwiła obserwację mechanizmu skrawania tworzyw węglowych i analizę wpływu parametrów technologicznych na sposób powstawania wiórów.
- Wprowadzenie wskaźników energetycznych do analizy procesu skrawania materiałów kruchych pozwoliło na lepszą ocenę przebiegu skrawania tworzywa WPW-65 i wybór optymalnego zestawu warunków obróbki z uwagi na ekologię procesu.
- Przeprowadzona analiza wyników badań uzasadnia postawioną tezę pracy, że na podstawie rzeczywistych charakterystyk procesu skrawania tworzyw węglowych, możliwy jest taki dobór warunków procesu skrawania, który zagwarantuje najlepsze spełnienie wymagań techniczno-ekologicznych.

Wnioski szczegółowe

- Rozdrobnienie wiórów przy obróbce tworzyw węglowych w istotny sposób zależy od: sposobu skrawania, przekroju warstwy skrawanej oraz kąta natarcia ostrza,
- W całym zakresie badanych kątów natarcia ostrza i kształtów przekroju warstwy skrawanej wartość średnia siły skrawania jak i rozdrobnienie wiórów jest wyraźnie większe w przypadku skrawania nieswobodnego,
- Mechanizm tworzenia wióra w sposób istotny zależy od kąta natarcia ostrza i w zależności od jego wartości naruszenie spójności obrabianego tworzywa następuje w wyniku przekroczenia dopuszczalnych naprężeń na: rozrywanie czy ścinanie, co zostało potwierdzone analizą przebiegu linii odspojenia wióra,
- Traktując proces fragmentacji jako zbiór losowych impulsów energetycznych można było wyznaczyć całkowitą energię fragmentacji (na podstawie rozkładu energii fragmentacji $\mu(e_{fr})$ – zał. 3) i porównać ją z całkowitą energią procesu. Stwierdzono, że energia tracona (na pokonanie oporów ruchu) jest wielokrotnie większa od energii fragmentacji (5-100 krotnie),
- Udział energii fragmentacji w energii całkowitej procesu, przy obróbce WPW-65 zależy od kąta natarcia ostrza γ i kształtu przekroju warstwy skrawanej K_A oraz sposobu skrawania (swobodne, nieswobodne),
- Mniejszym wartościom kąta natarcia γ w przypadku obu sposobów skrawania odpowiada większe rozdrobnienie wiórów, zaś większym kątom natarcia wzrost frakcji dużych elementów w wiórze,
- Na podstawie założonych wymagań (minimalna granulacja i minimalna względna energia fragmentacji) dokonano wyboru warunków procesu obróbki, które najlepiej spełniały te kryteria.

I tak dla skrawania nieswobodnego niezależnie od przyjmowanych wag a_1 i a_2 najlepsze rezultaty uzyskiwano stosując narzędzia o dodatnim kącie natarcia ostrza γ w zakresie od 15° do 25° , przy kształcie warstwy skrawanej K_A zbliżonym do kwadratu K_A (1,25; 2,83). Dla skrawania swobodnego, nie posiadającego większego znaczenia praktycznego, rekomendowane wartości wynoszą odpowiednio: $\gamma = 15^\circ$ i $K_A = 1,25$ (przy założeniu jednakowej wagi a_1 przykładanej do granulacji i a_2 do udziału energii fragmentacji w energii całkowitej procesu).

Wnioski dotyczące dalszych badań

- W dalszym etapie badań, zostanie poszerzony obszar warunków prób, zwłaszcza w zakresie geometrii narzędzia: jego kątów, promieni naroża, pochylenia krawędzi skrawającej i innych. Pozwoli to na lepsze dopasowanie warunków obróbki do wymogów procesu skrawania tworzywa WPW – 65,
- Metodyka zastosowana w pracy przy badaniach skrawalności tworzywa węglowego WPW – 65 może znaleźć zastosowanie przy badaniach skrawalności innych materiałów kruchych. Mechanizm niszczenia tworzyw kruchych zależy od specyficznych właściwości obrabianego materiału, dlatego podejmując dalsze badania przewiduje się prowadzenie prób nad podstawowymi materiałami technicznymi kruchymi: ceramicznymi i naturalnymi,
- Tworzywo węglowe WPW – 65 jest materiałem o niskiej ścierności i dlatego zużycie narzędzi nie stanowiło istotnego problemu podczas prowadzonych badań. Jednak znaczna część materiałów kruchych charakteryzuje się silną ściernością i konieczne jest uwzględnienie tego czynnika w badaniach nad ich skrawalnością. Dalsze próby nad materiałami kruchymi będą

uwzględniać efekty zużycia i ich wpływ na przebieg procesu skrawania,

- W przyszłych badaniach zostanie zwiększona szybkość rejestracji obrazu (do około 2000 k/s). Dzięki szybszej rejestracji będzie można lepiej obserwować moment powstania pęknięcia i sposób jego propagacji w materiałach kruchych charakteryzujących się wysokimi prędkościami przebiegu pęknięć,
- Przewiduje się kontynuację badań nad energochłonnością procesu obróbki skrawaniem trudnoobrabialnych tworzyw kruchych w funkcji zmiennych warunków obróbki skrawaniem, ważnych dla wydajności procesu i żywotności narzędzi.

Literatura:

1. Armarego I. D. A., Brayn R. H.: Obrabotka Metallob Rezanjem. Maszinostroenie Moskwa 1977.
2. Banaszewski T.: Przesiewacze. Wydawnictwo Śląsk. Katowice 1990.
3. Bęben A.: Maszyny i Urządzenia Do Wybranych Technologii Urabiania Surowców Skalnych. Śląsk Wydawnictwo Naukowe. Katowice 1998.
4. Blaschke J.: Procesy Technologiczne W Przeróbce Kopalin Użytecznych. Wydawnictwo AGH. Kraków 1987.
5. Blum A., Niezgodziński T.: Pęknięcia Lamelarne. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji – BIP. Radom-Kraków 2007.
6. Chodura J.: Analiza przydatności wyników pomiarów skrawalności węgla kamiennego. Przegląd Górniczy nr 4. 1991. s. 15-19.
7. Chodura J.: Opór skrawania – parametrem charakteryzującym urabialność węgla. Przegląd Górniczy nr 5. 1993. s. 5-9.
8. Diemianow W. F., Małoziemow W. N.: Wstęp do metod minimaksymalizacji. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 1975.
9. Dmochowski J. : Podstawy Obróbki Skrawaniem. Państwowe Wydawnictwo Naukowe. Warszawa 1967.
10. Dopierała A., Kończak W., Wiśniewski M.: Narzędzia specjalne do obróbki spieków węglowych. Szkoła obróbki skrawaniem 1 „Obróbka skrawaniem wysoka produktywność”. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2007. s. 221-228.
11. Ernst H., Merchant M. E.: Chip Formation, Friction and High Quality Machined Surfaces, in “Surface Treatment of Metals”, American Society of Metals, New York, vol. 29, st. 299, 1941.
12. Evans I., Pomeroy C. D.: The strength, fracture and workability of coal. Pergamon Press. London 1966.

