

Dr inż. Krzysztof Sz wajka

Politechnika Rzeszowska  
im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie  
Wydział Mechaniczno-Technologiczny

telefon PRz: 17 743 26 04  
e-mail: ksz wajka@prz.edu.pl

# MONOGRAFIA

habilitacyjna

Rzeszów, 12.01.2026 r.



**Krzysztof SZWAJKA**

**Analiza wybranych metod  
monitorowania procesu  
SKRAWANIA KOMPOZYTÓW  
DREWNOPOCHODNYCH**

**w aspektach oceny stanu narzędzia  
i jakości powierzchni obrobionej**



**OFICyna  
WYDAWNICZA**  
POLITECHNIKI RZESZOWSKIEJ

Wydano za zgodą Rektora

Recenzenci

prof. dr hab. inż. Sebastian SKOCZYPIEC  
dr hab. inż. Piotr NIESŁONY, prof. PO

Redaktor naczelny

Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej  
dr hab. inż. Lesław GNIEWEK, prof. PRZ

Monografię wydrukowano z matryc  
dostarczonych przez autora

Projekt okładki

Anna PIECZONKA

Ilustracja na okładce wykonana z zastosowaniem AI

*kompozyty drewnopochodne, monitorowanie, zużycie ostrza,  
rozwarstwienie, uczenie maszynowe*

© Copyright by Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej  
Rzeszów 2025

Wszelkie prawa autorskie i wydawnicze zastrzeżone. Każda forma powielania oraz przenoszenia na inne nośniki bez pisemnej zgody Wydawcy jest traktowana jako naruszenie praw autorskich, z konsekwencjami przewidzianymi w Ustawie o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. z 2018 r., poz. 1191 t.j.). Autor i Wydawca dołożyli wszelkich starań, aby rzetelnie podać źródło zamieszczonych ilustracji oraz dotrzeć do właścicieli i dysponentów praw autorskich. Osoby, których nie udało się ustalić, są proszone o kontakt z Wydawnictwem.

ISBN 978-83-7934-821-3

Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej  
al. Powstańców Warszawy 12, 35-029 Rzeszów  
<http://oficyna.prz.edu.pl>

Ark. wyd. 17,54. Ark. druk. 18,0. Wydrukowano w grudniu 2025 r.  
Drukarnia Oficyny Wydawniczej PRZ  
al. Powstańców Warszawy 12, 35-029 Rzeszów  
Zam. nr 57/25

# SPIS TREŚCI

Wykaz stosowanych skrótów .....	7
<b>Wprowadzenie .....</b>	<b>11</b>
<b>1. Analiza stanu zagadnienia.....</b>	<b>15</b>
1.1. Wybrane aspekty procesu obróbki płyt drewnopochodnych .....	15
1.2. Opory skrawania przy wierceniu i frezowaniu .....	21
1.3. Wielkości fizyczne stosowane do monitorowania obróbki.....	23
1.3.1. Opory skrawania.....	24
1.3.2. Moc prądu silnika .....	26
1.3.3. Emisja akustyczna .....	27
1.3.4. Temperatura w strefie skrawania.....	28
1.3.5. Drgania .....	29
1.4. Jakość powierzchni w procesie skrawania .....	31
1.5. Okres trwałości ostrza i jego wpływ na wydajność i koszty .....	35
1.5.1. Zależność okresu trwałości ostrza od prędkości skrawania .....	37
1.5.2. Trwałość największej wydajności ostrza narzędzia.....	39
1.5.3. Ekonomiczna trwałość ostrza .....	40
1.6. Monitorowanie procesu skrawania .....	41
1.7. Podsumowanie analizy stanu zagadnienia .....	51
<b>2. Cel i zakres pracy.....</b>	<b>59</b>
<b>3. Materiały stosowane w badaniach.....</b>	<b>61</b>
3.1. Procedura wyznaczania właściwości mechanicznych materiałów.....	61
3.1.1. Wiadomości ogólne .....	61
3.1.2. Metodyka badań .....	64
3.1.3. Wyniki badań i ich analiza .....	75
3.2. Własności mechaniczne materiałów stosowanych w badaniach.....	86
3.3. Podsumowanie .....	91
<b>4. Wpływ parametrów skrawania na przebieg procesu skrawania.....</b>	<b>93</b>
4.1. Frezowanie .....	93
4.1.1. Metodyka badań .....	93
4.1.2. Ocena zużycia ostrza narzędzia skrawającego .....	101
4.1.3. Ocena jakości powierzchni obrobionej.....	105
4.1.4. Ekonomiczna i wydajnościowa obróbka płyt drewnopochodnych.....	110
4.2. Wiercenie .....	113
4.2.1. Metodyka badań .....	113
4.2.2. Ocena zużycia ostrza narzędzia skrawającego .....	117
4.2.3. Ocena jakości powierzchni obrobionej.....	121
4.2.4. Ekonomiczna i wydajnościowa obróbka płyt drewnopochodnych.....	125

4.3.	Posumowanie .....	128
<b>5.</b>	<b>Skrawalność płyt drewnopochodnych.....</b>	<b>131</b>
5.1.	Wiadomości ogólne.....	131
5.2.	Uniwersalny indeks skrawalności .....	132
5.2.1.	Metodyka badań .....	133
5.2.2.	Analiza wyników .....	135
5.3.	Opór właściwy skrawania .....	142
5.3.1.	Metodyka badań .....	142
5.3.2.	Analiza wyników .....	145
5.4.	Podsumowanie .....	152
<b>6.</b>	<b>Zastosowanie powłok na ostrza narzędzi skrawających .....</b>	<b>153</b>
6.1.	Wiadomości ogólne.....	153
6.2.	Metodyka badań.....	155
6.3.	Analiza wyników .....	160
6.3.1.	Siła osiowa i moment skrawania .....	160
6.3.2.	Analiza topografii powierzchni .....	166
6.3.3.	Temperatura ostrza narzędzia skrawającego .....	170
6.4.	Podsumowanie .....	172
<b>7.</b>	<b>Monitorowanie procesu obróbki .....</b>	<b>175</b>
7.1.	Zastosowanie sieci neuronowej RBF i FL i modelowania rozmytego w ocenie chropowatości powierzchni .....	175
7.1.1.	Metodyka badań .....	177
7.1.2.	Analiza wyników badań .....	180
7.2.	Inteligentna identyfikacja materiału obrabianego .....	193
7.2.1.	Metodyka badań .....	194
7.2.2.	Analiza wyników badań .....	195
7.3.	Optymalizacja struktury sieci neuronowej do oceny zużycia ostrza w procesie wiercenia CFRP.....	207
7.3.1.	Wiadomości ogólne .....	207
7.3.2.	Analiza wyników badań .....	208
7.4.	Identyfikacja uszkodzeń przy wierceniu na podstawie analizy obrazu .....	215
7.4.1.	Metodyka badań .....	215
7.4.2.	Analiza wyników badań .....	216
7.5.	Podsumowanie .....	221
<b>8.</b>	<b>Diagnostyka zużycia ostrza skrawającego.....</b>	<b>223</b>
8.1.	Wiadomości ogólne.....	223
8.2.	Koncepcja systemu monitorowania zużycia ostrza.....	226
8.3.	Wykorzystana część okresu trwałości ostrza .....	228
8.4.	Algorytm działania strategii nadzoru stanu narzędzia .....	230
8.5.	Ocena poprawności działania zaproponowanej strategii .....	234
8.6.	Wirtualny układ diagnostyki stanu narzędzia .....	243

8.7.	Weryfikacja poprawności działania układu w warunkach laboratoryjnych .....	244
8.8.	Weryfikacja poprawności działania układu w warunkach produkcyjnych.....	247
8.9.	Podsumowanie .....	254
<b>Wnioski.....</b>		<b>255</b>
<b>Literatura .....</b>		<b>259</b>
<b>Streszczenie .....</b>		<b>283</b>
<b>Abstract .....</b>		<b>285</b>



# WYKAZ STOSOWANYCH SKRÓTÓW

$A_{AVG}$	-	nominalne pole powierzchni otworu
$A_{del}$	-	pole powierzchni uszkodzenia laminatu
$A_{ent}$	-	obszar delaminacji na wejściu otworu
$A_{exit}$	-	powierzchnia delaminacji na wyjściu otworu
$A_{nom}$	-	pole powierzchni otworu nominalnego
$a_p$	-	głębokość skrawania
$A_s$	-	pole płaszczyzny ścinania
$B$	-	siła bezwładności
$b$	-	szerokość warstwy skrawanej
$d$	-	bezwymiarowy współczynnik tłumienia
$D$	-	średnica narzędzia
$D_F$	-	wskaźnik delaminacji
$D_{MAR}$	-	średnica maksymalnej strefy delaminacji wokół otworu
$D_{max}$	-	maksymalna średnica uszkodzonego obszaru wokół otworu
$dM_T$	-	dopuszczalny procentowy przyrost miary
$D_{nom}$	-	średnica otworu nominalnego
$D_{RAT}$	-	wskaźnik delaminacji
$E$	-	moduł Younga
$f$	-	posuw
$F_c$	-	składowa siły skrawania na kierunku prędkości skrawania
$F_{ck}$	-	składowa siły rozcinającej, zrzutowana na kierunek siły skrawania
$F_{cw}$	-	składowa siły skrawania pochodząca od kształtowania wióra
$F_d$	-	wskaźnik delaminacji
$F_{da}$	-	skorygowanego współczynnika delaminacji
$F_f$	-	składowa siły skrawania na kierunku prędkości posuwu
$F_\gamma$	-	siła styczna do powierzchni natarcia
$F\gamma_N$	-	siła normalna do powierzchni natarcia
$F_k$	-	siła rozcinająca, działająca na samą krawędź skrawającą
$F_o$	-	składowa siły skrawania na płaszczyznę przekroju głównego
$F_{ow}$	-	składowa siły ortogonalnej pochodząca od kształtowania wióra
$F_s$	-	składowa siły skrawania na płaszczyznę ścinania
$F_{sk}$	-	składowa siły rozcinającej, zrzutowana na kierunek siły ścinania
$F_t$	-	siła ortogonalna
$F_x$	-	siła na kierunku „x”
$F_y$	-	siła na kierunku „y”
$f_z$	-	posuw na ostrze
$F_z$	-	siła na kierunku „z”

---

$G_{IC}$	- krytyczna energia rozprzestrzeniania się pęknięcia na jednostkę powierzchni
$H$	- grubość przedmiotu obrabianego
$h$	- wysokość warstwy skrawanej
$H_p$	- entropia permutacji
$k_c$	- opór właściwy skrawania
$k_{c1.1}$	- jednostkowy opór skrawania
$K_{ck}$	- jednostkowa siła rozcinająca, zrzuwana na kierunek rędkości skrawania
$K_N$	- koszt narzędzia na okres trwałości ostrza
$K_O$	- koszt obrabiarki na minutę pracy
$k_s$	- opór właściwy ścinania
$K_{sk}$	- jednostkowa siła rozcinająca, zrzuwana na kierunek płaszczyzny ścinania
$L$	- długość przejścia
$M_0$	- miara początkowa
$M_k$	- miara końcowa
$M_c$	- moment skrawania
$M_g$	- moment zginający
$MoE$	- moduł zginania
$MoR$	- moduł zerwania
$M_T$	- poziom graniczny miary
$n$	- prędkość obrotowa
$n_T$	- liczba operacji na okres trwałości ostrza
$q$	- jednostkową wydajność obróbki
$R^2$	- współczynnik determinacji
$R_a$	- średnie arytmetyczne odchylenie profilu chropowatości od linii średniej
$R_{ent}$	- maksymalny promień obszaru delaminacji na wejściu otworu
$R_{exit}$	- maksymalny promień obszaru delaminacji na wyjściu otworu
$\sigma_g$	- naprężenia zginające
$S_q$	- średnia kwadratowa wartości odchyżeń wysokości od linii średniej na danym obszarze
$t$	- czas skrawania
$T$	- okres trwałości ostrza
$T_e$	- ekonomiczny okres trwałości
$t_m$	- czas maszynowy
$t_p$	- czas pomocniczy
$T_q$	- okres trwałości największej wydajności
$T_x$	- siła poprzeczna
$t_z$	- czas zmiany narzędzia

## WYKAZ STOSOWANYCH SKRÓTÓW

---

$U$	-	energia odkształcenia
$U_{xx}$	-	wartość sygnału w kanale „x” pochodząca od siły $F_x$
$U_{yy}$	-	wartość sygnału w kanale „y” pochodząca od siły $F_y$
$U_{zz}$	-	wartość sygnału w kanale „z” pochodząca od siły $F_z$
$VB_B$	-	starcie na powierzchni przyłożenia ostrza
$v_c$	-	prędkość skrawania
$v_e$	-	ekonomiczna prędkość skrawania
$v_f$	-	prędkość posuwu
$v_q$	-	prędkość skrawania największej wydajności
$X$	-	przemieszczenia na kierunku osi x
$z$	-	liczba ostrzy narzędzia
$\varepsilon$	-	odkształcenie względne
$\phi$	-	kąt ścinania
$\omega_o$	-	częstość kołowa drgań własnych
$\omega_{rez}$	-	częstość rezonansowa
$\Delta T$	-	wykorzystana część okresu trwałości ostrza



# WPROWADZENIE

Przetwórstwo kompozytów drewnopochodnych, tradycyjna i szeroko rozpowszechniona branża, przechodzi obecnie kompleksową transformację technologiczną, której przyspieszenie spodziewane jest w nadchodzących latach. Ta ewolucja stwarza zarówno możliwości, jak i wyzwania dla rozwoju monitorowania procesu obróbki materiałów drewnopochodnych, zwłaszcza w złożonych operacjach obróbki i rzeczywistych warunkach produkcyjnych. W Polsce zlokalizowane są 22 fabryki wytwarzające prawie wszystkie rodzaje płyt drewnopochodnych, od sklejek przez płyty wiórowe po płyty pilśniowe. Według danych z 2021 r. w Polsce produkowano łącznie ponad 10,37 mln m<sup>3</sup> różnego typu płyt drewnopochodnych, co stanowiło prawie 18% całej europejskiej produkcji (63,7 mln m<sup>3</sup>). Taki poziom produkcji uplasował Polskę na drugim miejscu wśród największych producentów płyt drewnopochodnych w Unii Europejskiej. W krajowej strukturze produkcji płyt drewnopochodnych największy udział mają płyty przeznaczone na rynek meblarski, czyli płyty wiórowe (43%), których w przedstawionym okresie wyprodukowano ponad 4,44 mln m<sup>3</sup> oraz płyty MDF (Medium Density Fibreboard) (24%), których wyprodukowano 2,46 mln m<sup>3</sup>.

Kompozyty drewnopochodne, takie jak sklejka, płyta pilśniowa, płyta wiórowa, od dawna stanowią integralną część branż takich jak budownictwo i przemysł meblarski [1]. Pomimo ich powszechnego zastosowania, branża przetwórstwa materiałów drewnopochodnych pozostaje w tyle pod względem wdrażania zaawansowanych technologii monitorowania w procesach skrawania, szczególnie w porównaniu z postępem obserwowanym w obróbce metali [2]. Płyty drewnopochodne zazwyczaj są przetwarzane poprzez frezowanie i wiercenie. Obróbka materiałów drewnopochodnych różni się znacząco od obróbki skrawaniem metali, stawiając przed operatorami obrabiarek i narzędziami skrawającymi wyzwania. Szczególnie w przemyśle meblarskim dokładność obróbki jest kluczowa ze względów estetycznych.

W ostatnich latach rozwój Przemysłu 4.0 i dążenie do gospodarki niskoemisyjnej pobudziły znaczącą transformację w branży przetwórstwa materiałów drewnopochodnych, podkreślając potrzebę stosowania rozwiązań monitorujących proces skrawania [3]. Na przykład producenci mebli zaczęli wdrażać zaawansowane systemy informatyczne w celu zwiększenia precyzji produkcji. Jednak szersze wdrożenie tych technologii w przetwórstwie kompozytów drzewnych pozostaje ograniczone, co podkreśla pilną potrzebę ukierunkowanych badań. Jednocześnie inne sektory przetwórstwa materiałów drewnopochodnych doświadczają rosnącego zapotrzebowania na technologie monitorowania procesów [4], napędzanego wyzwaniami takimi jak wysokie koszty materiałów narzędzi skrawających oraz optymalizacja wydajności produkcji [5]. Presja ta podkreśla kluczowe znaczenie monitorowania procesu skrawania i kontroli kosztów w procesach obróbki materiałów drewnopochodnych.

W związku z powyższym konieczność monitorowania procesu obróbki w czasie rzeczywistym i wdrażania odpowiednich środków zaradczych jest przedmiotem znacznego zainteresowania badaczy i praktyków od kilku dziesięcioleci. Zastosowanie elastycznej automatyzacji w obróbce kompozytów drewnopochodnych wiąże się z zapewnieniem narzędzi monitorujących stan zużycia ostrzy narzędzi jak i jakości powierzchni obrobionej.

Typowy system monitorowania procesu skrawania działa zgodnie z następującą logiką. W strefie skrawania występuje kilka zmiennych procesowych, takich jak: siła skrawania, drgania, emisja akustyczna, hałas, temperatura, itp., na które wpływa stan narzędzia skrawającego i warunki procesu usuwania materiału. Zmienne, które potencjalnie mogą być efektywne w monitorowaniu procesu obróbki skrawaniem, można zmierzyć poprzez zastosowanie odpowiednich czujników. Następnie sygnały pochodzące czujniki są poddawane analogowemu lub cyfrowemu przetwarzaniu w celu wygenerowania funkcjonalnych cech sygnału skorelowanych (przynajmniej potencjalnie) ze stanem narzędzia skrawającego i/lub warunkami procesu. Cechy sygnału czujnika są następnie przekazywane i oceniane przez systemy wspomaganie decyzji poznawczych w celu ostatecznej diagnozy.

Zastosowanie nawet najbardziej prostej idei do realizacji monitorowania procesu skrawania wymaga pokonania wielu trudności. Kompozyty drewnopochodne stwarzają wyjątkowe wyzwania, które odróżniają je od skrawaniem metali. Ich anizotropowe właściwości, stosowanie klejów i brak chłodziw utrudniają monitorowanie stanu narzędzi [6, 7]. Niejednorodność tych materiałów powoduje niestabilność sygnałów diagnostycznych, co utrudnia miarodajną ocenę stanu narzędzi jak i procesu skrawania [8]. Ponadto zapylenie występujące w trakcie skrawania materiałów drewnopochodnych dodatkowo komplikuje akwizycję sygnału diagnostycznych [9].

Adaptacja istniejących systemów monitorowania procesu skrawania metali do procesu obróbki kompozytów drewnopochodnych jest złożona ze względu na czynniki wpływające na zjawisko zużycia ostrzy narzędzi skrawających w obróbce kompozytów drewnopochodnych oraz fundamentalne różnice w ich konstrukcji [10]. Podczas gdy zużycie narzędzi w obróbce metali wynika głównie z oddziaływań mechanicznych i termicznych między narzędziem a przedmiotem obrabianym [11, 12], skrawanie materiałów drewnopochodnych wprowadza dodatkowe czynniki wynikające z właściwości materiału obrabianego. Kleje i wilgoć przyczyniają się do korozji chemicznej, a także do efektów mechanicznych i termicznych. Zmiany wielkości wiórów drzewnych i właściwości kleju powodują wahania sił skrawania, co wymusza uwzględnienia tego faktu w tworzeniu podstaw układów monitorowania, aby poradzić sobie z tą zmiennością [13, 14]. Anizotropia wynikająca ze zmiennej orientacji włókien prowadzi do nierównomiernej wytrzymałości na ściskanie, co wymaga precyzyjnego doboru parametrów skrawania w celu zapewnienia wydajności narzędzia i jakości powierzchni obrobionej [15].

Monitorowanie procesu skrawania kompozytów drewnopochodnych oferuje dwie kluczowe korzyści: zmniejszenie zużycia narzędzi skrawających i związanych z tym kosztów oraz poprawę jakości skrawania poprzez precyzyjne monitorowanie procesu, minimalizując tym samym straty surowców.



# 1. ANALIZA STANU ZAGADNIENIA

## 1.1. Wybrane aspekty procesu obróbki płyt drewnopochodnych

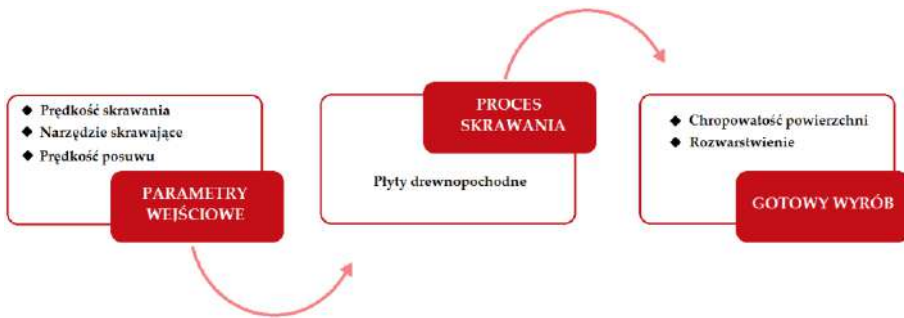
Płyty drewnopochodne stanowią obecnie szeroką gamę materiałów drewnopochodnych pod względem właściwości, użytych surowców i przeznaczenia. W zależności od metody produkcji i użytych surowców można je podzielić na płyty wiórowe (PB – ang. Particle Board), sklejkę, płyty pilśniowe o dużej gęstości (HDF – ang. High Density Fibreboard), płyty pilśniowe średniej gęstości (MDF – ang. Medium Density Fibreboard) i płyty o wiórach zorientowanych (OSB – ang. Oriented Strand Boards) [16, 17]. Płyty MDF to materiały wykonane z drobnych włókien drzewnych, sprasowanych pod wysokim ciśnieniem. Są gładkie i jednorodne, ale mogą być podatne na uszkodzenia krawędzi. Płyta OSB jest płytą kompozytową o płaskich, ukierunkowanych wiórach. W środkowej części płyty wióry ułożone są prostopadle do długiej krawędzi, w części zewnętrznej – równolegle. Taka konstrukcja nadaje płycie OSB sprężystości i zwiększa jej wytrzymałość mechaniczną [18].

Właściwości płyt drewnopochodnych zależą od trzech podstawowych grup czynników, które związane są z użytymi surowcami, procesem technologicznym wytwarzania oraz strukturą płyt. Wytrzymałość materiału drewnopochodnego wynika z oporu stawianego działaniu sił zewnętrznych przez jego wewnętrzne międzycząsteczkowe siły spójności [19, 20]. W przypadku płyt OSB, wraz ze wzrostem grubości, minimalny moduł wytrzymałości na zginanie (MoR – ang. Modulus of Rupture) maleje, podczas gdy wartości modułu sprężystości (MoE – ang. Modulus of Elasticity) pozostają niezmienione [19]. Do określenia właściwości mechanicznych płyt drewnopochodnych stosuje się podobne badania jak w przypadku metali, tj. próbę rozciągania, próbę ściskania, próbę zginania oraz pomiary twardości.

Przy ocenie właściwości płyt drewnopochodnych przyjmuje się ogólną zasadę, że właściwości wytrzymałościowe rosną wraz ze wzrostem gęstości materiału. Gęstość materiału jest bezpośrednio zależna przede wszystkim od gęstości surowca i parametrów procesu prasowania. Znajomość rozkładu gęstości na przekroju poprzecznym materiałów drewnopochodnych jest niezwykle ważna ze względu na właściwości płyt [21]. Oprócz surowca drzewnego na właściwości wytwarzanych płyt wpływają również substancje chemiczne wprowadzane w procesie, takie jak kleje, żywice, środki hydrofobowe itp. Ponadto, właściwości te bezpośrednio wpływają na sposób obróbki płyt i dlatego są istotne w badaniu zużycia ostrzy narzędzi skrawających i delaminacji materiału podczas procesu obróbki.

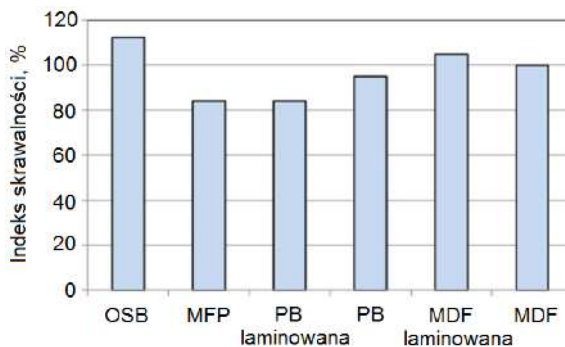
Obróbka płyt drewnopochodnych odbywa się na wysokowydajnych obrabiarkach CNC z możliwością prowadzenia obróbki z płynną regulacją prędkości skrawania i posuwu. Obróbka płyt drewnopochodnych jest równie wymagająca, jak obróbka materiałów kompozytowych na bazie polimerów i metali [22].

Parametry procesu skrawania są ściśle związane z wydajnością obróbki [23]. Zbyt niskie parametry obróbki prowadzą nie tylko do zwiększenia trwałości ostrzy narzędzi skrawających, ale bezpośrednio obniżają wydajność produkcji [24]. Prędkość skrawania i prędkość posuwu to główne parametry obróbki (rys. 1.1), które istotnie wpływają na zużycie ostrza jak i odpowiednią jakość obróbki [25].



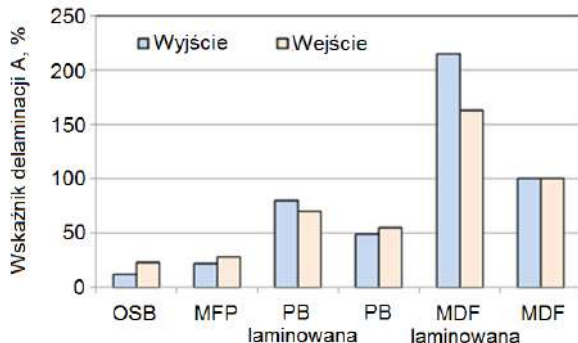
Rys. 1.1. Relacje pomiędzy parametrami wejściowymi i wyjściowymi [26]

Zmienna struktura wewnętrzna płyt i zawartość żywic adhezyjnych na ogół wpływają na pogorszenie jakości obróbki i szybsze zużycie ostrzy narzędzi skrawających. Zużycie jest również wynikiem zanieczyszczenia materiału obrabianego twardymi cząstkami [27, 28]. Badania dotyczące wiercenia przeprowadzone przez Borysiuka i Wilkowskiego [19] wykazały, że w odniesieniu do oporu skrawania (rys. 1.2) oraz jakości powierzchni otworu na wejściu i wyjściu narzędzia z materiału obrabianego (rys. 1.3) występuje znaczne zróżnicowanie analizowanych wskaźników skrawalności pomiędzy różnymi rodzajami płyt drewnopochodnych.



Rys. 1.2. Porównanie wskaźnika skrawalności [19]

Przy wyznaczaniu względnych wskaźników skrawalności jako materiał referencyjny przyjęli płytę MDF. Oczywiście jest, że wyższa wartość względnego wskaźnika oznacza lepszą skrawalność dla danego kryterium [29].



Rys. 1.3. Porównanie współczynnika delaminacji na wejściu i wyjściu narzędzia z otworu [19]

Trwałość ostrza narzędzia skrawającego jest wartością, która bezpośrednio charakteryzuje czas skrawania lub pośrednio charakteryzuje liczbę wykonanych operacji, obrabianych elementów lub długość drogi skrawania do momentu stępienia ostrza, czyli jego niezdatności do dalszej pracy. Wytwarzanie narzędzi skrawających o coraz lepszych właściwościach użytkowych jest podstawą każdej nowoczesnej obróbki [30]. Zwiększanie trwałości ostrzy w pełni uzasadnia wzrost kosztów użytego materiału ostrza. Jednakże zwiększanie efektywności pracy narzędzi poprzez zwiększenie ich trwałości, wydajności i niezawodności jest nadal jednym z głównych kierunków badań dotyczących wzrostu produkcji [23, 31].

Niska trwałość ostrzy, oznaczająca szybkie zużycie krawędzi skrawających, jednoznacznie wskazuje na niską skrawalność obrabianego materiału. Zużycie ostrzy narzędzi skrawających i związane z tym koszty (zarówno bezpośrednie, jak i pośrednie) stanowią zazwyczaj istotny problem w produkcji przemysłowej [29]. Kolejny aspekt to zużycie, związane ze zmianą geometrii ostrza, będące złożonym problemem wynikającym z interakcji wielu mechanizmów. Podczas obróbki ostrza narażone są na działanie wysokich nacisków jednostkowych i wysokich temperatur.

Wilkowski i Wieloch [29] omówili następujące rodzaje zużycia ostrzy: ścierne, adhezyjne, dyfuzyjne, termiczne i chemiczne. Mechaniczne zużycie ścierne występuje wtedy, gdy w wyniku mikroskrawania i zachodzenia się wierzchołków chropowatości powierzchni następuje zjawisko usuwania cząstek materiału ostrza [30]. Tego typu zużycie może wystąpić pomiędzy powierzchnią narzędzia a wszelkimi twardymi zanieczyszczeniami zawartymi w obrabianych płytach. Zużycie adhezyjne to zjawisko powstawania bardzo silnego wiązania (adhezji) pomiędzy cząstkami materiałów współpracujących pod wpływem sił międzycząsteczko-

wych [32, 33]. Zużycie dyfuzyjne jest spowodowane przenikaniem atomów z materiału ostrza do materiału obrabianego i odwrotnie [25, 34]. Zużycie chemiczne jest spowodowane interakcją chemiczną warstw tlenków i innych związków chemicznych na powierzchniach styku ostrza z materiałem obrabianym. Wysoka temperatura w strefie styku powoduje zmiany mikrostrukturalne w materiale narzędzia, które mogą prowadzić nawet do odkształcenia plastycznego ostrza [14].

Jakość obrobionej powierzchni płyt drewnopochodnych jest istotnym czynnikiem wpływającym na końcowy wygląd produktu, jego właściwości mechaniczne oraz późniejsze procesy technologiczne [17]. Podstawowym parametrem charakteryzującym jakość obrobionej powierzchni jest jej topografia, określana parametrami chropowatości. Jakość powierzchni po procesie obróbki zależy od geometrii narzędzia skrawającego i jego materiału [35], właściwości obrabianego materiału [36], rodzaju procesu obróbki [37], parametrów obróbki [38].

Systemy monitorowania procesu skrawania opierają się na sygnałach generowanych podczas obróbki (wibracje, składowe siły skrawania, emisja akustyczna, moc prądu) [39]. Jakość powierzchni, a tym samym pośrednio stan narzędzia, można monitorować również w trybie offline [40, 41]. Miary statystyczne sygnałów w dziedzinie czasu i częstotliwości (skośność, wartość średnia, kurtoza itp.) pochodzące bezpośrednio z czujników są powszechnie stosowane jako cechy diagnostyczne procesu skrawania. Świderski i in. [42] stwierdzili, że najlepsze wyniki monitorowania można uzyskać, stosując czujniki momentu skrawania i składowych siły skrawania. Jednak ze względu na wysoki koszt tych czujników i trudność montażu, autorzy zalecają stosowanie czujników drgań, które pomimo niższej dokładności są łatwiejsze w montażu.

Obecnie w wysoce zautomatyzowanych obrabiarkach CNC do obróbki płyt drewnopochodnych stosuje się różne podejścia do monitorowania procesu skrawania. Złożoność procesu obróbki wymaga analizy szeregu różnych rozwiązań dotyczących czujników i analizy sygnałów diagnostycznych z wykorzystaniem metod analitycznych [43], metod sztucznej inteligencji (ANN – ang. Artificial Neural Networks), uczenia maszynowego (ML – ang. Machine Learning) [44, 45], modeli autoregresyjnych (AR – ang. Autoregressive Model) [46] i systemów logiki rozmytej (FL – ang. Fuzzy Logic) [47]. Podstawowe metody analityczne, takie jak analiza wariancji (ANOVA), są stosowane do określania wpływu parametrów skrawania na trwałość ostrzy narzędzi jak i jakość obróbki i ich interakcji [48]. Statystyczne modele cech diagnostycznych można również generować z wykorzystaniem analizy falkowej (WA – ang. Wavelet Analysis) [47, 49].

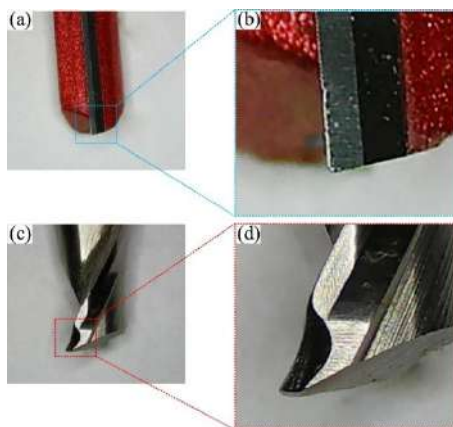
W ostatniej dekadzie stosowanie algorytmów uczenia maszynowego w przemyśle obróbki tworzyw drzewnych dynamicznie rośnie. Pomimo rosnącej popularności metod sztucznej inteligencji, występują również pewne problemy z wykorzystaniem rozwiązań głębokiego uczenia (DL – ang. Deep Learning) czy sieci neuronowych. Po pierwsze, metody te wymagają dużych zbiorów treningowych do poprawnego działania. Im większa ilość wymaganych danych, tym większa

złożoność analizowanego problemu. Po drugie, metody te mają ograniczone możliwości predykcyjne dla zakresu danych wyjściowych, które nie zostały uwzględnione w zbiorze treningowym [50].

Adaptacja systemów monitorowania procesów obróbki metali do skrawania materiałów drewnopochodnych jest złożona ze względu na czynniki wpływające na stan narzędzi skrawających do obróbki materiałów drewnopochodnych oraz fundamentalne różnice w ich konstrukcji [10]. Podczas gdy zużycie narzędzi w obróbce metali wynika głównie z oddziaływań mechanicznych i termicznych między narzędziem, a materiałem obrabianym [11, 12], skrawanie materiałów drewnopochodnych wprowadza dodatkowe czynniki wynikające z ich właściwości.

Kleje i wilgoć przyczyniają się do korozji chemicznej, oprócz efektów zużycia mechanicznego i termicznego. Dlatego też, na ostrza skrawające, stosowane są materiały bardziej odporne na zużycie, takie jak węgiel wolframu lub diament polikrystaliczny (PCD – ang. Polycrystalline Diamond), celem zwiększenia wydajności skrawania i trwałości ostrzy narzędzi skrawających [51, 52]. Zmiany wielkości cząstek i właściwości kleju powodują wahania siły skrawania, co wymaga odmiennej konstrukcji narzędzi w stosunku do metali, aby poradzić sobie z tą dynamiką zmian [13, 14].

Na przykład, frezy proste o większych kątach przyłożenia ( $15\text{--}25^\circ$ ) są stosowane przy frezowaniu materiałów drewnopochodnych, aby przeciwdziałać jego elastyczności, podczas gdy frezy śrubowe o mniejszych kątach ( $2\text{--}10^\circ$ ) są powszechnie stosowane do frezowania metali, aby zmniejszyć obciążenie ostrza wynikające z wpływu znacznej twardości materiału obrabianego [53]. Rysunek 1.4 przedstawia kluczowe różnice między narzędziami do obróbki materiałów drewnopochodnych, a narzędziami do obróbki metali oraz ilustruje ich typowe postaci zużycia.



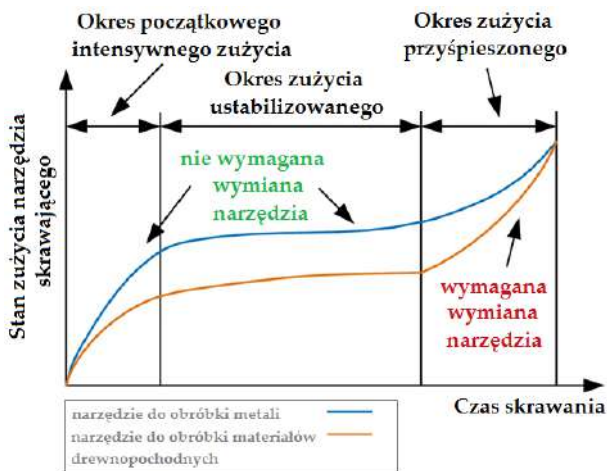
Rys. 1.4. Różnice pomiędzy narzędziami do obróbki materiałów drewnopochodnych, a narzędziami do obróbki metali oraz ich typowe formy zużycia: a) prosta krawędź skrawająca narzędzia do frezowania materiałów drewnopochodnych, b) typowa postać zużycia przy stosowaniu narzędzia (a), c) śrubowa krawędź skrawająca freza do frezowania metali, d) typowa postać zużycia przy stosowaniu narzędzia (c) [26]

Anizotropia wynikająca ze zmiennej orientacji włókien prowadzi do nierównomiernego rozkładu wytrzymałości materiału obrabianego, co wymaga szczególnej regulacji parametrów skrawania w celu zapewnienia wydajności narzędzia i jakości powierzchni obrabianej [15]. Obecność zanieczyszczeń w płytach drewnopochodnych może również powodować nagłe wahania wartości siły, prowadzące do niebezpiecznych zdarzeń, takich jak delaminacja [54].

Ogólnie rzecz biorąc, czynniki wpływające na zużycie ostrzy narzędzi skrawających podczas obróbki materiałów drewnopochodnych są równie zmienne i nieprzewidywalne jak przy skrawaniu metali.

Jak wcześniej wspomniano, do popularnych materiałów stosowanych na narzędzia skrawające do obróbki materiałów drewnopochodnych należą stal szybkołotną (HSS – ang. High Speed Steel), węgiel wolframu (WC – ang. Tungsten Carbide) i diament polikrystaliczny. Choć narzędzia PCD zapewniają dłuższą żywotność, ich wysoki koszt i trudności w ostrzeniu ograniczają ich powszechne stosowanie [55]. Mechanizm zużycia ostrzy narzędzi jest jednak spójny dla wszystkich materiałów narzędziowych: ostrza przechodzą przez fazę początkowego zużycia, fazę zużycia ustabilizowanego i fazę przyspieszonego zużycia. W fazie szybkiego zużycia, zużycie adhezyjne ostrzy narzędzi skrawających do materiałów drewnopochodnych jest dominującą formą zużycia niż w przypadku narzędzi skrawających do metali. Dla przykładu, kleje w płytach MDF zwiększają ścieralność, co wymusza stosowanie węgla wolframu zamiast HSS [56].

Typowa krzywa zużycia ostrzy narzędzi stosowanych w obróbce płyt drewnopochodnych jest przedstawiona na rys. 1.5. Czas trwania każdego etapu zużycia różni się znacząco w zależności od materiału narzędzia i warunków skrawania, co utrudnia dokładne przewidywanie przebiegu zużycia [57].

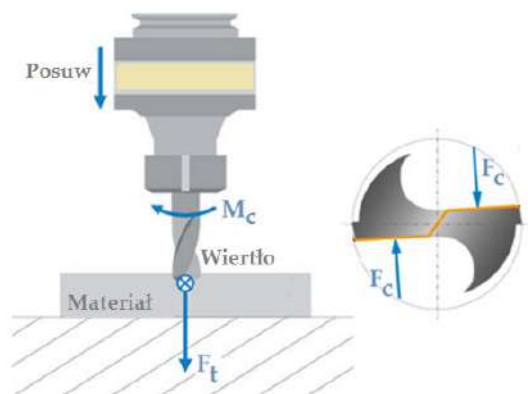


Rys. 1.5. Typowa krzywa zużycia ostrzy narzędzi stosowanych w obróbce materiałów drewnopochodnych i metalowych [26]

W pierwszym okresie następuje docieranie się współpracujących powierzchni. W przypadku skrawania następuje wyrównanie mikronierówności powierzchni ostrza skrawającego. Wielkość zużycia zależy tu głównie od topografii powierzchni ostrza oraz w pewnym stopniu od jego geometrii. Drugi okres charakteryzuje się stałą intensywnością zużycia, zależną od warunków współpracy z materiałem obrabianym. Okres ten trwa tak długo, aż ulegną zmianie ustalone przy końcu pierwszego okresu warunki tej współpracy. W trzecim okresie następuje mniej lub bardziej gwałtowny wzrost intensywności zużycia, prowadzący do całkowitej utraty przez ostrze właściwości skrawnych. Dzieje się to na skutek osiągnięcia przez ostrze dopuszczalnych wartości wskaźników zużycia ostrza.