13. Evans I.: A theory of the mechanics of coal ploughing. Proc. Int. Symp. Of Min. Res. G. Clark. Pergamon Press, London 1962.
14. Evans I.: Basic Mechanics of the Point-Attack Pick. Colliery Guardian, May 1984.
15. Flizikowski J.: Rozdrabnianie tworzyw sztucznych. Wydaw. Uczelniane ATR. Bydgoszcz 1998.
16. Gawlik J., Karbowski K.: Matematyczne modelowanie procesu zużycia narzędzi skrawających : nadzorowanie stanu narzędzi. Monografia - Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki. Mechanika. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1998.
17. Gawlik J., Kielbas A.: Metody i narzędzia w analizie jakości wyrobów. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2008.
18. Gawlik J.: Prognozowanie stanu zużycia ostrzy narzędzi w procesie skrawania. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 1988.
19. Golec S., Kołodziej J., Krawczyk S., Skorupa A.: Automated In-line transfer milling tools for carbon blocks processing. Innovative and Integrated Manufacturing. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1999.
20. Gryboś R.: Teoria uderzenia w dyskretnych układach mechanicznych. PWN. Warszawa 1969.
21. Grzesik W.: Podstawy Skrawania Materiałów Metalowych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1998.
22. Instrukcja obsługi modułu kontrolno-pomiarowego LC-020-0812. Materiały Firmy Ambex.
23. Instrukcja Obsługi Modułu Kontrolno-Pomiarowego LC-020-0812. Warszawa 1992.
24. Instrukcja obsługi wzmacniacza ładunku CI 111.
25. Jakubiec W., Malinowski J.: Metrologia Wielkości Geometrycznych. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 2004.
26. Jonak J., Krauze K., Prostański D.: Analiza Przebiegu Urabiania Skał Kruchych Z Wykorzystaniem Transformaty Fouriera. Wybrane

- Problemy Rozwoju Maszyn Roboczych, Hutniczych I Ceramicznych. (AGH, WIMiR) Problemy Inżynierii Mechanicznej i Robotyki. Kraków 2002.
27. Jonak J., Podgórski J., Gajewski J.: Badania numeryczne wpływu wartości kąta natarcia ostrza na proces forowania wióra podczas skrawania materiałów kruchych. Eksploatacja i Niezawodność. PNT Towarzystwo Eksploatacyjne. Nr 4 (24)/2004. s. 5-8.
28. Jonak J.: Teoretyczne Podstawy Urabiania Skał Stożkowymi Nożami Obrotowymi. Wydawnictwa Uczelniane. Lublin 1998.
29. Jonak J.: Urabianie Skał Głowicami Wielonarzędziowymi. Śląsk Wydawnictwo Naukowe. Katowice 2001.
30. Kaczmarek J.: Podstawy Obróbki Wiórowej, Ściernej I Erozyjnej. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1970.
31. KISTLER Piezo – Instrumentation .
32. Klich A.: Niekonwencjonalne Techniki Urabiania Skał. Śląsk Wydawnictwo Naukowe. Katowice 1998.
33. Klonecki W.: Elementy statystyki dla inżynierów. Oficyna Wydaw. Politech. Wrocławskiej. Wrocław 1996.
34. Kołodziej J., Krawczyk S., Skorupa A., Brożek W.: Wpływ wybranych parametrów na siły skrawania przy frezowaniu czołowym tworzyw węglowych. Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Obróbka Materiałów”. Kraków 2000.
35. Kołodziej J., Krawczyk S., Skorupa A.: Nowa konstrukcja głowic frezarskich do obróbki węglowych bloków katodowych na automatycznej linii obróbkowej. Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Obróbka Materiałów”. Kraków 2000.
36. Kołodziej J., Skorupa A., Zagórski K.: Badania rozdrobnienia wiórów przy skrawaniu tworzyw węglowych. Karbo 4/2004. 2004.
37. Kołodziej J., Skorupa A.: Badanie mechaniki skrawania tworzyw węglowych. IV Ogólnokrajowa Konferencja Naukowo-Techniczna „Postępy w technice wytwarzania maszyn”. Kraków 2001. s.119.

38. Krauze K., Jankowski Z., Blaschke J.: Określenie wartości oporów urabiania dla noży styczno-obrotowych na podstawie badań laboratoryjnych. Eksploatacja i Niezawodność. PNT Towarzystwo Eksploatacyjne. Nr 4 (24)/2004. s. 9-14.
39. Krauze K., Kotwica K., Bochenek W.: Badanie oporów urabiania pojedynczymi narzędziami skrawającymi. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 1, 1996.. s.5-9.
40. Krauze K.: Analiza metod wyznaczania oporów skrawania noży zamocowanych na organie ślimakowym kombajnu ścianowego. Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa nr 1, 1989.
41. Krauze K.: Urabianie skał kombajnami ścianowymi : podstawy doboru i projektowania elementów frezujących. Wydawnictwo „Śląsk”. Katowice 2000.
42. Kryszicki W., Włodarski L.: Analiza matematyczna w zadaniach cz.1 i cz.2. Wydawnictwo Naukowe PWN. Warszawa 2004.
43. Lasota A., Rusek P.: O problemie optymalizacji pracy narzędzi udarowych. Archiwum Górnictwa tom XVII, 1972. s.395-406.
44. Lee E. H., Saaffner B. W.: The Theory of Plasticity Applied to a Problem of Machining. J.Appl. Mech., vol 18, nr 4, str 405. 1951.
45. Lowirson G. Ch.: Crushing and Grinding. Butterworths. London 1974.
46. Mac DUFF John N., Curreri John R.: Drgania w technice. PWT . Warszawa 1960.
47. Mantell C. L. : Elektrochemia Przemysłowa . Wydawnictwa Naukowo-Techniczne Warszawa 1965.
48. Miska S.: Zarys Mechaniki Zwiercania Skał. Wydawnictwo AGH. Kraków 1976.
49. Neffe S. : Elektrochemia i Chemiczne Utlenianie Materiałów Węglowych. WAT Warszawa 1989.
50. Nishimatsu Y.: The mechanics of rock cutting. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 9,261-270. 1972.

51. Oczóś K.: Kształtowanie Ceramicznych Materiałów Technicznych. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 1996.
52. Opolski T.: Urabianie Calizny Węglowej Narzędziami Skrawającymi. Śląsk Wydawnictwo Naukowe. Katowice 1965.
53. Opolski T.: Urabianie mechaniczne i fizyczne skał. Wydawnictwo „Śląsk”. Katowice 1982.
54. Ostwald M.: Podstawy optymalizacji konstrukcji. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej. Poznań 2003.
55. Perkal J. : Matematyka Dla Przyrodników i Rolników III. Państwowe Wydawnictwo Naukowe. Warszawa 1963.
56. Piotrowski J.: Pomiarowe zastosowanie analizy sygnałów. PWN. Warszawa 1991.
57. Podgórski J., Jonak J.: Numeryczne badania procesu skrawania skał izotropowych. Lubelskie Towarzystwo Naukowe. Lublin 2004.
58. Polański Z.: Metody optymalizacji w technologii maszyn. PWN. Warszawa 1977.
59. Polański Z.: Metodyka Badań Doświadczalnych. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków 1978.
60. Poradnik Inżyniera Obróbka Skrawaniem I. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa 1991.
61. Potts E. L. J., Shuttleworth P.: A study of ploughability of coal, with special reference to the effects of blade shape, direction of planing to the clat, paning Speer and the influence of water infusion. Trans. Inst. Min. Engr. London 1958.
62. Protasow I.: Razruszenie Gornych Porod. Izdatelstwo Moskovskogo Gosydarctwennogo Gornogo Ynuwersiteta. Moskwa 1995.
63. Protasow I.: Teoriceskije osnovy miechanizmw razruszenia Gornych Porod. Izdatelstwo Moskovskogo Gosydarctwennogo Gornogo Ynuwersiteta. Moskwa 1985.
64. Przybylski L., Miernikiewicz A.: Dobór Materiałów Na Ostrze Do Obróbki Tworzyw O Własnościach Ciernych Ze Spoiwem Węglowo-

- Grafitowym. Archiwum Technologii Budowy Maszyn Zeszyt 10. Poznań 1992.
65. Rusek P., Sokołowski P., Zagórski K.: Badanie skrawalności tworzyw węglowych WPW-65 i podobnych. Obróbka Skrawaniem Innowacje. 2008.
66. Rusek P., Zagórski K., Sokołowski P.: New approach to mechanism of carbon composites machining. 4 Congreso Internacional de Ingenieria. Sesja posterowa. La Universidad Autonomia De Queretaro Meksyk 2008.
67. Sikora W.: Zależności Sił skrawania od prędkości skrawania i innych parametrów technicznych. Mechanizacja Górnictwa. s. 17-22.
68. Skoczkowski K. : Elektrody Grafitowe. Fundacja im. Wojciecha Świątosławskiego na Rzecz Wspierania Nauki i Rozwoju Potencjału Naukowego w Polsce. Gliwice 2001.
69. Skoczkowski K. : Technologia Produkcji Wytworów Węglowo-Grafitowych. Śląskie Wydawnictwo Techniczne. Katowice 1995.
70. Skoczkowski K. : Wykładziny Węglowo-Grafitowe. Fundacja im. Wojciecha Świątosławskiego na Rzecz Wspierania Nauki i Rozwoju Potencjału Naukowego w Polsce. Gliwice 1998.
71. Skorupa A., Kołodziej J., Krawczyk S.: Obróbka mechaniczna tworzyw węglowych. Karbo 11/2000. s. 376.
72. Skorupa A., Kołodziej J., Krawczyk ST., Golec ST.: Nowa technologia obróbki mechanicznej wyrobów węglowych i grafitowych. Ogólnopolskie seminarium „Węgiel, sorbety i wyroby węglowe 2000”. Materiały seminarium AGH. Kraków 2000.
73. Sobolewski S.: Przeróbka Mechaniczna Skał i Surowców Mineralnych, Rozdrabnianie. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 1974.
74. Sokołowski M.: Energetyczny opis procesu rozdrabniania. Inst. Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego. Warszawa 1990.

75. Sokołowski M.: Energia rozdrabniania. Inst. Mechanizacji Budownictwa i Górnictwa Skalnego. Warszawa 1990.
76. System Akwizycji I Analizy Sygnałów. Instrukcja Użytkownika. Kraków 1994.
77. Sztaba K.: Przesiewanie. Śląskie Wydaw. Techniczne. Katowice 1993.
78. Volk W.: Statystyka Stosowana Dla Inżynierów. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne. Warszawa
79. Walczak J.: Wytrzymałość materiałów oraz podstawy teorii sprężystości i plastyczności. PWN. Warszawa-Kraków 1978.
80. Zabagło R.: Badania fizyczne i technologiczne zależności obróbki elektrod grafitowych jako podstawa do optymalizacji tego procesu. Rozprawa doktorska. Politechnika Krakowska. Kraków 1970.
81. Zając K.: Podstawy Statystyki. Wydawnictwo Wyższej Szkoły Ekonomicznej. Kraków 1967.
82. Zawada J.: Wstęp do mechaniki kruszenia. Wydawnictwo Instytutu Technologii Eksploatacji. Radom 1998.
83. Zębala W., Gawlik J.: Modelowanie stanu wyężenia strefy tworzenia wióra w skrawaniu małymi głębokościami. Postepy technologii maszyn i urządzeń. t. 20, nr 3, 1996, s. 81-94.
84. Zębala W.: Analityczna i eksperymentalna identyfikacja stanu strefy obróbki w procesie skrawania. Monografia 300. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej. Kraków 2004.
85. Zieliński T.: Cyfrowe przetwarzanie sygnałów: od teorii do zastosowań. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Wyd. 2 popr, Warszawa 2007.
86. Zniszczyński A.: Wpływ geometrii narzędzi ostrokrawędziowych na urabianie skał i skład ziarnowy urobku. Rozprawa doktorska. Politechnika Śląska. Gliwice 1987.

Normy

1. PN 78/B-06714 „Wymiary bloków katodowych”
2. PN 83 N-01052.07 „Badania statystyczne”
3. PN 92 M-01002/04 „Siły, energia i moc”
4. PN-ISO 3002-1+A1 „Geometria części roboczej narzędzi skrawających”

Strony internetowe

1. http://www.ila.de/Assets/pdfs/PIV%20Datasheets/Cameras/brochure_xs_3.pdf
2. http://www.polytec.com/eur/_files/LM_BR_ProductFlyer_2005_04_PL.pdf
3. <http://www.kistler.com/>

ZAŁĄCZNIK 1

Charakterystyka urządzeń użytych do budowy stanowiska pomiarowego

1. Frezarka pionowa typu FSS 400-V, firmy WMW



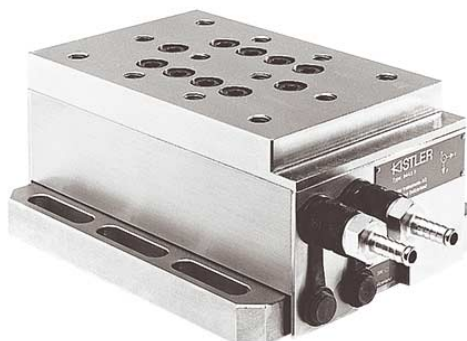
Rys. 1. Zdjęcie frezarki pionowej typu FSS 400 – V użytej do badań

Typ maszyny	Frezarka Wspornikowa Pionowa
Producent	WMW- FRITZ HECKERT
Typ	FSS 400 - V

Parametry techniczne:

x-travel	1200 mm
y-travel	400 mm
z-travel	400 mm
moc silnika	11,5 kW
waga maszyny	4,0 t

2. Siłomierz piezoelektryczny typu 9265B firmy Kistler



Rys. 2 Siłomierz trójskładowy piezoelektryczny typu 9265B firmy Kistler

Siłomierz tego typu charakteryzuje się bardzo małą bezwładnością, dużą odpornością na zmiany temperatur (zakres pracy od $0 \div 70^\circ \text{C}$) oraz dużym zakresem pomiarowym dla sił.