## 1.2. Opory skrawania przy wierceniu i frezowaniu

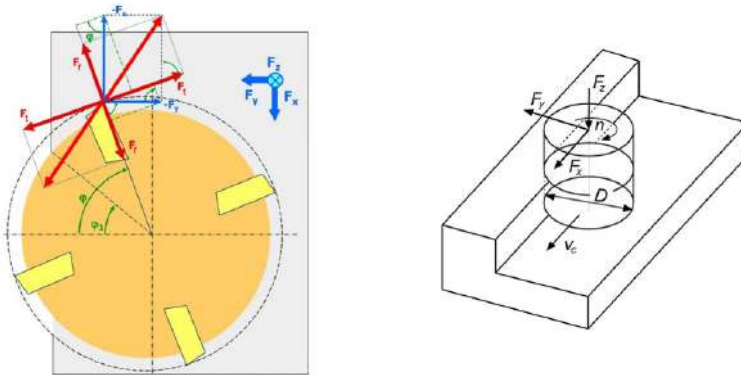
Z pewnym przybliżeniem można założyć, że na każde ostrze wiertła działa wypadkowa siła skrawania. Orientując układ odniesienia, oddzielnie dla każdej krawędzi, zaczepia się go umownie, na połowie promienia wiertła siły skrawania  $F_c$  działające na każdą z głównych krawędzi oraz siłę osiową  $F_t$  działającą na kierunku wyznaczonym przez wektor prędkości posuwu (rys. 1.6). Dwie siły składowe działające na kierunku wyznaczonym przez wektor prędkości obwodowej punktu zaczepienia siły  $F_c$  tworzą moment skrawania  $M_c$ . Powyżej przyjęty (uproszczony) rozkład sił poniekąd wynika z zastosowanego w badaniach własnych układu do pomiaru oporów skrawania.



Rys. 1.6. Rozkład sił przy wierceniu

Zagadnienia rozkładu siły przy frezowaniu są bardziej złożone niż w przypadku wiercenia. Wynika to ze specyfiki procesu frezowania: pola przekrojów warstw skrawanych są zmienne podczas skrawania od zera do pewnej wielkości maksymalnej lub odwrotnie. Podczas frezowania skrawa jednocześnie jedno lub kilka ostrzy, przy czym często liczba jednocześnie skrawających ostrzy jest

zmienna. W trakcie frezowania czołowego na każde ostrze freza działają następujące siły składowe: obwodowa  $F_c$ , promieniowa  $F_f$  oraz osiowa  $F_p$  (rys. 1.7).



Rys. 1.7. Rozkład siły przy frezowaniu

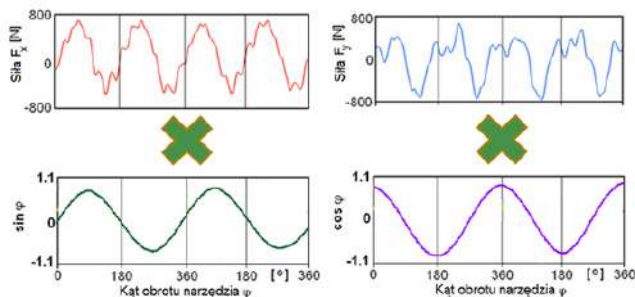
Orientując osie współrzędnych układu odniesienia w kierunkach: ruchu posuwowego i osi freza oraz w kierunku prostopadłym do płaszczyzny wyznaczonej przez te dwie osie otrzymuje się składowe  $F_x$  i  $F_y$  związane z przedmiotem obrabianym.

Chwilowe wartości sił składowych wypadkowych  $F_c$  oraz  $F_f$  można wyznaczyć z zależności:

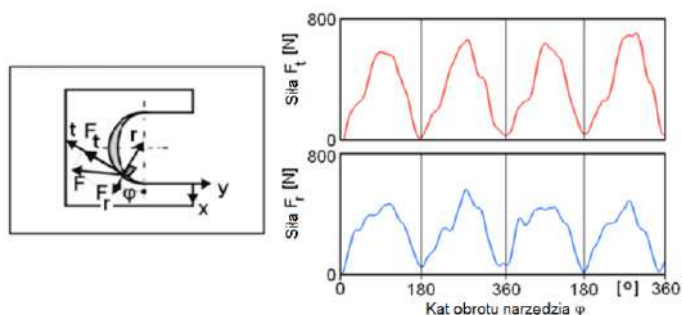
$$F_c = F_x \cos \varphi - F_y \sin \varphi \quad (1.1)$$

$$F_f = -F_x \sin \varphi - F_y \cos \varphi \quad (1.2)$$

Na rysunku 1.8 przedstawiono przykładowe przebiegi sił  $F_x$  i  $F_y$  przy frezowaniu czołowym płyty wiórowej związanych z przedmiotem obrabianym w funkcji kąta obrotu narzędzia  $\varphi$ . Mając takie przebiegi i wykorzystując zależności (1.1) i (1.2) można uzyskać chwilowe wartości sił składowych  $F_c$  i  $F_f$ , co przedstawiono na rys. 1.9.



Rys. 1.8. Przebiegi sił  $F_x$  i  $F_y$  w funkcji kąta obrotu narzędzia

Rys. 1.9. Przebiegi sił  $F_t$  i  $F_r$  w funkcji kąta obrotu narzędzia

### 1.3. Wielkości fizyczne stosowane do monitorowania obróbki

Metody monitorowania narzędzi są generalnie klasyfikowane jako metody bezpośrednie i pośrednie, przykłady tych metod przedstawiono w tab. 1.1. Chociaż metody te są szeroko stosowane w obróbce skrawaniem metali, ich bezpośrednie przeniesienie do obróbki skrawaniem materiałów drewnopochodnych napotyka na trudności ze względu na specyficzne właściwości tych materiałów.

Tabela 1.1. Metody monitorowania bezpośredniego i pośredniego

Metody bezpośrednie	Ograniczenia	Metody pośrednie	Ograniczenia
Optyczne	Wymaga, aby narzędzie było nieruchome i nie narażone na wpływy otoczenia	Sygnały sił i wielkości pochodnych	Wymaga modyfikacji konstrukcji obrabiarek. Drogie czujniki.
Analiza obrazu	Trudności z przechwytywaniem obrazu podczas skrawania.	Drgania	Prosta instalacja. Nie ingeruje w konstrukcję obrabiarki. Trudna redukcja ła.
Kontaktowe	Kontakt sondy pomiarowej pomiędzy operacjami.	Moc prądu	Łatwe pozyskiwanie sygnału. Występuje opóźnienie sygnału.
		Temperatura	Silnie wpływem otoczenia.
		Emisja akustyczna	Szczególne wymagania dotyczące miejsca instalacji

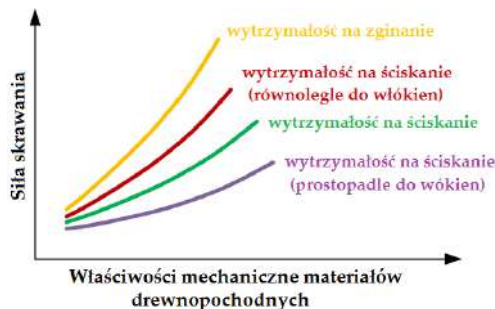
Na przykład, w obróbce skrawaniem metali, metody bezpośredniego monitorowania, takie jak pomiar optyczny, pomiar rezystancji i rozpoznawanie obrazu, wykazują dużą skuteczność w analizie zużycia narzędzi. Jednak w procesach obróbki materiałów drewnopochodnych czynniki takie jak przyleganie wiórów i osiadanie pyłu drzewnego utrudniają stosowanie tych metod, co sprawia, że metody bezpośrednie są mniej skuteczne i trudniejsze do wdrożenia w warunkach przemysłowych.

Alternatywą są pośrednie metody monitorowania, takie jak sygnały: siły skrawania i wielkości pochodnych, mocy prądu silnika, emisji akustycznej, temperatury i drgań. Sygnały te nie odzwierciedlają bezpośrednio zużycia narzędzia, lecz są przetwarzane w celu pośredniego określenia jego stanu. Metody pośrednie są często stosowane w procesie skrawania materiałów drewnopochodnych, ale wymagają pokonania szeregu wyzwań związanych zakłóceniami sygnału.

### 1.3.1. Opory skrawania

W procesie skrawania płyt drewnopochodnych wymagana siła skrawania nie zawsze jest skorelowana ze zużyciem ostrza narzędzia skrawającego. Ta zależność, w której zużycie ostrza prowadzi do wyższych wartości sił skrawania podczas procesu obróbki metali, jest dobrze ugruntowana [58, 59]. Sygnały siły skrawania są powszechnie uważane za jedną z najdokładniejszych i najbardziej wiarygodnych pośrednich metod monitorowania stanu narzędzia, ze względu na proste metody przetwarzania [60]. To podejście jest skuteczne w obróbce skrawaniem metali, gdzie monitorowanie procesu oparte na siłach jest zwykle osiągane poprzez opracowywanie modeli, które korelują wartość siły ze stanem narzędzia skrawającego [61]. Jednakże w przypadku skrawania materiałów drewnopochodnych różne czynniki przyczyniają się do wahań sił skrawania [62].

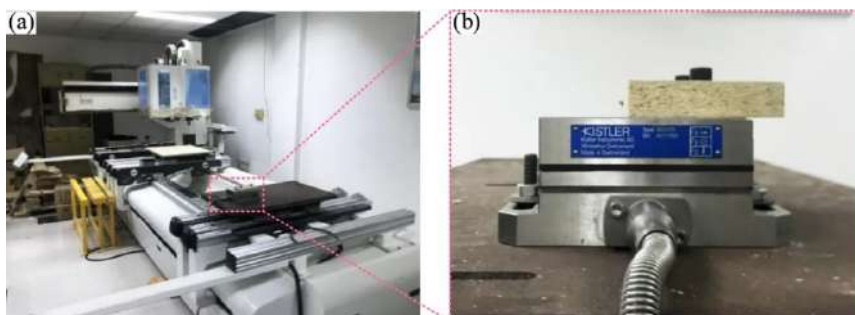
Jak pokazano na rys. 1.10 właściwości płyt drewnopochodnych odgrywają znaczącą rolę w tej zmienności. Wahania te wynikają z nieprzewidywalnych orientacji włókien oddziałujących z narzędziem pod nieznanymi kątami, co wymaga złożonych modeli do zrozumienia zależności między siłami skrawania a stanem narzędzia [63].



Rys. 1.10. Wpływ właściwości płyt drewnopochodnych na wartość siły skrawania [26]

Kluczowym wyzwaniem w zastosowaniu monitorowania obróbki opartego na sile skrawania do skrawania materiałów drewnopochodnych jest opracowanie modelu, który dokładnie koreluje siły skrawania, warunki skrawania i zużycie narzędzia, minimalizując jednocześnie wpływ budowy płyt drewnopochodnych i ich anizotropii.

W kilku badaniach podjęto próbę uwzględnienia zmiennych związanych z formowaniem wiórów i siłami a zużyciem w modelowaniu procesów obróbki skrawaniem materiałów drewnopochodnych [64]. Modele nieliniowe wykazały lepszą skuteczność w charakteryzowaniu stanu narzędzia w porównaniu z modelami liniowymi [65]. Jednak opracowanie dokładniejszego i bardziej kompleksowego modelu siły skrawania dostosowanego do skrawania materiałów drewnopochodnych nadal jest głównym kierunkiem dalszych badań. Ponadto wcześniejsze badania z zastosowaniem czujników do pomiaru siły wymagały modyfikacji zespołu obrabiarki (jak pokazano na rys. 1.11), co miało wpływ na ingerencję w strukturę obrabiarki [66]. Podkreśla to potrzebę badań nad alternatywnymi metodami zbierania sygnałów siły skrawania, które w mniejszym stopniu zakłócają trwający proces obróbki skrawaniem.

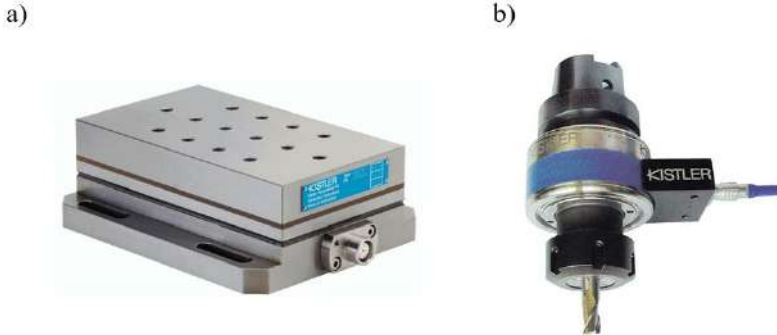


Rys. 1.11. Instalacja czujnika sił na obrabiarence CNC [26]

Wiadomo, że siła skrawania zależy nie tylko od warunków skrawania, ale także od geometrii ostrza, która zmienia się wraz z jego postępującym zużyciem. Te zmiany z kolei generalnie powodują zmiany wartości siły skrawania. Jak wykazano w licznych publikacjach, w tym [67, 68], siła skrawania wykazuje korelację ze stanem narzędzia skrawającego. Dlatego zastosowania pomiaru siły zostało zidentyfikowane jako skuteczna metoda diagnozowania i szacowania zużycia ostrza narzędzia [69].

Najdokładniejszymi czujnikami do pomiaru oporów skrawania są dynamometry piezoelektryczne, instalowane bezpośrednio na obrabiarence jako część uchwytu narzędzia lub mocowanie przedmiotu obrabianego – przykłady podano na rys. 1.12. Te dynamometry mają dużą sztywność, a w konsekwencji wysoką częstotliwość drgań własnych. Ich wysoka rozdzielczość umożliwia pomiar dyna-

micznych zmian wartości sił skrawania i wielkości pochodnych. Jednak te dynamometry są drogie i podatne na uszkodzenia spowodowane przypadkowym przeciążeniem.



Rys. 1.12. Wieloskładnikowe dynamometry kwarcowe firmy Kistler: a) dynamometr 3-składnikowy do pomiaru siły skrawania przy frezowaniu, b) dynamometr 4-składnikowy do pomiaru momentu obrotowego i trzech ortogonalnych składowych siły skrawania [26]

Jak wspomniano powyżej do oceny stanu narzędzia i procesu skrawania stosuje się wyrafinowane (najdroższe) czujniki do pomiaru momentu skrawania i siły skrawania (rys. 1.12b). Mogą one być z powodzeniem stosowane na obrabiarkach wielowrzecionowych, ponieważ każde narzędzie jest monitorowane niezależnie.

### 1.3.2. Moc prądu silnika

W warunkach przemysłowych obróbki materiałów drewnopochodnych uzyskiwanie sygnałów siły skrawania i wielkości pochodnych za pomocą czujników jest zarówno kosztowne, jak i trudne w realizacji. Jednakże zmiany siły skrawania mogą być pośrednio reprezentowane przez inne sygnały z obrabiarki.

Wraz ze wzrostem siły skrawania spowodowanym zużyciem ostrza obserwuje się odpowiedni wzrost momentu obrotowego obrabiarek, co prowadzi do wzrostu mocy prądu silnika wrzeciona. Zatem monitorowanie mocy silnika wrzeciona służy jako pośrednia metoda oceny sił skrawania narzędzi do obróbki metali [70]. Zużycie ostrzy wykazuje liniową zależność w funkcji zmian mocy silnika wrzeciona, przy założeniu pomijalnych strat energii występujących w procesach skrawania [71].

Kluczową zaletą tej metody jest jej minimalny wpływ na strukturę i konfigurację obrabiarki CNC. Czujnik mocy można wygodnie zainstalować w układzie sterowania obrabiarki, jak pokazano na rys. 1.13. Ponadto niski koszt czujników do pomiaru mocy sprawia, że podejście to jest wysoce opłacalne dla systemów monitorowania procesów obróbki. Co więcej, występuje stabilność sygnałów pochodzących z czujników mocy silnika wrzeciona, na którą nie wpływa pył drzewny ani inne czynniki środowiskowe, co zapewnia niezawodne pomiary.



Rys. 1.13. Czujnik do pomiaru mocy prądu silnika wrzeciona zamontowany bezpośrednio w układzie sterowania CNC [26]

Dodatkową, godną uwagi zaletą tych czujników jest to, że nie kolidują one z konstrukcją obrabiarki i ich instalacja nie jest czasochłonna.

Jednak, pomimo tych zalet, sygnały mocy wrzeciona nie są często wykorzystywane w badaniach nad obróbką materiałów drewnopochodnych. Wynika to częściowo z niskiej zależności występującej między sygnałami mocy wrzeciona, a warunkami obróbki tych materiałów. Wynika to z faktu że, w trakcie obróbki materiałów drewnopochodnych występują małe wartości oporów skrawania, które nie przekładają się bezpośrednio na zmiany wartości mocy silnika. Przyszłe badania powinny skupić się na opracowaniu specjalistycznych algorytmów analizy danych dostosowanych do sygnałów mocy wrzeciona w celu poprawy monitorowania procesu obróbki materiałów drewnopochodnych.

### 1.3.3. Emisja akustyczna

Emisję akustyczną (AE – ang. Acoustic Emission ) definiuje się jako powstanie i rozprzestrzenianie się fal dźwiękowych o wysokiej częstotliwości (do 1 MHz), które powstają w wyniku naruszenia spójności materiału, co ma miejsce podczas obróbki skrawaniem. Czujniki AE, zaprojektowane dla monitorowania procesów skrawaniem, są dostosowane do temperatur panujących w strefie skrawania oraz uderzających lub ocierających się wiórów znajdujących się w strefie skrawania. Kilku producentów oferuje czujniki piezoelektryczne AE, które można łatwo zainstalować w pobliżu strefy skrawania (rys. 1.14).



Rys. 1.14. Przykładowy czujnik AE firmy Kistler

Zakres ich częstotliwości i amplituda są ściśle powiązane z poziomem zużycia ostrzy podczas obróbki tego samego materiału. Monitorowanie stanu narzędzi oparte na AE oferuje szereg zalet, w tym wysoką czułość, odporność na zakłócenia niskoczęstotliwościowe, prostą konstrukcję czujników i łatwość instalacji. Do powszechnie stosowanych czujników AE należą czujniki szerokopasmowe piezoelektryczne [72]. Aby zminimalizować zakłócenia, sygnały AE są zazwyczaj wstępnie przetwarzane za pomocą filtru dolnoprzepustowego, wstępnego wzmocnienia sygnału, wyznaczenia wartości skutecznej AE, określenia stałej całkowania sygnału i innych technik [73].

W obróbce skrawaniem metali, monitorowanie stanu narzędzia oparte na AE jest dobrze ugruntowane. Nawet niewielkie zmiany wartości prędkości wrzeciona i posuwu podczas obróbki mogą być skutecznie wykrywane poprzez odpowiednie przetwarzanie sygnałów AE [74, 75].

Badania wykazały, że amplituda szczytowa i częstotliwość sygnału AE są bardzo wrażliwe na warunki obróbki, osiągając współczynniki determinacji przekraczające 80% w eksperymentach frezowania [76]. Ta wrażliwość wynika z dwóch kluczowych czynników: po pierwsze, widmo sygnału AE w obróbce skrawaniem metali generalnie nie zawiera niskich częstotliwości zdominowanych przez drgania i hałas [77]. Z drugiej strony, twardsze materiały obrabiane zwiększają zdolność sygnałów AE do odzwierciedlania faktycznego stanu narzędzia [78, 79].

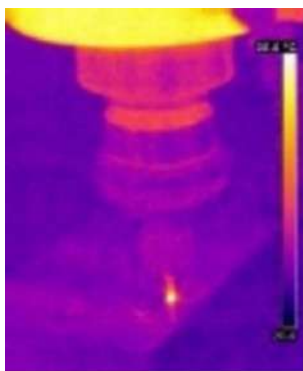
Proces skrawania materiałów drewnopochodnych stwarza natomiast wyjątkowe wyzwania. Niejednorodne właściwości płyt drewnopochodnych, takie jak klej i rozkład gęstości, prowadzą do złożonych i niepewnych zależności między sygnałami AE a stanem narzędzia [80].

### 1.3.4. Temperatura w strefie skrawania

Zużycie ostrza i temperatura skrawania mają wzajemny związek przyczynowy: zwiększone zużycie ostrza podnosi temperaturę skrawania, a podwyższona temperatura skrawania przyspiesza jego zużywanie [81]. Monitorując temperaturę powierzchni ostrza, można pośrednio ocenić jego zużycie. Skuteczne monitorowanie oparte na temperaturze wymaga modelowania związku między temperaturą narzędzia, a parametrami skrawania specyficznymi dla procesu [82, 83].

W badaniach dotyczących pomiaru temperatury skrawania w obróbce materiałów drewnopochodnych [84, 85] autorzy zastosowali termopary. Jednak ich duża bezwładność cieplna i konieczność osadzania ich blisko narzędzia skrawającego ograniczają ich praktyczność w procesach monitorowania stanu narzędzia w warunkach przemysłowych [86]. Do rejestrowania temperatur skrawania podczas obróbki dobrze nadaje się pomiar temperatury metodą bezkontaktową w podczerwieni. Pomiar temperatury koncentruje się na interfejsie narzędzia i materiału obrabianego w celu pomiaru intensywności promieniowania [87].

Do monitorowania stanu narzędzi w oparciu o pomiar temperatury na styku narzędzie-wiór stosuje się dwa podstawowe podejścia. Pierwsze wykorzystuje dane temperaturowe jako dane wejściowe dla modeli predykcyjnych, które muszą uwzględniać takie czynniki, jak przerywane skrawanie i wahania temperatury [88, 89]. Drugie obejmuje rejestrowanie termogramów w podczerwieni (IRT) strefy skrawania (rys. 1.15), co w połączeniu z technikami rozpoznawania obrazu umożliwia precyzyjne monitorowanie procesu. Jednak wysoki koszt sprzętu do obrazowania termicznego w podczerwieni ogranicza jego praktyczne zastosowanie [90].



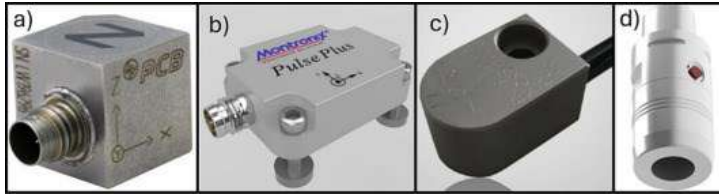
Rys. 1.15. Termogram w podczerwieni strefy skrawania

Monitorowanie oparte na pomiarze temperatury w procesie obróbki materiałów drewnopochodnych wciąż jest ograniczone [91]. Zarówno metody kontaktowe, jak i bezkontaktowe napotykać na trudności w skutecznym pomiarze temperatury skrawania. Kluczową szansą badawczą jest opracowanie opłacalnych, bezkontaktowych technik pomiaru temperatury, dostosowanych do unikalnych wyzwań związanych z obróbką materiałów drewnopochodnych. Ponadto, integracja metod bezkontaktowych, takich jak IRT, z zaawansowaną technologią rozpoznawania obrazu mogłaby ułatwić precyzyjne monitorowanie stanu narzędzi w czasie rzeczywistym. Jednak wysoki koszt urządzeń do obrazowania termicznego w podczerwieni stanowi istotną barierę dla powszechnego wdrożenia w przemyśle obróbki materiałów drewnopochodnych.

### 1.3.5. Drgania

Drgania spowodowane tarciem w strefie interakcji narzędzie-materiał obrabiany-wiór zwiększają się wraz ze wzrostem zużycia narzędzia. W konsekwencji, tempo zmiany zużycia ostrza można mierzyć online poprzez monitorowanie sygnału drgań. Piezoelektryczne czujniki sygnałów drgań można łatwo zainstalować na powierzchni obrabiarki. Czujniki te mogą mierzyć drgania mechaniczne konstrukcji obrabiarki wynikające z procesu skrawania (zwykle w zakresie 2–5 kHz).

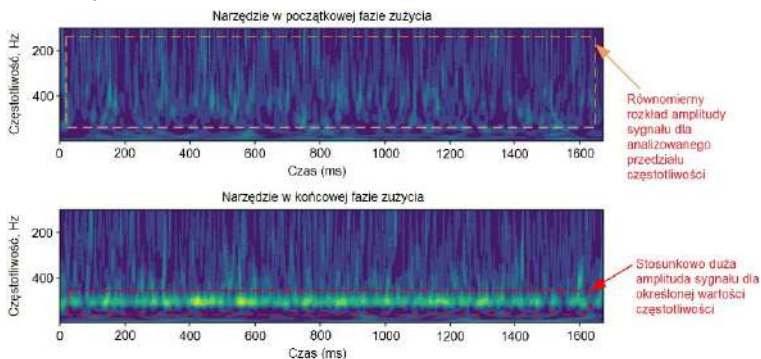
Takie rozwiązanie umożliwia wykrywanie uszkodzonych narzędzi, a także znaczących błędów procesowych, kolizji dynamicznych i awarii. Na rysunku 1.16 przedstawiono przykłady czujników drgań.



Rys. 1.16. Przykłady czujników drgań: a) akcelerometr trójosiowy PCB, b) mikrosystem elektro-mechaniczny Montronix, c) czujnik 3D o super niskiej częstotliwości Nordmann, d) uchwyt narzędziowy ze zintegrowanym czujnikiem drgań Ceratizit [92]

Sygnaly drgań należą do najbardziej miarodajnych wskaźników stanu obrabiarki. Istnieje dobrze udokumentowana korelacja między drganiami narzędzia, chropowatością powierzchni i zużyciem narzędzia [93, 94]. Wykorzystując inteligentne algorytmy, monitorowanie drgań znalazło szerokie zastosowanie w takich dziedzinach, jak badania nieniszczące i diagnostyka awarii obrabiarek [95].

W kontekście skrawania materiałów drewnopochodnych sygnały wibracyjne dostarczają szczegółowych informacji na temat stanu narzędzia [96]. Widmo czasowo-częstotliwościowe sygnałów drgań może także ujawnić subtelne zmiany, takie jak anomalie w budowie samej płyty drewnopochodnej. W jednym z badań autorzy [26] zidentyfikowali wyraźne różnice w profilach czasowo-częstotliwościowych dla narzędzi na różnych etapach zużycia ostrza podczas frezowania materiałów drewnopochodnych. W szczególności moc widmowa sygnału odpowiadająca nowemu narzędziu była mniejsza, w porównaniu z ostrzem narzędzia w kolejnym etapie zużycia (rys. 1.17). Wynik ten podkreśla duży potencjał zaawansowanych technik przetwarzania sygnałów drgań w celu poprawy dokładności oceny stanu narzędzi w zastosowaniach związanych ze skrawaniem płyt drewnopochodnych.



Rys. 1.17. Porównanie widma czasowo-częstotliwościowego narzędzia do obróbki płyt drewnopochodnych w różnych fazach zużycia [26]

Metody pomiaru sygnału drgań są podzielone na: kontaktowe i bezkontaktowe. Metody kontaktowe, takie jak tradycyjne akcelerometry, które są szeroko stosowane i analizowane pod kątem monitorowania stanu narzędzi w operacjach frezowania i wiercenia [97, 98, 99]. Analizuje się również metody bezkontaktowe pomiaru, w tym laserowe czujniki drgań [100, 101]. Techniki te stawiają jednak wysokie wymagania w zakresie stosowania tych czujników, zwłaszcza w złożonych i zmiennych warunkach skrawania materiałów drewnopochodnych. Rozwój wyspecjalizowanych, inteligentnych czujników jest postrzegany jako kluczowy kierunek badań pozwalający przezwyciężyć te wyzwania [102].

Istotną luką w literaturze jest brak analiz ilościowych sygnałów drgań w całym procesie skrawania płyt drewnopochodnych. Ustalenie wyraźnej korelacji między wahaniami sygnału drgań, parametrami skrawania i gatunkami płyt drewnopochodnych znacznie zwiększyłoby skuteczność monitorowania procesu opartego na sygnałach drgań. Takie postępy mogłyby umożliwić bardziej zaawansowane, oparte na danych, podejście do optymalizacji procesów skrawania i czasu pracy narzędzi, poprawiając zarówno wydajność operacyjną, jak i jakość produktu.

### **1.4. Jakość powierzchni w procesie skrawania**

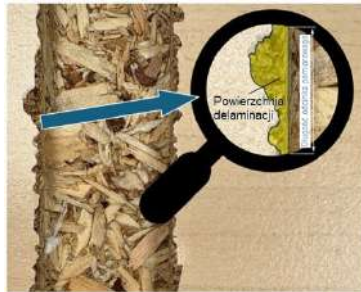
Aby ocenić jakość obróbki płyt drewnopochodnych, konieczne jest najpierw zdefiniowanie parametrów fizycznych, które reprezentują tę jakość. Systematyczny przegląd literatury zidentyfikował trzy takie parametry. Po pierwsze, można wziąć pod uwagę chropowatość powierzchni po obróbce [35]. Ten parametr rzeczywiście opisuje aspekt jakościowy, ponieważ zależność jest taka, że im wyższa chropowatość, tym niższa jakość. Nie ma on jednak bezpośredniej korelacji z wyglądem estetycznym elementu płyty. Wydaje się, że jest on istotny w przypadku materiałów surowych, takich jak, sklejka lub surowa płyta wiórowa. W przypadku elementów pokrytych farbą lub laminatem byłby niereprezentatywny i nieadekwatny. W ocenie elementu mebla lub całego produktu (mebla) przez użytkownika, wygląd krawędzi, krawędzi otworów lub frezowania ma większe znaczenie.

Dlatego w literaturze do opisu jakości obróbki płyt drewnopochodnych powlekanych częściej używa się obszaru uszkodzenia laminatu. Innymi słowy, odnosi się on do powierzchni elementu panelu, na której powinien znajdować się laminat (na powierzchni dekoracyjnej), ale został on nieprawidłowo usunięty w procesie skrawania. Już w 1984 roku metodę tę scharakteryzowano jako wysoce skuteczną i odpowiednią do obróbki skrawaniem, szczególnie w przypadku frezowania [103].

Szczególnym przypadkiem jest proces wiercenia. W ramach tej technologii niektóre badania definiują jakość poprzez wysokość uniesienia laminatu ponad jego właściwą powierzchnię [104]. Ma to istotne znaczenie praktyczne, ponieważ może skutkować niewłaściwym wyrównaniem elementu mebla z częścią towarzyszącą. Przykładem tego może być połączenie górnej półki szafki z boczną ścianką

za pomocą połączenia kołkowego, gdzie nadmiar materiału powoduje obecność szczeliny między elementami.

Ze względu na skuteczność, znaczenie i powszechne stosowanie metod opisujących obszar delaminacji, zagadnienie to wymaga dalszego wyjaśnienia. Po pierwsze, prostą i skuteczną metodą oceny jest obszar uszkodzenia odniesiony do długości odcinka pomiarowego. Nominalna linia krawędzi jest określana przez punkty, w których powierzchnia laminatu spotyka się z krawędzią obrabianego materiału. Każde odchylenie od tej linii wskazuje na utratę laminatu lub nawet samej płyty wiórowej. Całkowita powierzchnia tych odchyień, odniesiona do długości odcinka pomiarowego, definiuje omawiany wskaźnik, wskaźnik jakości = obszar uszkodzenia/długość odcinka pomiarowego [105], najczęściej przedstawiany w jednostkach mm<sup>2</sup>/m (rys. 1.18).



Rys. 1.18. Powierzchnia uszkodzenia odniesiona do wskaźnika jakości na długości odcinka pomiarowego [105]

Bardziej zaawansowana metoda oceny jakości obróbki polega na uwzględnieniu głębokości delaminacji. Badacze [103] zaobserwowali, że szersze wnikanie uszkodzeń ma większy wpływ na negatywną percepcję wizualną, szczególnie na krawędziach płyt meblowych. Dlatego wprowadzili oni wagi  $w_i$  do metody obliczania wskaźnika jakości. Im większa penetracja wady, tym większy jej wpływ na wskaźnik (rys. 1.19). Reprezentatywny wzór dla tego wskaźnika jest następujący (1.3):

$$\text{wskaźnik jakości} = \frac{\text{pole „a”} \cdot w_1 + \text{pole „b”} \cdot w_2 + \text{pole „c”} \cdot w_3}{\text{długość odcinka pomiarowego}} \quad (1.3)$$

W późniejszych badaniach nad rozkrojem płyt wiórowych tę metodę dalej rozwinięto i udoskonalono [106].



Rys. 1.19. Ważona powierzchnia uszkodzeń odniesiona do wskaźnika jakości długości [103]

Innym uproszczonym wskaźnikiem jakości jest określenie maksymalnego uszkodzenia wzdłuż badanego odcinka [107], wyrażonego w jednostkach długości, takich jak milimetry (rys. 1.20), za pomocą następującego wzoru (1.4):

$$\text{wskaźnik jakości} = A_{\max} \quad (1.4)$$

Zaletą tej metody jest łatwość zastosowania i pomiaru, ale jej główną wadą jest wrażliwość na występujące anomalie i duże pojedyncze uszkodzenia. Dlatego metoda ta jest skuteczna w przypadku płyt wysokiej jakości, narzędzi o bardzo małym zużyciu lub szybkich testów w warunkach przemysłowych. W przypadku wiercenia odmianą tego wskaźnika jest pomiar średnicy otworu do średnicy maksymalnej delaminacji. Wartość ta jest następnie odejmowana od średnicy nominalnej i dzielona przez dwa [108].

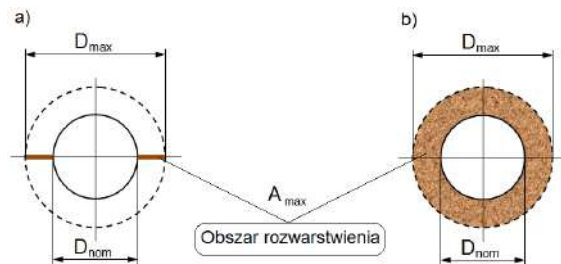


Rys. 1.20. Wskaźnik jakości maksymalnej głębokości uszkodzeń [107]

W literaturze z zakresu oceny delaminacji materiału wokół otworu można znaleźć prace, gdzie autorzy stosują wskaźniki oparte na pomiarze maksymalnej średnicy zaobserwowanych uszkodzeń lub określają powierzchnię delaminacji. Ostatnio jednak niektórzy autorzy w swoich badaniach stosują coraz częściej bezwymiarowy wskaźnik do oceny delaminacji. W pracy [109] zastosował bezwymiarowy wskaźnik w oparciu o maksymalną średnicę uszkodzonego obszaru wokół otworu  $F_d$ , który jest wyznaczany jako stosunek średnicy maksymalnej  $D_{\max} = 2R_{\max}$  strefy delaminacji, do średnicy nominalnej  $D_{\text{nom}}$ .

$$F_d = \frac{D_{\max}}{D_{\text{nom}}} \quad (1.5)$$

Równanie (1.5) przedstawia najczęściej używany wskaźnik delaminacji, który zapewnia zadowalające wyniki, gdy uszkodzenie ma regularny kształt. Jednakże, często występuje sytuacja gdy uszkodzenie prezentuje nieregularną formę, zawierającą przerwy i pęknięcia przy wejściu i wyjściu z otworu. W tym przypadku konwencjonalny współczynnik rozwarstwienia nie jest odpowiedni ze względu na fakt, że rozmiar pęknięcia nie jest wygodną reprezentacją wielkości uszkodzenia. Ponadto ta procedura nie wskazuje obszaru uszkodzenia, jak pokazano na rys. 1.21, gdzie ten sam współczynnik rozwarstwienia jest wyznaczany dla dwóch różnych warunków.



Rys. 1.21. Uszkodzenia laminatu wokół otworu: a) drobne pęknięcia, b) jednolity obszar uszkodzenia [110]

Dlatego w pracy [110] zaproponowano nowe podejście do pomiaru uszkodzeń w postaci skorygowanego współczynnika delaminacji ( $F_{da}$ ), obliczonego za pomocą równania (1.6).

$$F_{da} = \alpha \cdot F_d + \beta \cdot F_d^2 \quad (1.6)$$

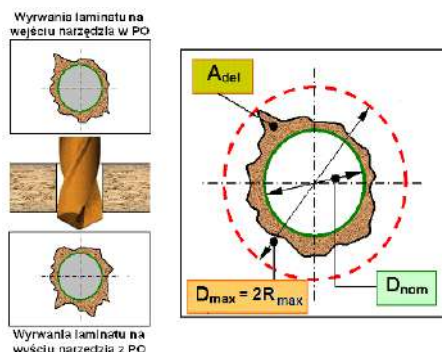
Pierwsza część równania (1.6) przedstawia wielkość udziału pęknięcia (konwencjonalny współczynnik rozwarstwienia,  $F_d$ ), a druga część udział obszaru uszkodzenia. Parametry  $\alpha$  i  $\beta$  są używane jako wagi w częściach równania (1.6).

W pracach [111, 112] autorzy stosują również bezwymiarowe wskaźniki w swoich badaniach. Wskaźniki  $D_{\text{RAT}}$  wprowadzony przez Mehta i in. [113], jest obliczany jako stosunek średnicy maksymalnej  $D_{\text{MAR}}$  strefy delaminacji do nominalnego pola powierzchni  $A_{\text{AVG}}$ , jak pokazano w zależności (1.7).

$$D_{\text{RAT}} = \frac{D_{\text{MAR}}}{A_{\text{AVG}}} \quad (1.7)$$

W pracy [114] autorzy zastosowali wskaźnik delaminacji  $DF$ , równoważny do kryterium (1.7) i jest on określony zależnością (1.8), gdzie  $A_{\text{del}}$  jest to pole powierzchni uszkodzenia laminatu (rys. 1.22), a  $A_{\text{nom}}$  wyraża pole powierzchni otworu nominalnego.

$$DF = \left( \frac{A_{del} - A_{nom}}{A_{nom}} \right) * 100\% \quad (1.8)$$

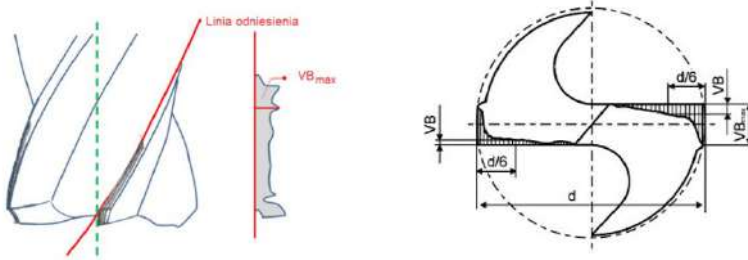


Rys. 1.22. Ilustracja graficzna konwencjonalnych wskaźników delaminacji

## 1.5. Okres trwałości ostrza i jego wpływ na wydajność i koszty

Okres trwałości ostrza jest to czas skrawania do jego stępienia, tj. do osiągnięcia maksymalnej dopuszczalnej wartości określonego wskaźnika zużycia lub np. wykruszenie krawędzi skrawającej czy wyłamanie znacznego fragmentu ostrza. Te ostatnie zjawiska nazywa się katastroficznym stępieniem ostrza (KSO). Podczas procesu skrawania, sprzężenie ciepłno-mechaniczne pomiędzy narzędziem, wiórem i obrabianą powierzchnią zwykle powoduje zużycie i pęknięcie ostrza. Konieczna jest wymiana ostrza, gdy jego zużycie osiągnie pewien poziom. Zazwyczaj mechanizmy zużycia, które ograniczają jego trwałość, składają się głównie z dwóch części: zużycia powierzchni przyłożenia i zużycia kraterowego, ponieważ powierzchnia przyłożenia ostrza trze o sztywny element, którym jest przedmiot obrabiany. Spowodowałyby to większe zużycie powierzchni przyłożenia, dlatego wartość zużycia jest zwykle ustalana zgodnie ze stanem zużycia powierzchni przyłożenia [115].

Norma ISO 3685-1993 stanowi, że szerokość zużycia powierzchni przyłożenia VB może być używana jako wskaźnik do pomiaru stanu zużycia ostrza podczas procesu skrawania (rys. 1.23).



Rys. 1.23. Bezpośrednie wskaźniki zużycia ostrza

Gdy powierzchnia przyłożenia jest regularnie zużyta, średnia szerokość pasma zużycia  $VB$  nie powinna przekraczać 0,3 mm. Gdy powierzchnia przyłożenia wykazuje nieregularne zużycie, maksymalna szerokość  $VB_{max}$  pasma zużycia nie powinna przekraczać 0,6 mm. Frezowanie jest procesem skrawania nieciągłego, a zużycie ostrza jest bardziej złożone w porównaniu do tradycyjnego toczenia. Trudno jest ocenić stan zużycia ostrza narzędzia frezarskiego, biorąc pod uwagę tylko szerokość zużycia powierzchni bocznej. Aby sprostać temu wyzwaniu, kilku badaczy wskazało, że powierzchnia zużycia powierzchni bocznej  $A_{VB}$  może określać zużycie narzędzia w dwóch wymiarach, co może dokładniej odzwierciedlać rzeczywisty stan zużycia ostrza [116, 117].

Przedstawione wskaźniki zużycia ostrza są obiektywne, mogą być zmierzone w najbardziej pewny sposób, wreszcie w sposób bezpośredni opisują zużycie ostrza. Kryterium trwałości jest więc w tym przypadku określoną wartością wybranego wskaźnika zużycia lub kombinacją takich wartości.

Zużycie ostrza, a zatem także okres trwałości, jest wielkością losową. Oznacza to, że ostrza kolejnych narzędzi pracujących w tych samych warunkach skrawania zużywają się nieco inaczej i ulegają stępieniu po różnym czasie.

Poszczególne okresy trwałości ostrza są w przybliżeniu symetrycznie rozproszone wokół wartości średniej  $T_{sr}$ . Liczne występowanie przedwczesnych, zwłaszcza katastroficznych stępień ostrza, prowadzące do wyraźnej niesymetryczności rozkładu świadczy o źle dobranych warunkach pracy. Zatem przy właściwych warunkach skrawania okres trwałości ostrza można opisać rozkładem normalnym. Odchylenie standardowe, będące miarą rozproszenia, jest w przybliżeniu proporcjonalne do wartości średniej, zależnej od parametrów i innych warunków skrawania.