Ważniejsze dane techniczne zestawiono poniżej:

a) zakres pomiarowy:

- F_c $0 \div 30$ [kN]
- F_f, F_p $-15 \div 15$ [kN]

b) przeciążenie:

- F_c $-12 \div 40$ [kN]
- F_f, F_p $-20 \div 20$ [kN]

c) minimalne wskazanie:

- $F_{\min} = 0.01$ [N]

3. Wzmacniacz ładunku

W badaniach wykorzystany został wzmacniacz ładunku typu CL 111 produkcji Zakładów Elektroniki Pomiarowej. Przeznaczony jest do współpracy z piezoelektrycznymi przetwornikami elektromechanicznymi ciśnienia i siły takich firm jak: AVI, KISTLER, ZEP. Przewidziany jest do pomiarów szybkozmiennych. Wzmacniacz składa się z konwertera

„ładunek – napięcie” oraz wzmacniacza prądu stałego o płynnie regulowanej czułości.

Dane techniczne wzmacniacza ładunku CL 111:

- Rodzaj wejścia: asymetryczne
- Rezystancja wejściowa: $R_i \geq 10^{13} [\Omega]$
- Minimalna czułość: 100 [pC]
- Zakres pomiarowy: 0.1, 1, 10, 100 [nC]
- Płynna regulacja czułości: 0.1 ÷ 1.1 [V/V]
- Przenoszone: Stat $10^4 \div 10^5$ [Hz] ± 0.5 [dB]
Dyn. $1 \div 10^5$ [Hz] ± 0.5 [dB]
- Nieliniowość: <0.1 %
- Maksymalne napięcie wyjściowe: ± 10 [V]
- Maksymalny prąd wyjściowy: ± 20 [mA]
- Rezystancja wyjściowa : $R_o < 1 [\Omega]$
- Temperatura pracy: 0 ÷ 50° C
- Zasilanie: 220 [V] $\pm 10\%$ 50 [Hz]

4. Komputer i karta pomiarowa

Komputer pomiarowy PC 486 DX 100 MHz wyposażony w kartę pomiarową typu LC - 020 - 0812 produkcji Z.E.AMBEX w Warszawie. Karta modułowa z 8 - kanałowym, 12 - bitowy przetwornik A/C , który pozwala przy jednoczesnej rejestracji trzech kanałów na próbkowanie sygnału wejściowego z częstotliwością 37 [kHz]. Maksymalnie karta ta pozwala na próbkowanie z częstotliwością 100 [kHz] w przypadku pobierania sygnału tylko jednym kanałem. Karta ta ponadto posiada przetwornik cyfrowo - analogowy oraz szereg wejść i wyjść dwustanowych w standardzie TTL. Do rejestracji składowych sił skrawania wykorzystano trzy z ośmiu dostępnych kanałów wejściowych.

Ważniejsze dane techniczne karty pomiarowej:

- Wzmocnienie układu próbkująco - pamiętającego $k = 1$ lub $k=2$
- Zakres napięć wejściowych A/C przy wzmocnieniu $k = 1$ ± 10 [V]
 ± 5 [V]
 $0 \div 10$ [V]
- Zakres napięć wejściowych A/C przy wzmocnieniu $k = 2$ ± 5 [V]
 ± 2.5 [V]
 $0 \div 5$ [V]
- Oporność wejściowa 2 [MQ]
- Rozdzielczość 12 bitów
- Liczba układów P/P 8
- Maksymalne napięcie na
 wejściach analogowych $2 \times$ aktualnie ustawiony zakres
 napięć na wejściu analogowym

Zakres temperatur pracy $5 \div 35^\circ \text{C}$

5. System SAAS

Składa się z dwóch oddzielnych podsystemów:

- Podsystem akwizycji, w którym rejestruje się pomiar w postaci binarnej lub tekstowej oraz monitoruje sygnał w trakcie trwania pomiaru (praca jako oscyloskop cyfrowy).
- Podsystem analizy, w którym dokonuje się obróbki sygnału: obliczenia parametrów statystycznych sygnału, graficzna wizualizacja wyników pomiarów w postaci wykresów , filtracja cyfrowa, usuwanie trendu, formatowanie.

6. Kamera szybkoklatkowa

Do rejestracji obrazu mechanizmu powstawania wióra została użyta kamera szybkoklatkowa XS-Stream XS-3 firmy IDT.



Rys. 3 Kamera szybkoklatkowa XS-3 firmy IDT

Camera Specifications

Pixel Depth	10 bits
Resolution	1280H x 1024V pixels
Pixel Size	12 x 12 micron
Center to Center Spacing	12 micron
Pixel Fill Factor	40%
Dynamic Range	59 dB
Configurable Binning	1x1, 2x2, 3x3, 4x4
Trigger Modes	Internal (continuous), external (edge-low, edge-high, pulse low and pulse high)
Memory Configuration	1GB, 2GB, 3GB and 4GB
Minimum Inter-frame Rate	100 ns
Digital Interface	Plug-and-play with real-time preview, USB-2.0 (480 Mbps)
Trigger and Synchronization	CMOS level (3.3 V) via BNC connectors
Operating System	Windows 2000, XP, Mac OS X
Integration Time	100 ns to 1000 ms
Programmable Gain and Offset	10 bit resolution
Optical Interface	Standard: C-mount C to F and Canon converters available
Size/Weight	95x95x162 mm, 1.9 Kg
Mount	1/4-20 photo mount
Power Requirements	100-240 V, 50-60 Hz
Temperature	+5°C to +40°C
Humidity	Less than 80% at +31°C

Rys. 4 Specyfikacja kamery XS-3

7. Wibrometr laserowy typu 501 i kontroler typu 5000 firmy Polytec

Do pomiaru przemieszczenia się narzędzia pod działaniem sił skrawania został użyty wibrometr laserowy typu 501 połączony z kontrolerem typu 5000 firmy Polytec.