W praktyce posługiwanie się średnim okresem trwałości właściwe jest tylko wtedy, gdy obróbka odbywa się pod bezpośrednim nadzorem operatora, który na bieżąco ocenia stan ostrza i wymienia je, gdy jest stępione. Przy obróbce zautomatyzowanej, gdy nadzór taki nie występuje, a nie ma także układów diagnostyki stanu narzędzia, konieczny jest taki dobór parametrów skrawania, aby stępienie ostrza z założonym prawdopodobieństwem nie występowało przed upływem założonego czasu obróbki.

Jednym z ważniejszych zagadnień w obróbce wiórowej jest dobór parametrów skrawania. Z uwagi na jednoczesność oczekiwań najlepszych efektów obróbki takich jak: jakość, dokładność, koszty i wydajność należy godzić niejednokrotnie zupełnie sprzeczne warunki. Przykładowo, z uwagi na jakość obróbki wskazany jest wybór małych posuwów, a z tym związany jest spadek wydajności.

Proces obróbki skrawaniem powinien być tak przeprowadzony, aby przy najmniejszych możliwych kosztach uzyskana została wymagana przez odbiorcę jakość obrabianych elementów, a czas ich wykonania nie przekroczył czasu określonego w zamówieniu.

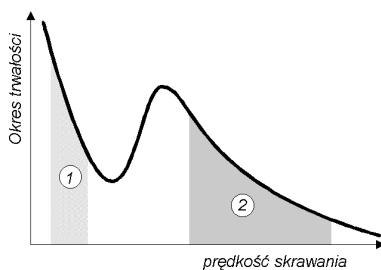
W pewnym uproszczeniu można przyjąć, że optymalizacja procesu skrawania polega na właściwym doborze technologicznych parametrów skrawania:  $a_p$ ,  $f$  i  $v_c$ . Dobór prędkości posuwu musi więc zapewniać wymaganą jakość powierzchni przy maksymalnej możliwej wówczas wydajności obróbki.

Dobór prędkości skrawania wynika z założonej trwałości ostrza, tzn. czasu, po którym ostrze jest ostrzone lub wymieniane. Zwiększenie prędkości skrawania, zwiększa co prawda wydajność obróbki, ale zmniejsza trwałość ostrza i zmusza do częstszej jego wymiany lub ostrzenia.

Opierając się na rozważaniach [118] poniżej opisano model obróbki w aspekcie ekonomicznym i wydajnościowym.

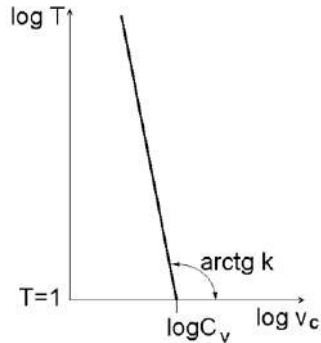
### 1.5.1. Zależność okresu trwałości ostrza od prędkości skrawania

Zależność okresu trwałości ostrza od prędkości skrawania  $T-v_c$  przedstawiono na rys. 1.24. Na rysunku zaznaczono dwa zakresy prędkości, którym odpowiadają opadające fragmenty krzywej. Z reguły wykorzystywany jest zakres 2.



Rys. 1.24. Zależność okresu trwałości ostrza od prędkości skrawania [118]

Taylor stwierdził, że opadające części wykresu  $T-v_c$  w układzie podwójnie logarymicznym można przedstawić w postaci prostej (rys. 1.25) zgodnie z równaniem (1.9).



Rys. 1.25. Zależność Taylora [118]

$$y = c + kx \quad (1.9)$$

gdzie przyjmuje się (1.10):

$$y = \log T, \quad x = \log v_c, \quad c = \log C_T \quad (1.10)$$

Podstawiając (1.10) do (1.9) otrzymuje się (1.11)

$$\log T = \log C_T + k \log v_c \quad (1.11)$$

co po zdelogarytmowaniu daje (1.12):

$$T = C_T v_c^k \quad (1.12)$$

Stała  $C_T$  odpowiada (tylko matematycznie!) trwałości ostrza przy prędkości skrawania  $v_c = 1$ . Jej wartość jest bardzo duża, a przez to niewygodna. Zauważmy, że zależność  $T - v_c$  przecina poziomą oś w punkcie ( $T = 1, v_c = C_v$ ), czyli  $C_v$  jest (znowu tylko matematycznie) prędkością skrawania odpowiadającą okresowi trwałości  $T = 1$ . Zachodzi zatem (1.13):

$$k = -\frac{\log C_T}{\log C_v} \quad \rightarrow \quad C_T = C_v^{-k} \quad (1.13)$$

Podstawiając (1.13), do (1.12) otrzymuje się (1.14):

$$T = C_v^{-k} v_c^k \quad (1.14)$$

a stąd równanie Taylora (1.15):

$$v_c T^{\frac{1}{k}} = C_v \quad (1.15)$$

Równanie (1.15) wykorzystywane jest w postaci użytkowej (1.16):

$$T = \left(\frac{v_c}{C_v}\right)^k \quad (1.16)$$

Zależność  $T-v_c$  wyznaczyć można na podstawie prób prowadzonych przy różnych prędkościach skrawania. Ogólnie można stwierdzić, iż stała  $C_v$  zależy od materiału obrabianego i innych warunków skrawania, zaś wykładnik  $k$  przede wszystkim od materiału ostrza i kryterium stopienia [118].

### 1.5.2. Trwałość największej wydajności ostrza narzędzia

Jednostkową wydajność obróbki  $q$  (1.17) można określić jako liczbę operacji wykonywaną w jednostce czasu. Jest ona odwrotnością czasu jednostkowego, który wyraża się zależnością (1.18).

$$q = \frac{1}{t_j} \quad (1.17)$$

$$t_j = t_m + \frac{t_z}{n_T} + t_p \quad (1.18)$$

gdzie:  $t_m = L/fn$  – czas maszynowy,  $L$  – długość przejścia,  $t_z$  – czas zmiany narzędzia,  $t_p$  – czas pomocniczy,  $n_T$  – liczba operacji na okres trwałości ostrza.

Poszukuje się minimum czasu jednostkowego, któremu odpowiada maksimum wydajności. Najpierw należy zidentyfikować we wzorze (1.18) czynniki zależne od okresu trwałości ostrza. Podstawiając do zależności na czas maszynowy zależności (1.19) oraz (1.20), otrzymuje się (1.21):

$$n = \frac{1000v_c}{\pi D} \quad (1.19)$$

$$v_c = C_v T^{1/k} \quad (1.20)$$

$$t_m = \frac{\pi DL}{1000fC_v} T^{-1/k} = C_m T^{-1/k} \quad (1.21)$$

Pomijając dla uproszczenia czas dobiegu i wybiegu narzędzia, można przyjąć, że czas skrawania równy jest czasowi maszynowemu. Liczbę operacji przypadającą na okres trwałości ostrza można określić wtedy jako (1.22):

$$n_T = \frac{T}{t_{skr}} = \frac{T}{t_m} = \frac{1}{C_m} T^{1+1/k} \quad (1.22)$$

Podstawiając równanie (1.21) i (1.22) do zależności na czas maszynowy otrzymuje się zależność (1.23)

$$t_j = C_m T^{-1/k} + C_m T^{-1-1/k} t_z + t_p \quad (1.23)$$

Pochodna czasu jednostkowego po okresie trwałości wyniesie (1.24):

$$\frac{\partial t_j}{\partial T} = -\frac{1}{k} C_m T^{-1/k-1} + \left(-1 - \frac{1}{k}\right) C_m T^{-2-1/k} t_z \quad (1.24)$$

Przyjmuje ona wartość 0 dla  $T = T_q$  – okresu trwałości największej wydajności. Dzieląc z kolei obustronnie przez  $C_m T_q^{-2-1/k}$  otrzymuje się (1.25):

$$-\frac{1}{k} T_q + \left(-1 - \frac{1}{k}\right) t_z = 0 \quad (1.25)$$

a stąd ostatecznie (1.26):

$$T_q = (-k - 1) t_z \quad (1.26)$$

Temu okresowi trwałości ostrza odpowiada prędkość skrawania największej wydajności zgodnie z zależnością (1.27):

$$v_q = C_v T_q^{1/k} \quad (1.27)$$

### 1.5.3. Ekonomiczna trwałość ostrza

Koszt operacji przedstawić można przy użyciu zależności (1.28):

$$K = t_m K_O + t_z \frac{K_O}{n_T} + \frac{K_N}{n_T} \quad (1.28)$$

gdzie:  $K_O$  – koszt obrabiarki, obsługi i narzutów za godzinę pracy,  $K_N$  – koszt narzędzia na ostrze.

Podstawiając do wzoru (1.28) zależności (1.20) i (1.21) otrzymuje się (1.29):

$$K = C_m T^{-1/k} K_O + (t_z K_O + K_N) C_m T^{-1-1/k} \quad (1.29)$$

Poszukuje się minimum kosztu w funkcji okresu trwałości ostrza. Różniczkując równanie (1.29) względem  $T$  otrzymuje się (1.30):

$$\frac{\partial K}{\partial T} = -\frac{1}{k} C_m T^{-1-1/k} K_O + \left(-\frac{1}{k} - 1\right) C_m (t_z K_O + K_N) T^{-2-1/k} \quad (1.30)$$

Pochodna ta przyjmuje wartość 0 dla  $T = T_e$ . Porównując zatem równanie (1.30) do zera i dzieląc otrzymane równanie przez  $K_0 C_m T_e^{-2-1/k}$ , otrzymuje się (1.31):

$$-\frac{1}{k} T_e + \left(-\frac{1}{k} - 1\right) \left(t_z + \frac{K_N}{K_0}\right) = 0 \quad (1.31)$$

a stąd ostatecznie (1.32)

$$T_e = (-k - 1) \left(t_z + \frac{K_N}{K_0}\right) \quad (1.32)$$

Okresowa prędkość skrawania umożliwiająca uzyskanie tego okresu trwałości ostrza to ekonomiczna prędkość skrawania  $v_e$  określona zależnością (1.33):

$$v_e = C_v T_e^{1/k} \quad (1.33)$$

## 1.6. Monitorowanie procesu skrawania

Automatyzacja i monitorowanie procesów produkcyjnych, w tym obróbki płyt drewnopochodnych, jest niezbędne dla zapewnienia odpowiedniej wydajności wytwarzania i korzyści ekonomicznych [42, 43]. Trend zrównoważonego rozwoju produkcji wpisuje się w koncepcję Przemysłu 4.0, która niedawno przekształciła się w Przemysł 5.0, a znane są nawet zapowiedzi wprowadzenia kolejnej fazy industrializacji jako Przemysł 6.0 [119]. Współcześni producenci wykorzystują praktycznie wyłącznie zautomatyzowane, wysokowydajne obrabiarki, które umożliwiają nieprzerwaną pracę. Jednak do kontrolowania i zarządzania zadaniami przetwórczymi nadal potrzebni są ludzie [39].

Kluczem jest kontrola zużycia ostrza narzędzia, które bezpośrednio oddziałuje z obrabianymi płytami drewnopochodnymi i podlega naturalnemu zużyciu. Systemy monitorowania stanu wiertła opierają się na sygnałach generowanych podczas wiercenia. Podstawowe sygnały wykorzystywane do monitorowania stanu wiertła obejmują drgania [42, 120, 121], siły i momenty skrawania [14, 42, 120], emisję akustyczną [120, 122] i moc prądu [39].

Systemy monitorowania i testowania stanu narzędzi wymagają specjalistycznych czujników. Skuteczność czujników emisji akustycznej w analizie procesów wiercenia drewna i materiałów drewnopochodnych jest kontrowersyjna, ponieważ są one wrażliwe na wpływ zakłóceń pochodzących z procesu skrawania [28, 123]. Jak zauważyli Świdorski i in. [42], najlepsze wyniki monitorowania można uzyskać stosując czujniki siły skrawania i momentu skrawania. Jednak ze względu na wysoki koszt tych czujników i trudność montażu autorzy zalecają stosowanie czujników drgań [42]. Niestety, w pełni autonomiczne systemy monitorowania stanu wiertel znajdują się na początkowym etapie rozwoju i czekają na skuteczne rozwiązania [39].

Skuteczność zaawansowanych systemów opartych na sztucznej inteligencji, takich jak sieci neuronowe [45], metody uczenia maszynowego [44, 45], sieci sygnalne [40], modele autoregresyjne [46], mapowanie klas ważonych gradientem [124], transformacje falkowe [47, 49] i systemy rozmyte [47, 48] do monitorowania zużycia ostrzy narzędzi i jakości powierzchni otworów została potwierdzona w analizowanych publikacjach. Jednak większość autorów wskazuje na potrzebę opracowania użytecznej formy uzyskiwania wiarygodnych danych diagnostycznych, które są niezbędne do trenowania algorytmów sztucznej inteligencji. Im większa ilość wymaganych danych, tym większa złożoność analizowanego problemu [50].

Delaminacja stanowi poważny problem technologiczny podczas wiercenia w płytach drewnopochodnych. Zjawisko to jest głównie wynikiem zużycia ostrza narzędzia lub nieprawidłowych parametrów procesu skrawania. Wnioski dotyczące wpływu tych parametrów na zjawisko rozwarstwienia różnią się w zależności od rodzaju użytego wiertła, parametrów obróbki i rodzaju płyty drewnopochodnej.

Ispas [125] stwierdził, że uszkodzenia płyt wiórowych laminowanych można uniknąć, stosując obróbkę z małą wartością prędkości posuwu i małym kącie wierzchołkowym wiertła. Bedeleian i in. [126] stwierdzili, że współczynnik delaminacji na wyjściu narzędzia jest najbardziej zależny od rodzaju wiertła. Zaobserwowali również, że zmniejszenie kąta wierzchołkowego wpływa na zmniejszenie siły posuwu i delaminację, co jest zgodne z wynikami Ispas i in. [127]. Jednocześnie zwiększenie kąta wierzchołkowego powoduje zmniejszenie momentu obrotowego i poprawę jakości krawędzi otworów [126].

Najlepszą jakość obróbki podczas wiercenia płyt wiórowych uzyskano za pomocą wiertła krętego o kącie wierzchołkowym  $90^\circ$  [125]. Jakość powierzchni krawędzi otworów wierconych w płytach wiórowych zmniejszyła się wraz ze spadkiem prędkości posuwu i wzrostem prędkości obrotowej wiertel krętych i łopatkowych [128]. W większości publikacji potwierdzono, że zwiększenie prędkości skrawania zmniejsza efekt rozwarstwienia, podczas gdy zwiększenie prędkości posuwu niekorzystnie wpływa na jakość powierzchni otworów [129, 130, 131, 132, 133, 134, 135]. Davim i in. [134] stwierdzili, że przy wysokich prędkościach skrawania uszkodzenie laminatu wokół otworów było minimalne i nie zależało od prędkości posuwu. Aby zmniejszyć uszkodzenia płyty MDF, Palanikumar i in. [129] zalecają małą średnicę wiertła, małą wartość posuwu i wysoką prędkość obrotową wrzeczona. Shirzaei i in. [136] stwierdzili, że parametrami, które miały największy wpływ na delaminację, były średnica wiertła i prędkość posuwu.

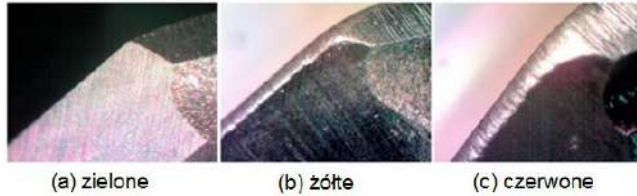
Kurek i in. [120] sklasyfikowali stan zużycia wiertel z ostrzami z węgla wolframu podczas wiercenia płyt wiórowych laminowanych jako „bezużyteczne” (zużyte) i „użyteczne” (wystarczająco ostre). Ich badania koncentrowały się na doborze odpowiednich zmiennych diagnostycznych do klasyfikacji stanu narzędzia do dwóch wyżej wymienionych klas. Parametry statystyczne opisujące zmianę

momentu skrawania, siły posuwu, drgań, i emisji akustycznej zostały wykorzystane do klasyfikacji cech przy użyciu szybkiej transformaty Fouriera i analizy falkowej. Rozpoznanie stanu wiertła (klasy) przeprowadzono przy użyciu drzewa decyzyjnego, maszyny wektorów nośnych i metody zespołowej uczenia maszynowego dla klasyfikacji, regresji i innych zadań – lasu losowego (RF) – decyzji wielowymiarowej, których wyniki porównano ze sobą. Algorytm sekwencyjnego wyboru cech sygnałów zapewnił wybór istotnych cech obróbki w dziedzinie czasu. Najlepsze wyniki rozpoznawania zużycia wiertła uzyskano dla klasyfikatora RF z wartością błędu poniżej 4%.

Jęgorowa i in. [50] wykorzystali obrazy otworów do klasyfikacji zużycia wiertła podczas wiercenia płyty wiórowej pokrytej laminatem. W eksperymentach wykorzystano wiertło wyposażone w ostrze z węgla wolframu. Jako wskaźnik stanu zużycia ostrza przyjęto skrócenie naroża wiertła. Na podstawie wartości tego parametru zużycie podzielono na trzy klasy: zieloną (dobry stan narzędzia), żółtą (wymaga uwagi operatora) i czerwoną (narzędzie do wymiany) [137]. Do klasyfikacji obrazów do poszczególnych klas stanu wiertła wykorzystano sieci neuronowe spłotowe. Najlepsza osiągnięta dokładność klasyfikacji wyniosła 80,49% [50].

Zastosowanie sieci neuronowych do analizy zużycia narzędzi połączone z metodologią uczenia transferowego (TL – ang. transfer learning) – technika uczenia maszynowego, w której wiedza uzyskana przez algorytm w jednym zadaniu jest ponownie wykorzystywana w celu zwiększenia wydajności w zadaniu pokrewnym [138] opartą na sygnałach z różnych czujników, z dokładnością przekraczającą 93%. Wartość wskaźnika klasyfikacji można poprawić, stosując zaawansowane algorytmy rozpoznawania obrazu, takie jak Image Net [139], głębokie sieci neuronowe spłotowe [140] i wstępnie wytrenowane sieci zawierające zestaw klasyfikatorów [141].

Kurek i in. [40] zastosowali syjamskie sieci neuronowe do klasyfikacji zużycia wiertel dwustrzowych z węgla wolframu na trzy klasy (rys. 1.26) wymienione wcześniej. Sieć była trenowana na podstawie obrazów krawędzi otworów wywierconych w płycie wiórowej pokrytej melaminą. Zaproponowane w tym artykule podejście do klasyfikacji zużycia jest znacznie prostsze w metodologii zbierania danych, ponieważ nie wymaga specjalistycznych czujników do zbierania sygnałów stanowiących podstawę oceny zużycia narzędzia. Zaletą prezentowanej metodologii jest jej duża uniwersalność, ponieważ w przypadku zmian w procesie wiercenia, transfer learning może być wykorzystany do ponownego trenowania poprzedniego modelu. Uzyskana dokładność klasyfikacji zużycia wiertel przekroczyła 82%. Zastosowanie sieci syjamskich jest stosunkowo nowe i wymaga dalszych badań [40].

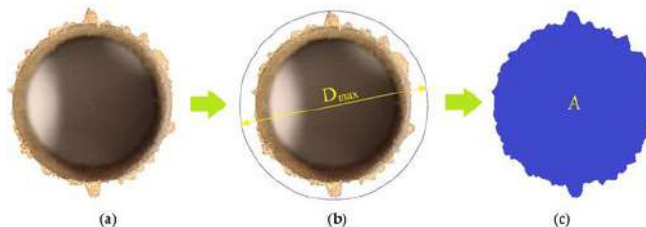


Rys. 1.26. Widok zewnętrzny narożnika wiertła dla różnych klas [40]

Świdorski i in. [42] przedstawili automatyczne podejście do monitorowania stanu wiertła podczas obróbki płyt wiórowych pokrytych laminatem. Analiza sygnałów pomiarowych momentu skrawania, siły posuwu, drgań, hałasu i emisji akustycznej pozwoliła na wyselekcjonowanie 19 cech, które zostały wykorzystane przez klasyfikatory. Algorytm uczenia maszynowego TreeBagger rozszerzono o metodologię zespołu klasyfikatorów i porównano z wynikami wygenerowanymi przez podejście Support Vector Machine, algorytm K-Nearest Neighbors (k-NNs), klasyfikację Naive Bayes i podejście Deep Learning (DL). W rozpatrywanym problemie najlepsze wyniki dokładności (około 96%) uzyskano dla podejść Treebagger, SVM i DL.

W innych badaniach Świdorski i in. [121] opracowali automatyczny system do monitorowania online zużycia wiertel podczas obróbki płyt wiórowych laminowanych i płyt wiórowych. Przyjęto dwustanowe kryterium jakości wiertła: ostre i zużyte. Atrybutami wejściowymi dla klasyfikatora były cechy diagnostyczne pochodzące z momentu skrawania, emisji akustycznej, siły posuwu i sygnałów wibracji. Do sekwencyjnego wyboru zestawu cech wykorzystano klasyfikator maszyny wektorów nośnych. Względny błąd rozpoznania w trybie pracy „pozostaw jeden” wahał się od 3% do 5%.

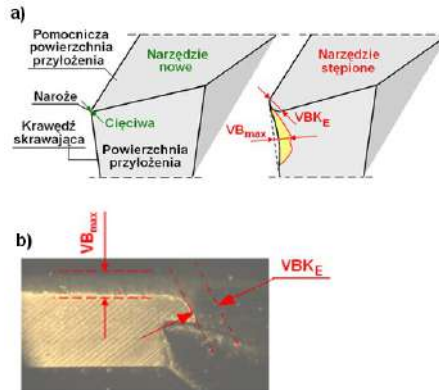
W [142] oceniono trwałość wiertel z ostrzami z węgla spiekane podczas wiercenia płyt wiórowych pokrytych laminatem. Do oceny jakości otworów zastosowano analizę wariancji, a czynnikami wyjściowymi były delaminacja i maksymalny promień  $D_{max}$  oraz powierzchnia delaminacji A (rys. 1.27).



Rys. 1.27. Zdjęcie krawędzi otworu (a) i sposób wyznaczania parametrów  $D_{max}$  (b) i A (c) [143]

Moment skrawania i siłę osiową zmierzono za pomocą dynamometru piezoelektrycznego. Do oceny zużycia ostrza przyjęto zużycie cięciwy naroży  $VB_{KE}$  i zużycie powierzchni przyłożenia narzędzia  $VB_{max}$  (rys. 1.28). Stwierdzono, że

zużycie powierzchni przyłożenia ostrza wiertła w głównej mierze determinuje wartość siły osiowej. Ponadto wartość  $VB_{max}$  i prędkości skrawania są skorelowane z wartością sygnału momentu skrawania.



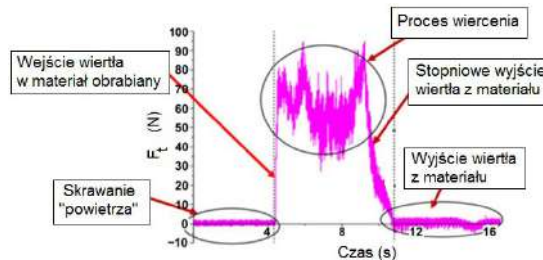
Rys. 1.28. Parametry zużycia wiertła: a) nowe narzędzie, b) zużyte narzędzie [143]

Sieradzki i in. [124] ulepszyli klasyfikację otworów w płytach wiórowych laminowanych, wykorzystując sztuczną inteligencję, którą można wyjaśnić (XAI). Oceniono trzy splotowe sieci neuronowe (ResNet101, VGG19 i VGG16). Do interpretacji wyników modelu wykorzystano gradientowo ważone mapowanie aktywacji klas (GWCAM) i walidację krzyżową obrazów otworów podzielonych na trzy kategorie według stanu zużycia wiertła (czerwony, żółty, zielony). Udowodniono, że integracja CNN z technikami XAI zwiększa niezawodność systemów monitorowania stanu wiercenia. Najlepsze wyniki uzyskano dla modelu VGG19 z dokładnością około 67%. Porównanie GWCAM i lokalnych interpretacji niezależnych od modelu wykazało, że obie metody poprawnie wykrywały wpływowe obszary na obrazach, chociaż LIME dostarczało bardziej szczegółowych informacji i nie było podatne na obszary, które wprowadzały model w błąd. Dzięki zrozumieniu cech wpływających na decyzje technik XAI możliwe jest zwiększenie niezawodności zautomatyzowanych systemów monitorowania stanu wiertła. Algorytmy XAI są wykorzystywane do identyfikacji anomalii na obrazach wykorzystywanych do analizy awarii w zastosowaniach przemysłowych [144, 145].

Bukowski i in. [146] skupili się na dostosowaniu funkcji strat w algorytmie XGBoost używanym do przewidywania zużycia wiertła podczas wiercenia płyt wiórowych pokrytych laminatem. Zużycie ostrza wiertła po testach eksperymentalnych zostało sklasyfikowane do trzech klas: zielonej (ostre narzędzie), żółtej (stan ostrzegawczy; narzędzie zbliża się do okresu wymiany) i czerwonej (narzędzie wymaga natychmiastowej wymiany).

Na podstawie analizy ponad 800 zliczeń obrazów stwierdzono, że adaptacyjna ważona funkcja straty Softmax znacząco redukuje błędy krytyczne w klasyfikacji wieloklasowej. Podczas gdy adaptacyjna ważona funkcja straty Softmax (AWSLF) wykazuje lepszą wydajność w redukcji błędów krytycznych, odbywa się to kosztem zwiększonego czasu obliczeniowego. Ta funkcja jest preferowana w zastosowaniach, w których redukcja krytycznych błędów klasyfikacji jest niezwykle ważna. Funkcje straty Softmax i ważona funkcja straty Softmax zapewniają niższe zapotrzebowanie na obliczenia, ale kosztem niższej wydajności.

Celem badań Valarmathi i in. [147] była analiza wpływu warunków skrawania na siłę osiową podczas wiercenia płyt wiórowych laminowanych wiertłami krętymi z węglików spiekanych. Zadanie to zrealizowano w oparciu o metodologię powierzchni odpowiedzi, gdzie parametrami zmiennymi były prędkość posuwu, prędkość obrotowa wrzeciona i kąt wierzchołkowy wiertła. Autorzy przedstawili i omówili typowy przebieg zmian sygnału siły osiowej (rys. 1.29). Najniższą wartość siły osiowej zaobserwowano przy niskiej wartości prędkości posuwu i wysokiej wartości prędkości obrotowej wrzeciona. Wzrost wartości prędkości posuwu zwiększa wartość siły osiowej, natomiast spadek wartości prędkości obrotowej wrzeciona zwiększa wartość siły osiowej.



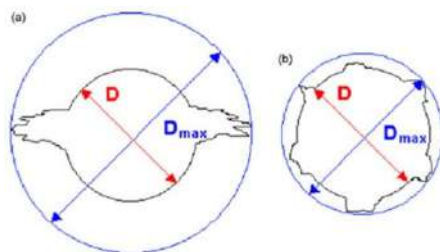
Rys. 1.29. Zmiana sygnału siły osiowej podczas wiercenia płyty wiórowej [143]

Wiele tradycyjnych podejść zostało użytych do określenia optymalnych parametrów procesu wiercenia płyt MDF: metodologia powierzchni odpowiedzi [148], metody optymalizacji Taguchiego [131] i analiza relacyjna Greya [149]. Palanikumar [150] oraz Ayyildiz i in. [151] stwierdzili, że na chropowatość powierzchni największy wpływ na wartość prędkości posuwu. Metoda optymalizacji Taguchiego zastosowana przez Gaitonde i in. [131] pozwoliła na zmniejszenie wartości współczynnika delaminacji podczas wiercenia płyt MDF poprzez zmniejszenie wartości prędkości posuwu i zwiększenie wartości prędkości skrawania.

Druga grupa metod optymalizacji procesu wiercenia płyt MDF pod względem zużycia ostrzy narzędzia i jakości powierzchni otworu obejmuje metody sztucznej inteligencji (AI), takie jak uczenie maszynowe, sztuczne sieci neuronowe (ANN), SVM i uczenie neuro-rozmyte. Nasir i Cool [122] użyli ANN do przewidywania emisji pyłu podczas obróbki drewna na podstawie sygnałów otrzymanych z czujnika emisji akustycznej. Rabiei i Yaghoubi [152] zastosowali sieci neuronowe do

optymalizacji czasu obróbki i chropowatości powierzchni podczas procesu obróbki, biorąc pod uwagę takie czynniki, jak prędkość obrotowa wrzeciona i posuw.

Celem badania Davim i in. [133] było ustalenie korelacji między parametrami procesu wiercenia płyty MDF (prędkość posuwu i prędkość obrotowa wrzeciona) a delaminacją wokół otworów. Badanie to wykazało różny wzór uszkodzenia laminatu dla dwóch typów płyt MDF o nazwach SUPERPAN DECOR (warstwa powłoki laminatu) i LAMIPAN PB (warstwa powłoki drewnianej) (rys. 1.30). W przypadku obu obrabianych elementów wartość współczynnika delaminacji zmniejszała się wraz ze zmniejszeniem wartości prędkości posuwu i wzrastała wraz ze spadkiem wartości prędkości skrawania.



Rys. 1.30. Rozwarstwienie płyt: a) LAMIPAN PB, b) SUPERPAN DECOR [143]

SUPERPAN DECOR i LAMIPAN PB były również materiałami testowymi do określenia zależności między prędkością skrawania, prędkością posuwu i współczynnikiem delaminacji otworu zgodnie z ortogonalną tabelą Taguchiego (L18) [134]. Dzięki zastosowaniu wyższych wartości prędkości skrawania możliwe jest zmniejszenie tendencji do uszkodzenia laminatu. Przy niskich wartościach prędkości obrotowej wrzeciona delaminacja zwiększa się wraz ze wzrostem wartości prędkości posuwu. Jednakże przy dużych wartościach prędkości skrawania delaminacja otworów była minimalna i nie zależała od wartości prędkości posuwu.

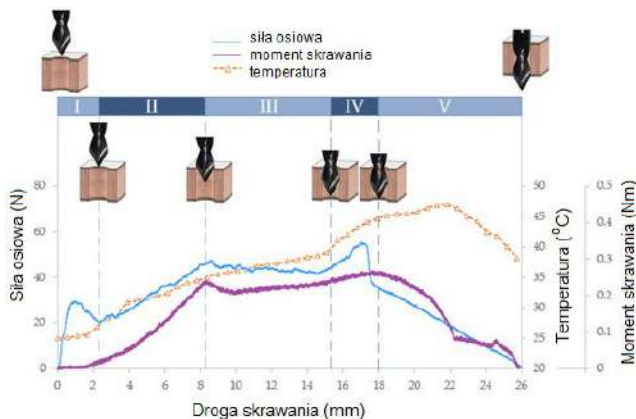
Zastosowanie techniki cyfrowej analizy obrazu do określania defektów w wywierconych otworach wykazało związek między parametrami obróbki a uszkodzeniami otworu po stronie wejścia i wyjścia [135, 153]. Badania nad wierceniem płyt MDF wykazały, że wyższe wartości prędkości skrawania wspomagają szybki proces usuwania materiału i minimalizują efekty delaminacji. Zhao i Ehmman [154] zaproponowali nowe wiertło z linią śrubową do obróbki płyt MDF. Wiercenie proponowanym narzędziem wykazało niższą wartość momentu skrawania i siły osiowej. Parametry te mają bezpośredni związek ze stopniem zużycia ostrzy narzędzia skrawającego [133].

Bedelean i in. [132] zaproponowali połączone podejście metodologii ANN i powierzchni odpowiedzi w celu optymalizacji procesu wiercenia płyt MDF. Ilościową ocenę zjawiska delaminacji przeprowadzono dla szerokiego zakresu parametrów wiercenia. W szczególności zbadano związek tych parametrów z wartościami siły osiowej, momentu skrawania i współczynnika delaminacji na wejściu

i wyjściu narzędzia. Stwierdzono, że typ wiertła jest kluczowym parametrem wpływającym na jakość powierzchni otworu i siłę osiową. Wiertło kręte jest bardziej wydajne pod względem zużycia energii podczas wiercenia płyt MDF. Wiertła kręte zapewniają również lepszą jakość powierzchni po obróbce w porównaniu z wiertłami płaskimi [132]. Dzięki zastosowaniu niższej wartości prędkości posuwu i wyższej wartości prędkości skrawania możliwe jest zmniejszenie tendencji do delaminacji podczas wiercenia płyt MDF przy użyciu wiertel węglkowych [130, 133, 134].

W innym artykule Bedelean i in. [43] wykorzystano RSM i ANN do przewidywania delaminacji otworu, siły osiowej i momentu skrawania w szerokim zakresie materiałów obrabianych, tj. płytach wiórowych, płytach MDF i sklejkę. Stwierdzono, że siła osiowa jest najbardziej zależna od rodzaju wiertła. Prędkość posuwu uznano za najważniejszy czynnik wpływający na moment skrawania, a tym samym zużycie ostrza wiertła [43]. Zmiana wartości momentu skrawania i siły osiowej jest bezpośrednio związana ze zużyciem ostrzy narzędzia [130, 155].

Szwajka i in. [156] badali wpływ rodzaju powłoki narzędzia (TiAlN i ZrN) na moment skrawania, siłę osiową, temperaturę wiertła i chropowatość powierzchni otworu podczas wiercenia płyt MDF. Na podstawie eksperymentalnych testów wiercenia i ich analizy z wykorzystaniem analizy wariancji stwierdzono, że wartość maksymalnej temperatury narzędzia zależy od posuwu, prędkości skrawania i rodzaju powłoki narzędzia. Zwiększenie temperatury narzędzia nie tylko wpływa na pogorszenie jakości powierzchni otworu, ale również zmniejsza trwałość ostrza. Autorzy zidentyfikowali pięć obszarów zmian siły osiowej (rys. 1.31) podczas wiercenia płyty MDF o zmiennej gęstości na grubości.



Rys. 1.31. Zmiany temperatury i parametrów procesu w procesie wiercenia płyty MDF [143]

Wpływ różnych materiałów w procesie obróbki płyt MDF był również przedmiotem badań Djouadiego i in. [157]. Stwierdzili oni, że główną zaletą stosowania

narzędzia wykonanego z diamentu polikrystalicznego jest jego zwiększona trwałość w porównaniu z konwencjonalnymi materiałami narzędziowymi, takimi jak stal narzędziowa i HSS.

Lin i in. [158] przeanalizowali wpływ budowy płyty MDF na obrabialność płyty. Do rejestrowania powstawania wiórów wykorzystano kamerę cyfrową. Badanie to dowiodło, że gęstość płyty i nieobrobione cząstki mają kluczowy wpływ na obrabialność płyt MDF.

Davim i in. [135] ustalili zależność między parametrami obróbki a uszkodzeniami otworów po stronie wejścia i wyjścia wywierconych w płytach MDF na podstawie skorygowanego współczynnika rozwarstwienia. Cyfrowa analiza obrazów powierzchni otworów wykazała, że połączenie wysokiej wydajności z minimalizacją delaminacji można osiągnąć, stosując wyższą wartość prędkości skrawania.

Gaitonde i in. [131] zaproponowali metodologię redukcji delaminacji przy użyciu ANOVA i analizy średnich (ANOM) zgodnie z koncepcją wielofunkcyjnych cech projektu Taguchiego (L9). Uszkodzenia laminatu można zminimalizować podczas wiercenia płyt MDF, stosując niższe wartości prędkości posuwu i wyższe wartości prędkości skrawania, ale należy zastosować odpowiednią kombinację tych powiązanych parametrów.

Prakash i in. [149] zastosowali relacyjną analizę Graya (GRA) do określenia wpływu parametrów wiercenia na delaminację i chropowatość powierzchni (Ra, Rz, Rt) otworów wierconych w płytach MDF. Na podstawie macierzy stopnia Graya ustalono, że prędkość posuwu i średnica wiertła były najbardziej odpowiedzialne za uszkodzenia powierzchni otworów podczas wiercenia wiertłami stopniowymi z węgla spiekane.

Palanikumar i in. [129] zastosowali projekt ortogonalny i analizę wariancji do analizy procesu wiercenia płyt MDF za pomocą wiertel krętych z węgla spiekane. Średnica wiertła i prędkość posuwu były głównymi parametrami związanymi z delaminacją powierzchni płyty. Aby zmniejszyć uszkodzenia płyty, autorzy zalecają małą średnicę wiertła, niską wartość prędkości posuwu i wysoką wartość prędkości obrotowej wrzeciona.

Szwajka i in. [159] przeprowadzili porównawcze eksperymenty wiercenia płyt MDF, laminatów wysokociśnieniowych, sklejek i płyt wiórowych. Celem badań było dostosowanie posuwu i prędkości skrawania dla obróbki różnych materiałów w celu zapewnienia optymalnej wydajności obróbki i umożliwienia inteligentnego wiercenia w oparciu o „online” dobór parametrów skrawania. Autorzy zaproponowali metodę identyfikacji rodzaju materiału z wykorzystaniem krótko-czasowej transformaty Fouriera (STFT) w celu automatycznego dostosowywania parametrów skrawania podczas wiercenia na podstawie sygnałów procesowych. Identyfikacja materiału w oparciu o STFT wykorzystuje ocenę dominujących amplitud częstotliwości w zależności od obrabianego materiału.

W innej pracy [160] Szwajka przeanalizował sygnały siły osiowej i momentu skrawania podczas wiercenia płyt MDF. Zaproponował metodologię określania

średnich wartości sygnałów w celu uniknięcia losowych zmian wartości tych sygnałów. Zaproponowany wskaźnik skrawalności nie zależał od parametrów skrawania, co ułatwia analizę procesu obróbki.

Shirzaei i in. [136] zaproponowali losowy projekt czynnikowy z użyciem analizy wariancji (ANOVA) do analizy delaminacji otworów w płytach MDF. Autorzy skupili się na interaktywnym wpływie prędkości posuwu, prędkości obrotowej wrzeciona i średnicy wiertła na współczynnik delaminacji otworów. Do analizy krawędzi otworów zastosowano metody cyfrowego przetwarzania obrazu. Stwierdzono, że parametrami, które miały największy wpływ na rozwarstwienie, były, w kolejności od najistotniejszych, prędkość posuwu i średnica wiertła. Materiał narzędzia i powłoka narzędzia wpływają na charakter zjawisk tribologicznych w strefie kontaktu i obrabialność płyty MDF [156, 161].

Spośród czynników wpływających na jakość obróbki płyt laminowanych, frezowanie wydaje się być mniej udokumentowane w porównaniu z operacjami wiercenia. Obecnie w procesie okleinowania krawędzi, mocowanie okleiny meblowej do płyty jest poprzedzone wstępnym frezowaniem. Operacja ta służy dwóm celom: po pierwsze, przygotowaniu krawędzi płyty do klejenia, a po drugie, wyrównaniu geometrii elementu względem okleiniarki (referencji). Dzięki zastosowaniu wspomnianego wstępnego frezowania, jakość frezowania staje się krytyczna w produkcji przemysłowej, ponieważ decyduje o końcowej wartości estetycznej elementu meblowego (w tym o obecności lub braku uszkodzeń laminatu wokół wszystkich okleinowanych krawędzi).

Zarówno w procesie frezowania jak i wiercenia, wskaźniki delaminacji wzrastają (wzrasta powierzchnia uszkodzeń laminatu, co powoduje obniżenie jakości) wraz ze zużyciem ostrzy narzędzi [23], jak również ze spadkiem wartości prędkości skrawania. Wyniki te zostały potwierdzone innymi badaniami. Ponadto głębokość warstwy frezowanej płyty wiórowej również odgrywa istotną rolę w jakości powierzchni obrobionej [156]. Badania nie wykazały korelacji pomiędzy posuwem na ostrze a zmianami wskaźników jakości [123].

Jakość obróbki zależy również od materiału, z którego wykonana jest krawędź skrawająca narzędzia. Badania wykazały, że krawędź skrawająca narzędzia frezarskiego ze stali szybko tnącej, w porównaniu z narzędziem frezarskim z węgla spiekanego, wykazuje dwie kluczowe różnice. Po pierwsze, przy tym samym poziomie zużycia, narzędzie ze stali szybko tnącej wykazuje wyższy współczynnik delaminacji (oznaczający niższą jakość). Po drugie, degradowane szybciej w czasie, co prowadzi do szybszego zużycia, a w konsekwencji szybszego spadku jakości skrawania [35].

Dalsze badania wykazały, że konkretny rodzaj zastosowanego węgla (jego twardość i moduł sprężystości w skali nano) znacząco wpływa na trwałość ostrza narzędzia, a w rezultacie na ogólną jakość obróbki [36]. Na jakość obróbki wpływa nie tylko materiał, ale także geometria ostrza. Udowodniono, że dla optymalnej jakości frezowania należy stosować narzędzie o najmniejszym możliwym kącie przyłożenia. Należy jednak zachować ostrożność, ponieważ zbyt małe kąty mogą

skutkować skróceniem trwałości ostrza z powodu przyspieszonego zużycia. Optymalizacja w tym kontekście wymaga równowagi pomiędzy tymi dwoma parametrami [37].