Rys. 5 Wibrometr laserowy firmy Polytec



Rys. 6 Kontroler typu 5000 firmy Polytec

OFV-505/503 Technical Data

General Specifications	
Operating temperature range	+5 °C ... +40 °C (41 °F ... 104 °F)
Relative humidity	max. 80 %, non-condensing
Weight	3.4 kg
Dimensions [W x H x L]	120 mm x 80 mm x 345 mm (4.7 In x 3.1 In x 13.6 In)
Laser wavelength	633 nm, visible laser beam
Laser protection class	Class 2 He-Ne laser, < 1 mW, eye-safe
* Auto Focus	only OFV-505
Remote Focus	only OFV-505
Manual focusing	Electrical control of the internal focusing unit (mechanically isolated)
Maximum stand-off distance	~ 300 m (with OFV-SLR, surface dependent)
Coherence maxima	234 mm + n·204 mm; n = 0, 1, 2, 3, ... measured from the focusing ring
Compatibility	OFV-505 recommended for OFV-5000 controller; OFV-503 recommended for OFV-2XXX series controllers
PSV-Upgradeable	only OFV-505

* Depending on surface properties

OFV-505 and OFV-503 Interchangeable Lens Options – Technical Data				
Front lens	OFV-SR short range	OFV-MR mid range	OFV-LR* long range	OFV-SLR super long range
Focal length [mm]	30	60	100	200
Min. stand-off distance [mm]	60	185	530	1800
Aperture diameter (1/e ²) [mm]	3.4	6.8	11.3	22.6
Typical spot size in µm at				
100 mm	25	–	–	–
200 mm	49	25	–	–
500 mm	121	54	18	–
1000 mm	245	112	62	–
2000 mm	500	235	135	60
3000 mm	750	356	210	96
5000 mm distance	1260	604	356	168
Each additional meter plus [µm]	240	126	74	36

* Default configuration

© 2014 OTC

Rys. 7 Charakterystyka wibrometru

ZAŁĄCZNIK 2

Wyznaczanie niepewności pomiarowej

1. Wyznaczenie niepewności pomiarowej dla wartości mierzonych wg zaleceń ISO

Do przeprowadzonych obliczeń niepewności pomiarowej w pracy wykorzystano **Metodę A**. Metoda ta polega na obliczeniu niepewności pomiarowej drogą analizy statystycznej serii pojedynczych wyników pomiaru [25].

Ponieważ w badaniach, które zostały zrealizowane w pracy dokonano pomiaru głównej siły skrawania F_C z czterokrotnym powtórzeniem, niepewność pomiarową szacowano dla przypadku gdy n pomiarów jest $2 \leq n \leq 10$. Dla przeprowadzonych pomiarów obliczono wartość średnią $\overline{F_C}$ i odchylenie standardowe S , natomiast składnik niepewności pomiarowej u obliczono wg wzoru

$$u = \frac{kS}{\sqrt{n}}$$

gdzie: k – współczynnik w funkcji liczby n pomiarów wg tabeli (tablica 2.5) [25] dla $n=4$ $k=1,7$

2. Wyznaczenie niepewności pomiarowej dla pomiaru pośredniego energii fragmentacji

Energia fragmentacji jest wielkością (pośrednią) obliczaną na podstawie zmierzonych wartości głównej siły skrawania F_C i przemieszczenia narzędzia x . Wartość głównej siły skrawania F_C mierzona była za pomocą piezoelektrycznego siłomierza 9265B firmy Kistler a przemieszczenie x za pomocą wibrometru laserowego 501

firmy Polytec. W tym przypadku obliczona została maksymalna niepewność pomiaru pośredniego.

$$u_{\max} = \pm \left[\left| \frac{\partial E}{\partial F} u_F \right| + \left| \frac{\partial E}{\partial x} u_x \right| \right]$$

gdzie: $\left| \frac{\partial E}{\partial F} u_F \right|$ - niepewność pomiarowa toru pomiarowego siły, dla

siłomierza 9265B firmy Kistler wynosi 2%,

$\left| \frac{\partial E}{\partial x} u_x \right|$ - niepewność pomiarowa toru pomiarowego

przemieszczenia, dla wibrometru laserowego 501 firmy Polytec wynosi 0,1%,

$$u_{\max} = \pm [2 + 0,001] = 2,1\%$$

ZAŁĄCZNIK 3

Stacjonarność procesu skrawania tworzywa węglowego WPW-65

Proces stochastyczny $X(t)$ nazywamy procesem stacjonarnym jeżeli dla każdego $(t_1, t_2, \dots, t_n)$ łączny rozkład $\{X(t_1 + t_0), X(t_2 + t_0), \dots, X(t_n + t_0)\}$ nie zależy od t_0 . Innymi słowy, właściwości takiego procesu nie zmieniają się przy przesunięciu osi czasu.

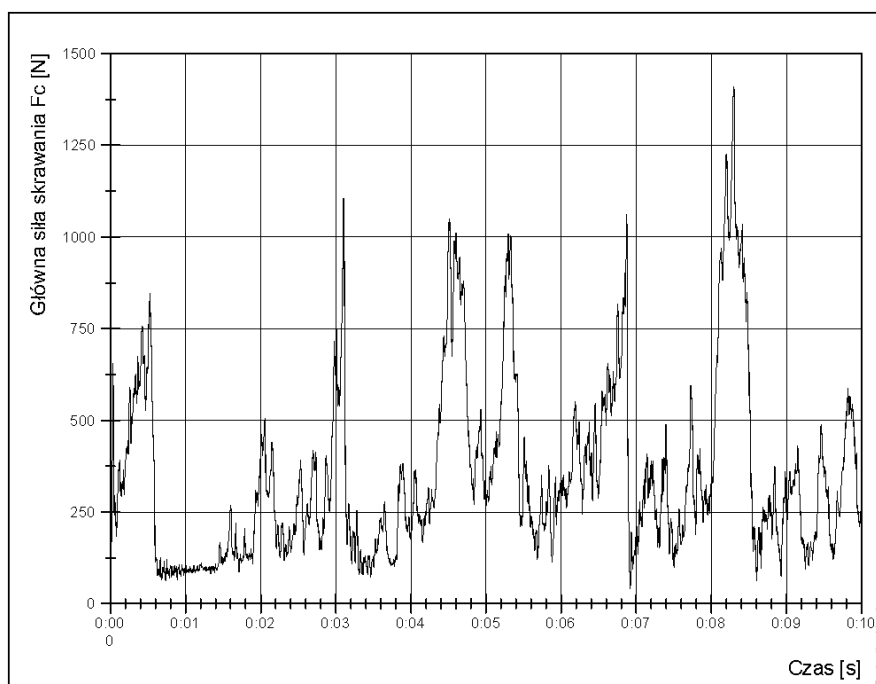
Proces stacjonarny ma stałą średnią μ ,

$$\mu = EX(t)$$

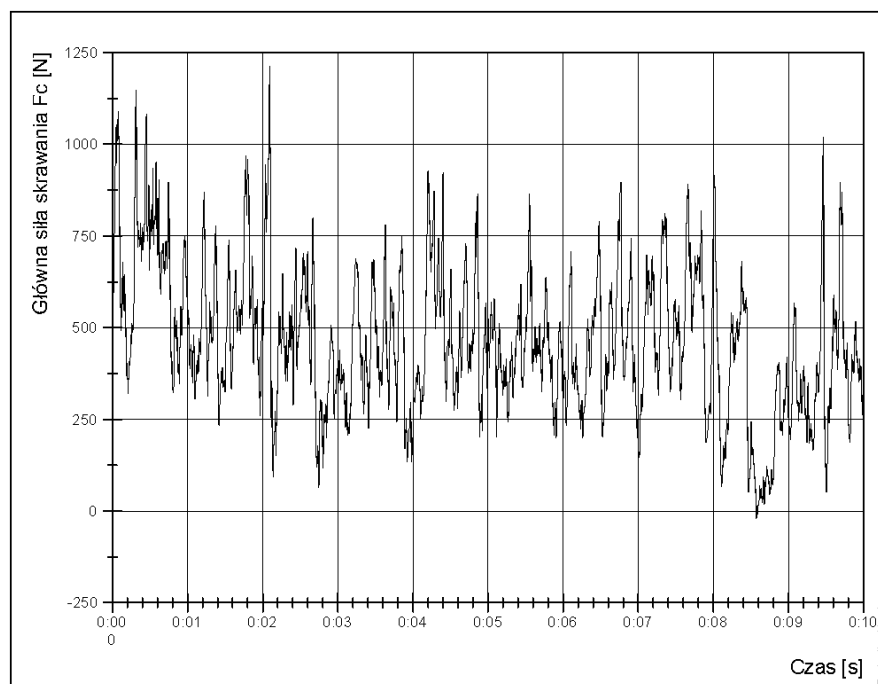
która określa poziom, wokół którego proces oscyluje, oraz stałą wariancję σ^2