Zaprojektowano również eksperymenty mające na celu zbadanie zużycia energii podczas frezowania płyt wiórowych o zróżnicowanych właściwościach fizycznych. Celem było opracowanie klasyfikacji typów płyt i optymalizacja wartości posuwu (maksymalizacja), przy jednoczesnej minimalizacji zużycia ostrzy, co ostatecznie prowadzi do obniżenia kosztów procesu. Eksperyment nie wykazał wyraźnego związku między zużyciem energii, a właściwościami materiału, ale wykazał zmiany właściwości fizycznych materiału wzdłuż ścieżki frezowania w obrębie tego samego badanego materiału [43].

Wpływ parametrów technologicznych na frezowanie jest tak dobrze udokumentowany, że włączono go do diagnostyki tego procesu. Badacze [38], identyfikując zależności między wskaźnikiem delaminacji, a parametrami procesu (siłami skrawania, zużyciem ostrzy i pracą wymaganą do frezowania), potwierdzili, że przy wykorzystaniu sieci neuronowych (z elementami algorytmów logiki rozmytej) możliwe jest przewidywanie wyniku obróbki płyt wiórowych.

W literaturze naukowej można znaleźć również liczne publikacje dotyczące modyfikacji powierzchni ostrzy we frezach, mającej na celu wydłużenie żywotności narzędzi i pośrednią poprawę jakości procesu frezowania płyt wiórowych. Jedno z proponowanych podejść polega na nakładaniu powłoki metodą spawania łukiem krytym (SAW), która jak wykazano, zwiększa odporność ostrza na zużycie podczas frezowania materiałów drewnopochodnych [162]. Inną techniką modyfikacji powierzchni stosowaną przez badaczy [44] jest zastosowanie litografii w ekstremalnym ultrafiolecie (EUV), wykorzystującej intensywne impulsy promieniowania ultrafioletowego z laserem jako źródłem napromieniowania. Jednak w tym przypadku wyniki nie potwierdziły wydłużenia żywotności ostrzy. Kolejną metodą jest implantacja jonów. Wyniki badań wykazały znaczny wzrost żywotności ostrzy w przypadku krawędzi skrawających z węgla WC-Co stosowanych w narzędziach frezarskich do płyt wiórowych [39].

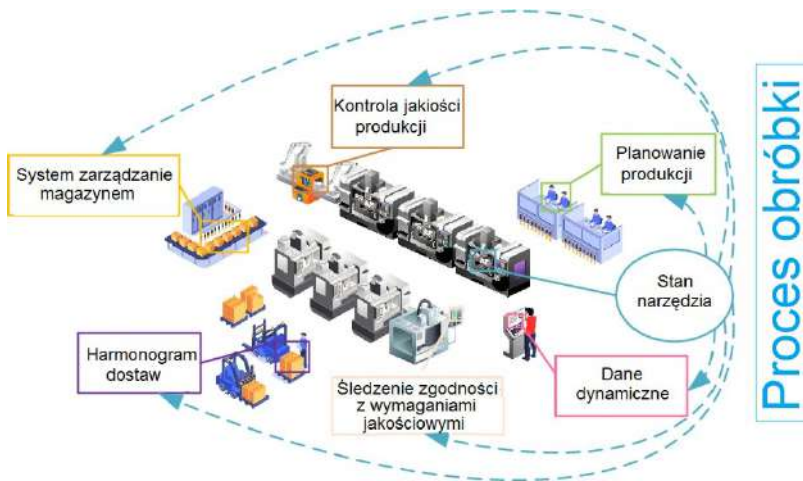
### **1.7. Podsumowanie analizy stanu zagadnienia**

Branża przetwórstwa materiałów drewnopochodnych przechodzi znaczącą transformację, zgodną z trendem informatyzacji przemysłu [163]. W regionach, w których przemysł płyt drewnopochodnych jest kluczowym motorem napędowym gospodarki, istnieje pilna potrzeba, zarówno z perspektywy ekonomicznej, jak i środowiskowej, wdrożenia nowych technologii poprawiających wydajność [164]. Integracja systemów monitorujących z procesem obróbki materiałów drewnopochodnych oferuje dwie kluczowe korzyści: zmniejszenie zużycia narzędzi i związanych z tym kosztów oraz poprawę jakości obróbki poprzez precyzyjne monitorowanie procesu skrawania, minimalizując tym samym straty surowców. Poza

tymi bezpośrednimi korzyściami, dane o stanie narzędzi zapewniają wgląd w czasie rzeczywistym w kluczowe czynniki, takie jak wydajność obróbki, jakość produktu i wykorzystanie mocy produkcyjnych, które są niezbędne do funkcjonowania zintegrowanego systemu informatycznego.

Wiodące w tym sektorze firmy coraz częściej wdrażają systemy informatyzacji, w tym systemy MES (Manufacturing Execution Systems) i systemy planowania zasobów przedsiębiorstwa ERP (Enterprise Resource Planning) [165]. Systemy te odpowiadają na zapotrzebowanie rynku na personalizację i elastyczność produktów. Przepływ danych przedsiębiorstwa zachodzący w czasie rzeczywistym w ramach tych systemów ma kluczowe znaczenie dla zwiększenia efektywności operacyjnej [166]. Monitorowanie stanu narzędzi wykracza poza prostą redukcję defektów i marnotrawstwa narzędzi [39]. Jest ono również kluczowe dla minimalizacji przestoju produkcyjnych i zapewnienia płynnego przepływu danych w czasie rzeczywistym. Jak pokazano na rys. 1.32, powiązania między monitorowaniem stanu narzędzi, a innymi procesami produkcyjnymi są wyraźne.

Przykładowo firmy mogą wykorzystać dane o stanie narzędzi do udoskonalenia ich harmonogramowania, eliminując opóźnienia i nieefektywne zarządzanie nimi. Jest to szczególnie ważne dla przedsiębiorstw zajmujących się obróbką materiałów drewnopochodnych, zaangażowanych w elastyczne systemy produkcyjne [167, 168].



Rys. 1.32. Połączenie informacji o stanie procesu obróbki w czasie rzeczywistym z ogólnym systemem informacji produkcyjnej [26]

Rozwój monitorowania narzędzi w obróbce materiałów drewnopochodnych opiera się w dużej mierze na badaniach pierwotnie przeprowadzonych w kontekście skrawania metalu [169, 170]. Podczas gdy technologie monitorowania koncentrowały się przede wszystkim na skrawaniu metalu, przeprowadzono niewiele badań poświęconych ich zastosowaniu w obróbce materiałów drewnopochodnych.

Tę lukę można przypisać kilku czynnikom, w tym inherentnym ograniczeniom samych technologii monitorowania [171]. Jednakże na przestrzeni lat niezawodność i dokładność systemów monitorowania znacznie się poprawiły dzięki szeroko zakrojonym badaniom nad różnymi sygnałami monitorującymi i optymalizacji algorytmów dostosowanych do różnych operacji skrawania. Tabela 1.2 przedstawia możliwości zastosowania sygnałów monitorujących i algorytmów działania w różnych procesach skrawania.

Tabela 1.2. Monitorowanie procesu obróbki na podstawie sygnałów i algorytmów działania dla wybranych procesów skrawania

Sposób obróbki	Sygnal monitorujący	Algorytm działania	Literatura
Frezowanie drewna litego	Prąd elektryczny i ciśnienie akustyczne	Model liniowy	Chen i in. [172]
Frezowanie metali	Siły i wielkości pochodne	Sieć neuronowa	Eddy [173]
Frezowanie metali	Siły i wielkości pochodne	Nieliniowy mechanistyczny model siły skrawania	Fischer i in. [9]
Frezowanie metali	Moc silnika wrzeciona	Regresja procesu Gaussa	Gogolewski i in. [6]
Frezowanie metali	Moc silnika wrzeciona	Transformata Hilberta-Huanga	Górski [39]
Frezowanie kompozytu drewno-tworzywo sztuczne	Moc silnika wrzeciona	Optymalizacja roju cząstek – sieć neuronowa z propagacją wsteczną	Gottwald [174]
Toczenie metali	Emisja akustyczna	Ukryty model Markowa	Huang i Liang [64]
Drewno lite	Emisja akustyczna	Sieć neuronowa z propagacją wsteczną	Kilundu i in. [97]
Toczenie metali	Temperatura skrawania	Sieć neuronowa	Li i in. [12]
Frezowanie płyt wiórowych	Drgania	Szybka transformata Fouriera	Lin i in. [175]
Frezowanie metali	Drgania	Ukryty model Markow	Mabkhot i in. [166])
Frezowanie metali	Emisja akustyczna	Połączony model ABC-BP-Elman-SVR	Müller i in. [3]

Tabela 1.2 (cd.). Monitorowanie procesu obróbki na podstawie sygnałów i algorytmów działania dla wybranych procesów skrawania

Sposób obróbki	Sygnal monitorujący	Algorytm działania	Literatura
Toczenie metali	Siły i wielkości pochodne	Sieć neuronowa	Ribeiro Filho i in. [79]
Wiercenie w płycie wiórowej	Systemy wizyjne	Sieć neuronowa spłotowa	Robertson i Dowling [176]
Toczenie metali	Temperatura w procesie skrawania	Adaptacyjne neurorozmyte systemy wnioskowania	Szwajjka [60]
Toczenie metali	Siły i wielkości pochodne	Ukryty model Markowa	Uddin i in. [177]
Frezowanie metali	Prąd silnika wrzeciona	Maszyna wektorów nośnych	Wang i in. [91]
Wiercenie w płycie wiórowej	Siła osiowa, moment skrawania, drgania, ciśnienie akustyczne i emisja akustyczna	Maszyna wektorów nośnych	Widodo i Yang [178]
Toczenie metali	Siły, drgania, emisja akustyczna, temperatura i prąd	Logika rozmyta	Wu i in. [168]
Wiercenie w płycie wiórowej	Siła osiowa, moment skrawania, drgania, ciśnienie akustyczne i emisja akustyczna	Algorytm K-najbliższych sąsiadów	Xie i in. [179]
Toczenie metali	Emisja akustyczna i drgania	Sieć neuronowa z propagacją wsteczną	Xu i in. [180]
Cięcie drewna litego	Moc, ciśnienie akustyczne, drgania i emisja akustyczna	Losowy las decyzyjny	Yang i in. [4]
Toczenie metali	Siły i wielkości pochodne, emisja akustyczna i drgania	Nadzorowana sieć neuronowa	Ye i Mak [181]
Frezowanie MDF	Siły i wielkości pochodne, drgania i temperatura w procesie skrawania	Sieć neuronowa	Zadeh [182]

Te postępy uitorowały drogę do przyjęcia systemów monitorowania procesu w obróbce materiałów drewnopochodnych.

W przeszłości wyzwania związane ze stosowaniem monitorowania procesów obróbki materiałów drewnopochodnych wynikały głównie z niestabilności sygnału wynikającej ze szczególnych właściwości materiałów drewnopochodnych, zmienności stanu zużycia ostrza narzędzia oraz wpływu warunków skrawania na akwizycję sygnału. Wraz z rozwojem technologii systemów monitorowania, które uwzględniają szerszy zakres sygnałów i zastosowań monitorowania, wiele z tych problemów zostało rozwiązanych. Dzięki przetwarzaniu wielosygnałowemu, ukierunkowanej redukcji szumów i dostosowanym algorytmom podejmowania decyzji, naukowcy z powodzeniem wdrożyli skuteczne monitorowanie procesu w operacjach skrawania materiałów drewnopochodnych.

Jednak pomimo tych postępów, istniejące podejścia do zastosowania systemów monitorowania procesu skrawania materiałów drewnopochodnych nadal napotykają kilka ograniczeń [183]. Po pierwsze, badania ukierunkowane konkretnie na systemy monitorowania procesów obróbki materiałów drewnopochodnych pozostają skąpe i nie uwzględniają w pełni praktycznych wyzwań rzeczywistych środowisk produkcyjnych. Po drugie, obecne systemy monitorowania są często projektowane do konkretnych procesów obróbki, takich jak frezowanie lub wiercenie płyt drewnopochodnych, co ogranicza ich generalizację w porównaniu z systemami do skrawania metali [184]. Po trzecie, w przeciwieństwie do skrawania metali, obróbka materiałów drewnopochodnych zazwyczaj nie wymaga stosowania cieczy chłodzących ale charakteryzuje się dyfuzją pyłu drzewnego. Długotrwała ekspozycja zewnętrznych czujników monitorujących proces na takie czynniki i jej potencjalny wpływ na wydajność monitorowania uzasadniają dalsze badania.

Warto zauważyć, że ostatnio dąży się w zakresie monitorowania procesu na projektowaniu specjalistycznych czujników bezprzewodowych i integrowaniu ich z obrabiarkami w celu złagodzenia skutków narażenia na trudne warunki skrawania [185].

Przedstawione w pracy badania mają na celu uzupełnienie luk między mechanizmami skrawania materiałów drewnopochodnych a metodami monitorowania procesu skrawania, dostarczając badaczom czy technologom wskazówek dotyczących przyszłych zmian w zastosowaniu ukierunkowanego monitorowania w skrawaniu kompozytów drewnopochodnych. W aktualnej literaturze brak jest opracowań dotyczących podstaw systemów monitorowania procesu skrawania materiałów drewnopochodnych jak i możliwości implementacji systemów monitorowania z branży obróbki metali. W porównaniu ze skrawaniem metali, przeprowadzono niewiele badań nad monitorowaniem obróbki skrawaniem materiałów drewnopochodnych z wykorzystaniem podejścia sztucznej inteligencji, które powinno być priorytetem przy projektowaniu adaptacyjnych systemów sterowania. Połączenie inteligentnego monitorowania i wielokryterialnej optymalizacji powinno ułatwić kontrolę procesu skrawania, co pozwoli uzyskać wyższą jakość wyrobu i wydajną obróbkę.

Monitorowanie procesu skrawania poprzez wykorzystanie danych pojedynczego sygnału stwarza kilka ograniczeń pod względem zarówno dokładności, jak i stabilności [186]. W kontekście monitorowania do skrawania materiałów drewnopochodnych, akwizycja pojedynczego sygnału jest często poddana wpływom czynników środowiskowych nieodłącznie związanych z obróbką kompozytów drewnopochodnych. Na przykład monitorowanie stanu oparte na temperaturze, chociaż stosunkowo proste, może być trudne do archiwizacji ze względu na „latające” wióry generowane podczas skrawania. Ponadto pojedyncze sygnały same w sobie mają ograniczoną zdolność do dokładnego scharakteryzowania zużycia ostrza narzędzia skrawającego. Na przykład monitorowanie oparte wyłącznie na sygnałach mocy silnika wrzeczona może wykazywać wahania, co prowadzi do potencjalnych błędnych wniosków w ocenie zużycia narzędzia [187].

### Kierunki rozwoju systemów monitorowania procesów obróbki materiałów drewnopochodnych

Przetwórstwo materiałów drewnopochodnych, tradycyjna i szeroko rozpowszechniona branża, przechodzi obecnie kompleksową transformację technologiczną, której przyspieszenie spodziewane jest w nadchodzących latach. Ta ewolucja stwarza zarówno możliwości, jak i wyzwania dla rozwoju monitorowania stanu procesu w obróbce materiałów drewnopochodnych, zwłaszcza w złożonych warunkach skrawania i rzeczywistych warunkach produkcyjnych. Na podstawie analizy wcześniejszych badań nad tymi systemami i obróbką materiałów drewnopochodnych, można zaproponować następujące rekomendacje dla przyszłych badań, poparte odpowiednimi studiami przypadków i praktycznymi wdrożeniami:

1. Wybór sygnałów do monitorowania procesu: Kluczowe jest zidentyfikowanie sygnałów, które można uniwersalnie zastosować w różnych procesach obróbki materiałów drewnopochodnych, oraz znalezienie najskuteczniejszych kombinacji tych sygnałów.

2. Projektowanie uogólnionych modeli analizy danych sygnałowych: Biorąc pod uwagę wieloskładnikową i niejednorodną strukturę płyt drewnopochodnych, kluczowe jest opracowanie modeli analizy sygnałów o silnych możliwościach generalizacji.

3. Opracowanie ekonomicznych, inteligentnych czujników: Opracowanie niedrogich i łatwych w instalacji inteligentnych czujników ma kluczowe znaczenie dla ograniczenia przypadkowego wpływu pyłu drzewnego na dokładność sygnału podczas obróbki materiałów drewnopochodnych.

4. Integracja systemów doradczych w czasie rzeczywistym: Przyszły rozwój systemów monitorowania powinien koncentrować się nie tylko na poprawie stabilności przebiegu procesu ale także na dostarczaniu operatorom praktycznych porad dotyczących wymiany narzędzi.

5. Rozszerzenie integracji systemu z innymi systemami informatycznymi w zakładzie: Kluczowym zaleceniem jest rozszerzenie systemu monitorowania o połączenie z szerszymi systemami informatycznymi w zakładzie. Na przykład,

połączenie systemu monitorowania narzędzi z automatycznym zarządzaniem wymianą narzędzi i magazynem narzędzi, a także z systemami oceny wydajności, przyniosło znaczną poprawę wydajności operacyjnej.

6. Opracowanie adaptacyjnych strategii fuzji w czasie rzeczywistym: Kluczowe jest skupienie się na opracowaniu adaptacyjnych strategii fuzji dla łączenia sygnałów w czasie rzeczywistym. Strategie te zapewnią dokładność monitorowania w miarę zmian właściwości płyt drewnopochodnych w trakcie obróbki, utrzymując adaptacyjność systemu w dynamicznych środowiskach produkcyjnych.



## 2. CEL I ZAKRES PRACY

Rosnące zapotrzebowanie na automatyzację procesów obróbki, napędzane rosnącymi kosztami pracy i rygorystycznymi wymaganiami jakościowymi, sprawiło, że monitorowanie procesów stało się nieuniknioną koniecznością. W literaturze znaczna część badań poświęcona została monitorowaniu procesu skrawania metali. Zastosowanie automatyzacji w obróbce płyt drewnopochodnych wiąże się z zapewnieniem układów monitorujących stan zużycia ostrza narzędzi skrawających jak i jakość powierzchni obrobionej.

Niniejsza monografia, łącząc badania nad tradycyjną teorią obróbki materiałów metalowych i kompozytów drewnopochodnych, stanowi podstawę do opracowania systemów monitorowania, które przyczynią się zarówno do modernizacji branży meblarskiej, jak i osiągnięcia celów zrównoważonego rozwoju. W pracy zaproponowano autorską koncepcję i metodykę monitorowania procesu skrawania materiałów drewnopochodnych, porównując konkretne dane empiryczne i studia przypadków z przeprowadzonych przez autora badań. Dokonano analiza wyzwań związanych ze specyfiką materiałowych występującą w obróbce kompozytów drewnopochodnych. Przeprowadzono analizę możliwości implementacji przemysłowych czujników i ocena sygnałów diagnostycznych pod kątem ich zastosowania w układach monitorujących proces skrawania. Dokonano eksploracja technik akwizycji i metod przetwarzania sygnałów diagnostycznych dostosowanych do specyficznych warunków obróbki kompozytów drewnopochodnych. Ponadto, aby ułatwić szersze wdrożenie systemów monitorujących w procesie skrawania materiałów drewnopochodnych, postanowiono określić jego potencjalne znaczenie dla gospodarki i środowiska. Aby wzmocnić argumentację na rzecz tych systemów, zbadano również potencjalne korzyści ekonomiczne i środowiskowe wynikające z wdrożenia monitorowania w procesach skrawania materiałów drewnopochodnych.

Celem naukowym pracy jest ocena przydatności wybranych metod do monitorowania procesów obróbki w przemyśle meblarskim na wybrane aspekty procesu skrawania, którymi są efekty energetyczne procesu skrawania, jakość powierzchni obrobionej, zużycie ostrzy narzędzi skrawających oraz efektywność procesu.

Zakres pracy obejmuje:

**Rozdział 1** analizę stanu zagadnienia w odniesieniu do podstaw fizykalnych technologicznych skrawania kompozytów drewnopochodnych.

**Rozdział 2** sformułowanie celu i zakresu pracy.

**Rozdział 3** opartą na wynikach badań własnych analizę właściwości mechanicznych płyt warstwowych. Zaproponowano metodykę pomiaru i analizy drgań własnych elementów konstrukcyjnych z płyt warstwowych, które mogą być wykorzystane do wdrożenia modeli analitycznych lub numerycznych do celów projektowych. Przeprowadzono statyczne próby rozciągania, próby zginania trypunktowego.