$$\sigma^2 = E[(X(t) - \mu)^2]$$

Sprawdzenie stacjonarności procesu zostało wykonane dla dwóch przebiegów siły rys.1 przebiegu głównej siły skrawania F_c podczas skrawania swobodnego i dla rys. 2 skrawania nieswobodnego.



Rys. 1. Przebieg głównej siły skrawania F_c dla skrawania swobodnego



Rys. 2. Przebieg głównej siły skrawania F_c dla skrawania nieswobodnego

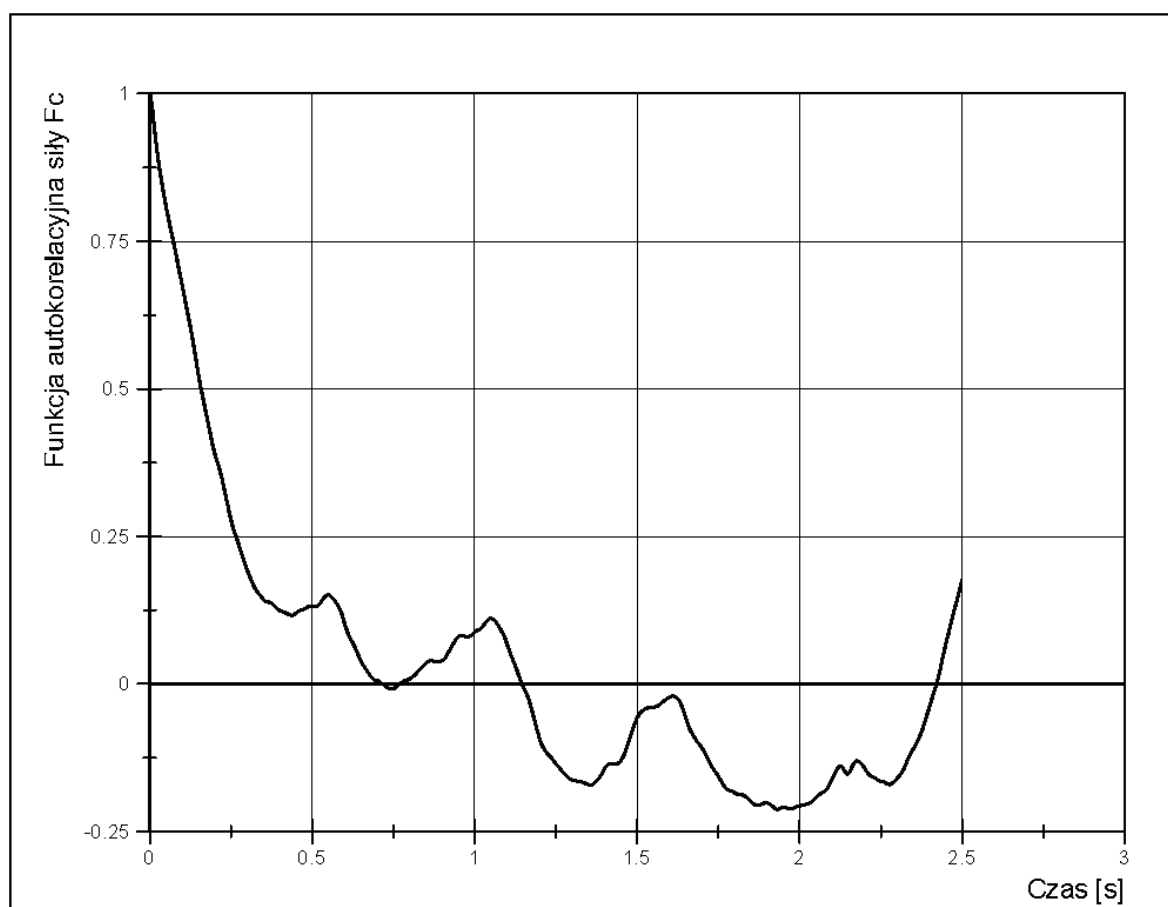
Dla wyżej w wymienionych przebiegów głównej siły skrawania wyliczono przy użyciu programu DIAdem 10.2 firmy National Instruments wartości średnie siły skrawania oraz wariancje. Wartości te wyliczono zostały dla zmiennej chwili początkowej t_0 (2, 4, 6 [s]) i przedstawiono w tab. 1.

Tab. 1. Wartości średnie głównej siły skrawania F_c i wariancji dla skrawania swobodnego i nieswobodnego

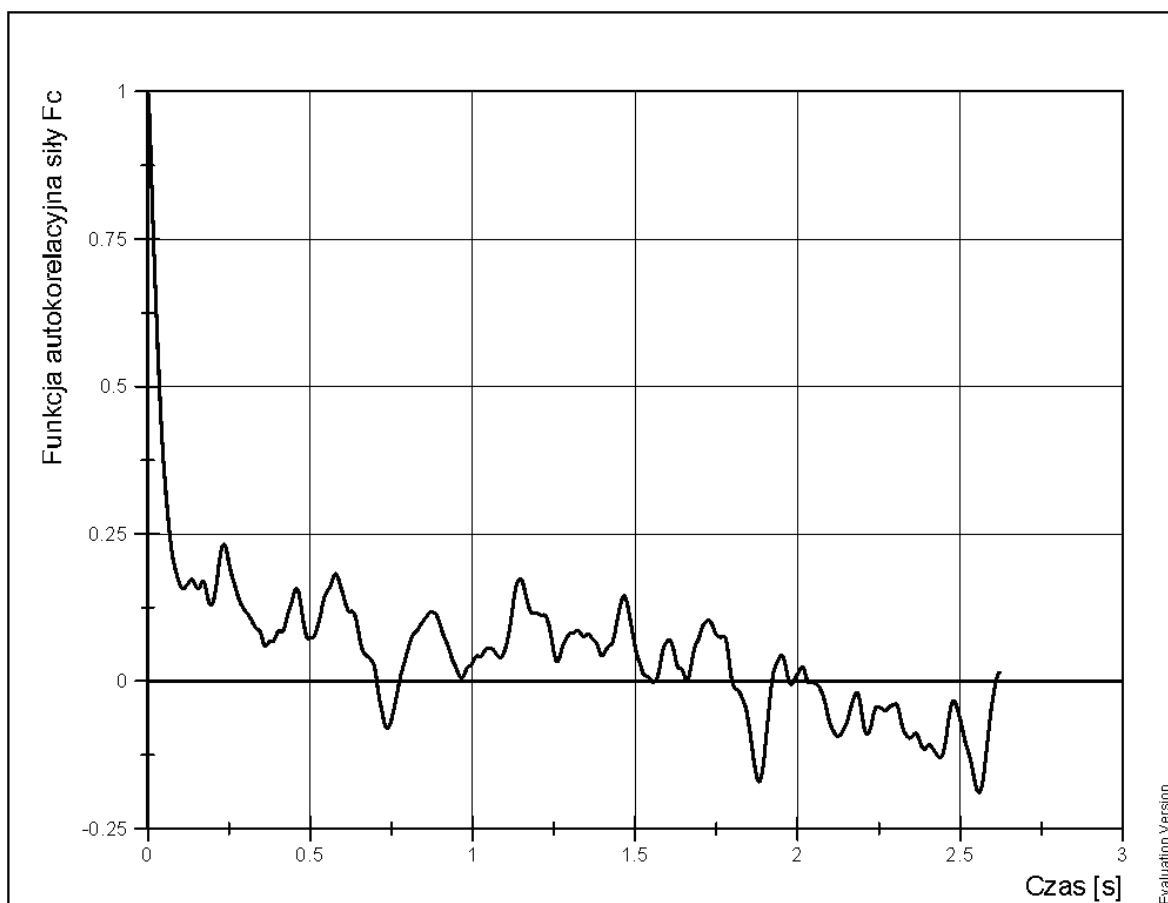
Nr	Skrawanie swobodne			Skrawanie nieswobodne		
	t_0 [s]	$\overline{F_c}$ [N]	σ^2	t_0 [s]	$\overline{F_c}$ [N]	σ^2
1	0	349,56	6007,43	0	465,01	39426,134
2	2	379,04	60883,07	2	432,3	34825,754
3	4	417,05	65919,34	4	429,8	35069,217
4	6	400,3	66891,14	6	410,27	40149,377

Na podstawie otrzymanych wyników i założeń stacjonarności procesu (stała wartość średnia μ i stała wariancja σ^2) można powiedzieć, że proces skrawania tworzywa węglowego WPW-65 jest

procesem stacjonarny. Świadczy też o tym przebieg funkcji autokorelacyjnej rys. 3 i rys. 4.



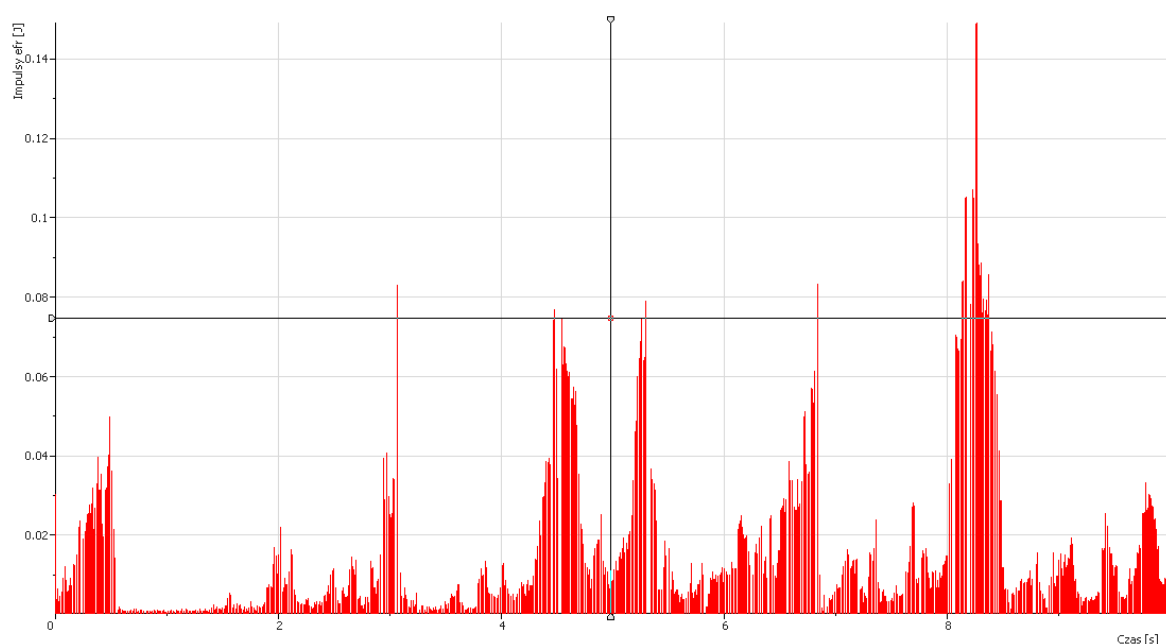
Rys. 3. Przebieg funkcji autokorelacyjnej głównej siły skrawania F_c dla skrawania swobodnego



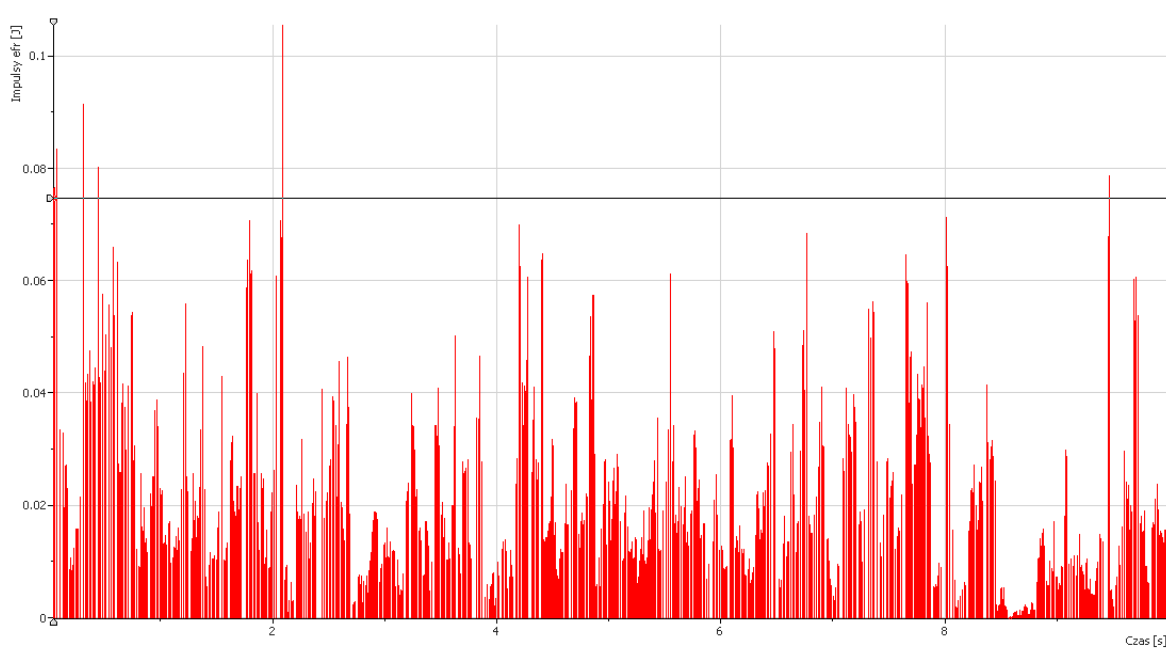
Rys. 4. Przebieg funkcji autokorelacyjnej głównej siły skrawania F_C dla skrawania nieswobodnego

Analiza zmienności przebiegów siły $F_C(t)$ oraz przemieszczenia $x(t)$ wykonana przy pomocy funkcji autokorelacyjnej wskazuje na ich silnie losowy charakter – 80% do 90% sygnału ma charakter przypadkowy rys. 3 i 4. Dalsza analiza przebiegów siły i przemieszczenia wykonywana na wystarczająco długim ich zapisie wskazuje na to, że możemy je traktować jako realizacje losowych przebiegów stacjonarnych.

Podobnie dla przebiegów funkcji impulsów energii fragmentacji e_{fr} (rys. 5 i 6) analiza wykazała, że przebiegi te mają charakter silnie losowy.

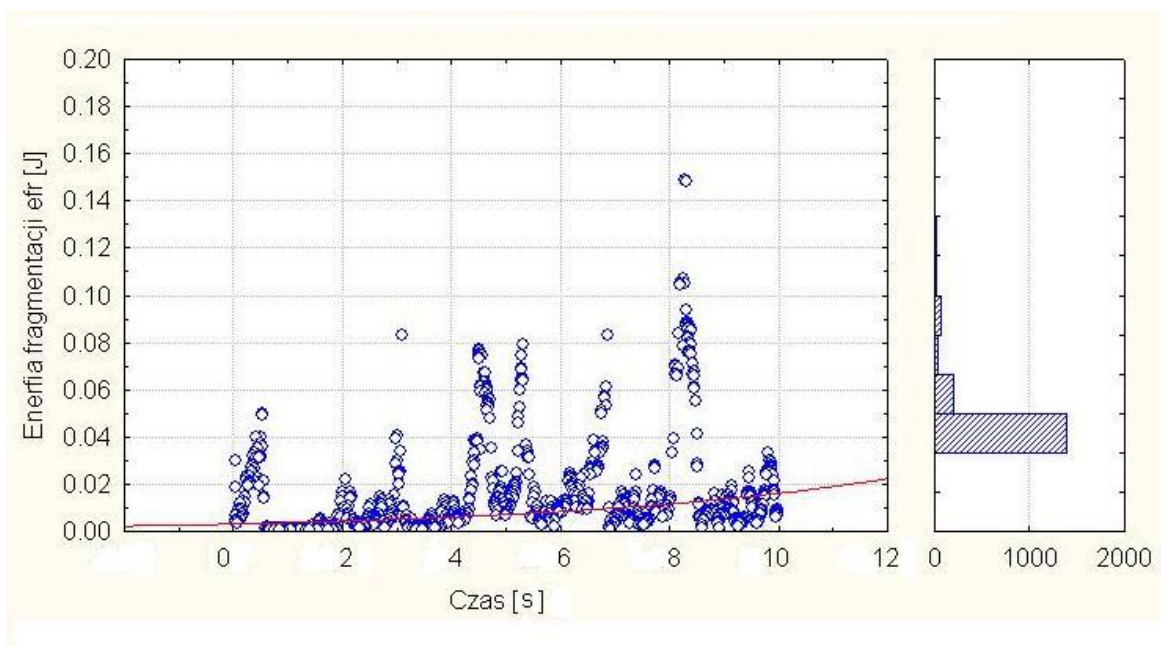


Rys. 5. Przebieg funkcji impulsów energii fragmentacji e_{fr} dla skrawania swobodnego.

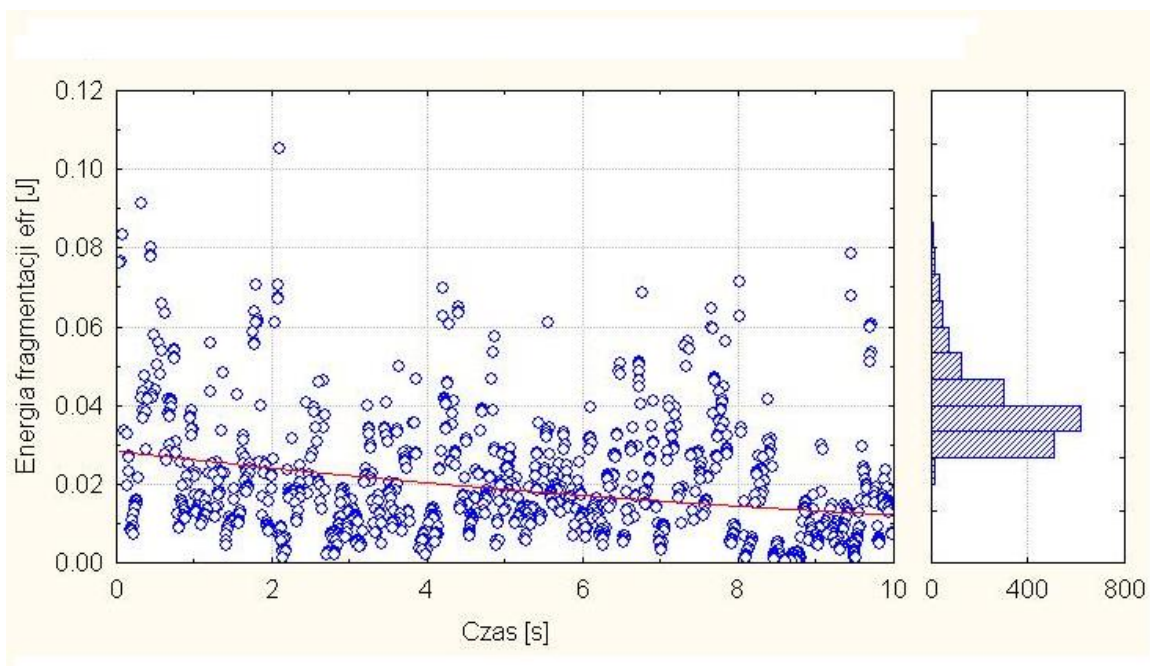


Rys. 6. Przebieg funkcji impulsów energii fragmentacji e_{fr} dla skrawania nieswobodnego.

Dla przebiegów funkcji impulsów energii fragmentacji e_{fr} sporządzono w programie STATISTICA 8 rozkład energii fragmentacji $\mu(e_{fr})$ zarówno dla skrawania swobodnego jak i dla skrawania nieswobodnego (rys.7i rys.8).



Rys. 7. Rozkład energii fragmentacji $\mu(e_{fr})$ dla skrawania swobodnego.



Rys. 8. Rozkład energii fragmentacji $\mu(e_{fr})$ dla skrawania nieswobodnego.