**Rozdział 4** badania wpływu parametrów frezowania i wiercenia na wybrane wskaźniki technologiczne procesu skrawania kompozytów drewnopochodnych. Zbadano wpływ prędkości skrawania i posuwu na ostrze na wartość sygnałów sił procesu skrawania oraz wpływ zużycia ostrza narzędzia na wartość współczynnika delaminacji. Oceniono ekonomiczną prędkość skrawania i prędkość skrawania odpowiadającą maksymalnej wydajności procesu frezowania.

**Rozdział 5** analizę i badania w celu określenia skrawalności płyt pilśniowych. Uzyskane wyniki badań pozwoliły określić indeks skrawalności. Na podstawie wyników badań wykazano, że zarówno wybrane miary sygnałów w dziedzinie czasu i częstotliwości, jak i jednostkowy opór skrawania są stałe dla danego materiału przedmiotu obrabianego i nie zależą od parametrów procesu wiercenia. Zaproponowano metodykę identyfikacji materiałów w oparciu o analizę sygnałów i wielkości pochodnych sił, która wykazuje skuteczność, co dowodzi, że może być stosowana w inteligentnych procesach obróbki.

**Rozdział 6** badania wpływu powłok ostrzy skrawających na wybrane wskaźniki procesu wiercenia. Zastosowano trzy rodzaje wiertel z węglików spiekanych (HW): niepowlekane, powlekane TiAlN i powlekane ZrN. Określono wpływu rodzaju zastosowanych powłok ostrzy wiertel na wartość siły osiowej  $F_1$ , momentu skrawania  $M_c$ , temperatury narzędzia skrawającego  $T$  oraz chropowatości powierzchni otworu w płytach pilśniowych.

**Rozdział 7** badania dotyczące wykorzystania wybranych narzędzi sztucznej inteligencji oraz analizy obrazu w celu monitorowania procesu skrawania. Predykcję chropowatości powierzchni przeprowadzono przy użyciu sztucznej sieci neuronowej (ANN) z radialną funkcją bazową (RBF) i rozmytego modelu Takagi–Sugeno–Kang (TSK) z klasteryzacją subtraktywną. W badaniach jako dane wejściowe do ANN i modelu rozmytego przyjęto parametry kinematyczne procesu skrawania i wybrane miary sygnału drgań. Na wyjściu uzyskano wartości parametru chropowatości powierzchni. Opracowano metodę wizyjną do rozpoznawania i oceny zadziórów i delaminacji powstających podczas obróbki w oparciu o metody segmentacji progowej i przy użyciu rozmytego układu Takagi–Sugeno–Kang (TSK) z klasteryzacją subtraktywną.

**Rozdział 8** koncepcję autorską i metodyki monitorowania procesu skrawania materiałów drewnopochodnych, porównując konkretne dane empiryczne i studia przypadków z przeprowadzonych przez autora badań. Dokonano oceny poprawności działania opracowanej metodyki monitorowania w warunkach półprzemysłowych.

## **3. MATERIAŁY STOSOWANE W BADANIACH**

### **3.1. Procedura wyznaczania właściwości mechanicznych materiałów**

#### **3.1.1. Wiadomości ogólne**

Kompozyty drewnopochodne wykazują lepszą stabilność wymiarową, posiadają lepsze właściwości izotropowe i mechaniczne i większą trwałość w porównaniu z drewnem litym [159, 188, 189, 190, 191]. Są one szeroko stosowane w przemyśle budowlanym, meblarskim, motoryzacyjnym i stoczniowym [188, 192]. Kompozyty drewnopochodne są często stosowane w zastosowaniach konstrukcyjnych jako materiały alternatywne dla drewna litego, ponieważ wykazują lepszą stabilność wymiarową i trwałość [159, 190].

Najczęściej stosowane kompozyty drewnopochodne obejmują materiały warstwowe, takie jak sklejka lub drewno fornirowane, które są klasyfikowane jako laminaty warstwowe o lepszych właściwościach wytrzymałościowych niż surowce naturalne [190, 193, 194]. W niektórych zastosowaniach, takich jak chociażby budownictwo, materiały drewnopochodne zastępują inne materiały inżynierskie, takie jak beton, tworzywa sztuczne lub stal, ponieważ szczególnie ważnym aspektem jest spełnienie wymagań dotyczących wysokiej wytrzymałości przy stosunkowo niskiej masie [191].

Sklejka to sztywny materiał konstrukcyjny składający się z fornirow drewnianych sklejonych ze sobą tak, że orientacja włókien fornirow jest prostopadła do orientacji włókien sąsiedniej warstwy [188, 189]. Właściwości płyt sklejkowych zależą od rodzaju użytego drewna. W niektórych przypadkach do produkcji sklejki używa się gatunków drewna o gorszych właściwościach mechanicznych (np. sosny). Dlatego prowadzone są badania nad tym, jak poprawić te właściwości [195, 196, 197]. Jedną z opcji jest wzmocnienie materiałów drewnopochodnych różnymi rodzajami włókien, których głównym celem jest poprawa ich właściwości mechanicznych [198].

Oprócz tradycyjnych zastosowań sklejki, takich jak meble i budownictwo, jest ona również szeroko stosowana w obszarach, które korzystają ze szczególnego połączenia jej wytrzymałości i lekkości, w szczególności jako materiał konstrukcyjny do produkcji elementów wykończeniowych kamperów i jachtów. W świetle obecnej potrzeby redukcji emisji gazów szkodliwych dla klimatu, takich jak CO<sub>2</sub>, stosowanie lekkich materiałów konstrukcyjnych jest bardzo ważne.

W ostatnich latach konstrukcje hybrydowe wykonane z tworzyw sztucznych wzmocnionych włóknem węglowym (CFRP) przyciągnęły dużą uwagę w wielu

branżach. W przeciwieństwie do hybrydowych kompozytów metal/włókno węglowe, badania dotyczące laminatów składających się z CFRP i materiałów drewnopochodnych są mniej rozpoznane.

W niniejszym rozdziale przeanalizowano połączenie hybrydowe powstałe w wyniku połączenia panelu CFRP ze sklejką pod kątem wytrzymałości i właściwości, wykorzystując test zginania trzypunktowego, statyczną próbę rozciągania i analizę dynamiczną badanego materiału. Znajomość dynamicznych właściwości pozwala na przyjęcie takich parametrów skrawania, które pomogą zapobiec występowaniu drgań samowzbudnych w procesie skrawania. Postanowiono także określić wpływ zastosowania laminatu CFRP na sztywność statyczną i dynamiczną konstrukcji.

Większość badań w tej dziedzinie dotyczy poprawy wytrzymałości konstrukcji bez analizy właściwości dynamicznych. Postanowiono więc zaproponować prostą i przyjazną dla użytkownika metodykę określania tłumienia układu typu „sandwich”. Wyniki badań wytrzymałościowych użyto do określenia modułu sprężystości, modułu wytrzymałości na zginanie, położenia osi obojętnej i charakterystyki domeny częstotliwości uzyskanego laminatu. Wyniki pokazują, że zastosowanie płyty ze sklejki wzmocnionej CFRP nie tylko poprawia wygląd wizualny, ale również poprawia właściwości wytrzymałościowe takiego materiału hybrydowego.

Właściwości wytrzymałościowe kompozytu CFRP zależą przede wszystkim od udziału włókien w kompozycie, a także od ich splotu [199]. Do zalet kompozytów CFRP należą: duża sztywność, zdolność tłumienia drgań, wysoka wytrzymałość właściwa i zmęczeniowa, niski współczynnik rozszerzalności liniowej oraz możliwość formowania złożonych kształtów [200, 201]. Ponadto charakteryzują się wysoką odpornością chemiczną i nie absorbują wody [202]. Ze względu na swoje właściwości są najczęściej stosowane do budowy elementów wymagających dużej sztywności i odporności na szkodliwe działanie środowiska [203].

Na podstawie analizy literatury można stwierdzić, że główną zaletą kompozytów CFRP w stosunku do konwencjonalnie stosowanych materiałów budowlanych jest większa wytrzymałość mechaniczna przy znacznie niższej gęstości [204]. Wraz ze zmniejszeniem barier ekonomicznych i technologicznych związanych z produkcją tego typu materiałów kompozytowych stają się one alternatywą dla konwencjonalnych materiałów budowlanych [205].

W ostatnich latach zastosowano różne podejścia w celu poprawy właściwości sklejki i materiałów drewnopochodnych przy użyciu CFRP [206, 207, 208, 209]. Bal i in. [210] zbadali właściwości mechaniczne laminowanego drewna fornirowanego wzmocnionego włóknami szklanymi. Stwierdzono, że wzmocnione próbki wykazały znaczący wzrost (213%) wartości wytrzymałości na ścinanie w porównaniu z klejonym fornirem. Auriga i in. [209] zastosowali włókna węglowe jako warstwę wzmacniającą między panelami sklejki. Wyniki wytrzymałości na rozciąganie wykazały, że wzmocnienie paneli sklejki włóknami węglowymi zwiększyło zarówno moduł sprężystości, jak i moduł wytrzymałości na zginanie.

Wang i in. [211] zastosowali CFRP i polimer wzmocniony włóknem szklanym do wzmocnienia klejonego forniru z topoli. Stwierdzili, że zastosowanie wzmocnienia poprawiło moduł sprężystości i wytrzymałość na zginanie. Wei i in. [212] opracowali model teoretyczny wzmocnienia klejonego forniru z topoli za pomocą CFRP. Moduł sprężystości wzrósł o 67% w porównaniu z niewzmocnionymi panelami laminowanymi.

CFRP jest coraz częściej stosowany w przemyśle motoryzacyjnym, okrętowym, kolejowym i lotniczym ze względu na swoje unikalne właściwości mechaniczne, takie jak niska gęstość, wysoka wytrzymałość, wysoki moduł sprężystości i stosunkowo prosta konstrukcja [213, 214]. Zdolność tłumienia drgań jest jednym z głównych parametrów wpływających na trwałość konstrukcji CFRP. W porównaniu z tradycyjnymi materiałami drewnopochodnymi, CFRP ma doskonałe właściwości tłumienia drgań [215, 216].

Wymagania stawiane obecnym drewnopochodnym materiałom konstrukcyjnym w nowoczesnych dziedzinach inżynierii doprowadziły do wzrostu i rozwoju wykorzystania materiałów kompozytowych. Elastyczność projektowania, stabilność wymiarowa i inne niezliczone aspekty, które sprawiają, że materiały kompozytowe są lepsze, doprowadziły do ich szerokiego zastosowania w konstrukcjach lotniczych, motoryzacyjnych i morskich. Dodatkową zaletą jest tworzenie struktur krzywoliniowych, takich jak kadłuby łodzi, moduły konstrukcyjne samochodów itp. Często w takich strukturach wykonuje się wycięcia, które są integralnymi cechami laminowanych powierzchni. Wycięcie zmniejsza masę laminowanej powłoki i zmienia charakterystykę drgań. Ponadto konfiguracja konstrukcji odgrywa kluczową rolę w kontrolowaniu sztywności.

Chociaż wielu badaczy przeprowadziło badania nad wytrzymałością połączeń CFRP/drewno, opublikowana literatura analizująca właściwości dynamiczne takich połączeń jest bardzo ograniczona. W istniejącej literaturze nie opisano dotychczas żadnej eksperymentalnej analizy dynamicznej takiego połączenia materiałów. Analiza eksperymentalna staje się niezwykle niezbędna do zrozumienia zachowania dynamicznego w zastosowaniach praktycznych. Dlatego przeprowadzono eksperymentalną analizę modalną w celu uzyskania realnych charakterystyk dynamicznych połączenia warstwowego.

W niniejszych badaniach określono również wpływ zmiany położenia osi obojętnej podczas zginania. Znajomość dokładnego położenia osi obojętnej pozwala na precyzyjne określenie parametrów wytrzymałościowych klejów użytych w procesie łączenia, a także wpływu defektów wewnętrznych na wytrzymałość uzyskanego połączenia. Właściwości mechaniczne elementów drewnianych mogą ulec znacznej zmianie w wyniku obecności naturalnych defektów (np. sęków i pęknięć). Ponadto przesunięcie osi obojętnej znacząco wpływa na zmianę wartości naprężeń rozciągających i ściskających.

Każde ciało lub układ ciał (mechanizm) ma pewne charakterystyczne częstotliwości drgań własnych, które zależą od kształtu ciała i właściwości fizycznych

materiału. Drgania swobodne i drgania własne układów są niezwykle istotne w budowie maszyn. Znajomość częstotliwości drgań własnych pozwala uniknąć zjawiska rezonansu.

Wybrano do analizy materiały konstrukcyjne ze względu na ich najczęstsze zastosowanie w budowie jachtów, żaglowców i kamperów.

### 3.1.2. Metodyka badań

#### Materiały

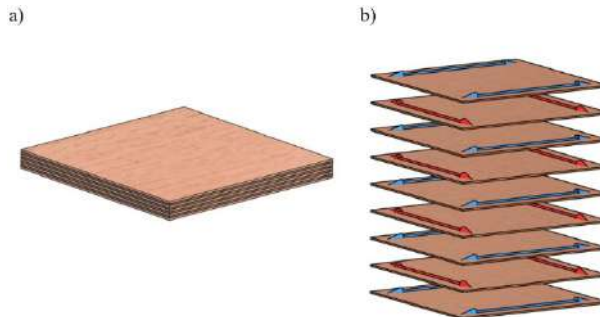
W badaniach użyto płyty sklejkowe (Biaform SA, Białystok, Polska) wyprodukowane z fornirow sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) o grubości 1,3 mm oraz płytę CFRP o grubości 3 mm. Płyta CFRP została przyklejona jednostronnie do zewnętrznej powierzchni sklejki. Do badań zginania trójpunktowego oraz statycznej próby rozciągania użyto próbki o wymiarach 270 mm × 30 mm × 12 mm. Do badań dynamicznych natomiast próbki o wymiarach 500 mm × 30 mm × 12 mm.

Należy podkreślić, że zarówno wymiar poprzeczny próbki, jak i jej długość mają wpływ na uzyskaną charakterystykę drgań własnych. Zachowanie identycznych wymiarów badanego elementu jest istotne jedynie wówczas, gdy celem badań jest porównanie właściwości dynamicznych konstrukcji. Nie ma ściśle określonych wymiarów próbki, które powinny być stosowane w podobnych testach.

#### *Sklejka i właściwości mechaniczne*

Przed badaniami próbki sklejki (Biaform SA, Białystok, Polska) przechowywano w następujących warunkach: temperatura  $22 \pm 2^\circ\text{C}$  i wilgotność  $15 \pm 2\%$ .

Rysunek 3.1 przedstawia schematyczny układ naprzemiennego ułożenia fornirow ( $0^\circ$  i  $90^\circ$ ) w sklejce użytej w badaniach.



Rys. 3.1. Sklejka (12 mm): a) płyta, b) konstrukcja [217]

W badaniach założono a priori, że dodatkowym materiałem użytym do wzmocnienia sklejki będzie płyta CFRP przyklejona na wierzchniej stronie sklejki.

Płyta CFRP o tej samej grubości jest o około 30 – 40% lżejsza niż element wykonany np. z aluminium. Jeśli dodamy do tego praktycznie zerową rozszerzalność cieplną włókien węglowych i wyjątkowo atrakcyjny wygląd materiału, okazuje się, że CFRP ma wiele zastosowań w przemyśle, zwłaszcza w produktach finalnych, którym nadaje niepowtarzalny wygląd. Płyta wykonana w 100% z włókien węglowych (tzw. płyta z pełnego włókna węglowego) jest zalecana, szczególnie w zastosowaniach budowlanych, gdzie korzystna jest wysoka wytrzymałość płyty na zginanie i jej sztywność.

Przykładami zastosowań takiej płyty są panele do budowy jachtów, dekoracyjne elementy wnętrz, panele samochodowe i obudowy urządzeń. Wierzchnia błyszcząca warstwa płyty jest zabezpieczona przed promieniowaniem UV. Druga strona płyty CFRP jest matowa i szorstka. Ta cecha została wykorzystana w produkcji płyt ze sklejk wzmacnionych CFRP.

Polimery wzmacnione włóknami są stosowane do polepszenia właściwości mechanicznych kompozytów drewnopochodnych, podczas gdy klej działa jako nośnik naprężeń [218]. W ostatnich latach wiele rodzajów włókien, w tym włókna węglowe, włókna szklane, włókna aramidowe, włókna bazaltowe i włókna kevlarowe, było używanych jako materiały wzmacniające w matrycy polimerowej [210, 219]. Laminaty CFRP zapewniają wysoką wytrzymałość, wysoki moduł sprężystości i wyjątkową odporność na zmęczenie, są odporne na wodę morską i stabilne termicznie [220, 221].

CFRP to bardzo lekki materiał odporny na alkalia. Powierzchnie z włókna węglowego są niereaktywne i niepolarne [198]. Niższy moduł sprężystości włókien szklanych w większym stopniu zwiększa wytrzymałość laminatów drewnopochodnych [222]. Stosowanie paneli CFRP do renowacji konstrukcji metalowych, betonowych i drewnianych stało się rutyną dla wielu firm [223, 224]. Jedną z największych zalet CFRP, oprócz korzystnego stosunku wytrzymałości do masy, jest dekoracyjny, nowoczesny wygląd jego powierzchni, pożądanym przez klientów.

Na etapie wykańczania kampera, vana, żaglówki lub jachtu, gdzie sklejka jest podstawowym materiałem wykończeniowym, jest ona malowana lub laminowana. W konfiguracji zaproponowanej w niniejszych badaniach nie ma potrzeby późniejszego laminowania ani malowania wierzchniej warstwy płyt CFRP/sklejki. Grubość proponowanego laminatu hybrydowego jest taka sama jak grubość typowej sklejk (12 mm) stosowanej jako materiał wykończeniowy w pojazdach transportowych. W testach zastosowano jednostronne wzmacnienie, ponieważ taka konfiguracja jest zgodna z celem zachowania estetyki zewnętrznej powierzchni laminatu dla określonych zastosowań wykończeniowych, przy jednoczesnym zapewnieniu odpowiednich właściwości wytrzymałościowych.

Dalszy wzrost właściwości wytrzymałościowych można uzyskać poprzez klejenie płyt CFRP po obu stronach sklejk. Jednakże, zwiększony koszt zakupu dodatkowej płyty CFRP w celu obustronnego wzmacnienia sklejk należy uznać za ograniczenie. Na podstawie przeprowadzonych badań wytrzymałościowych

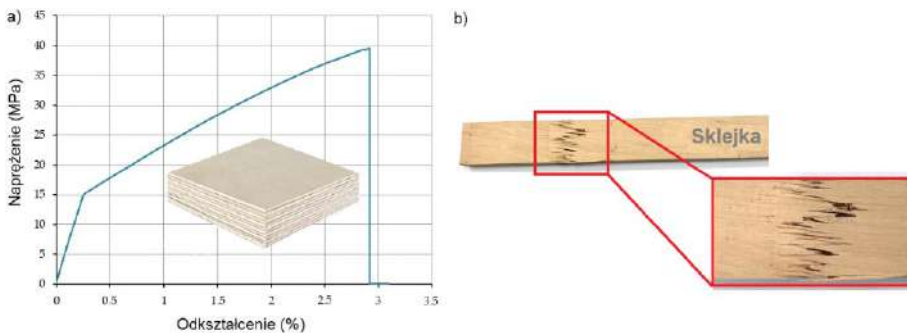
stwierdzono, że jednostronne klejenie laminatu CFRP jest właściwym kompromisem pozwalającym na uzyskanie odpowiedniego wyglądu zewnętrznego, właściwości mechanicznych, masy płyty i kosztów.

Przed rozpoczęciem badań głównych wykonano pomiary wybranych właściwości mechanicznych materiałów użytych w badaniach. Moduł wytrzymałości na zginanie (MoR) wyznaczono równoległe i prostopadłe do kierunku włókien forniru zewnętrznego. Moduł sprężystości (MoE) wyznaczono w kierunkach równoległych i prostopadłych do fornirów. Badania eksperymentalne przeprowadzono zgodnie z normą EN 310 [225]. Badania mające na celu wyznaczenie MoR i MoE przeprowadzono na uniwersalnej maszynie wytrzymałościowej Zwick/Roell Z100. Badania powtórzono co najmniej dziesięciokrotnie, a następnie wyznaczono średnie wartości MoR i MoE. Wyniki badań właściwości mechanicznych sklejk poddano analizie statystycznej przy użyciu programu Statistica wersja 12.

Statyczna próba rozciągania, przeprowadzana zgodnie z normą EN 310, jest podstawowym i najczęściej wykonywanym badaniem określającym wytrzymałość materiałów. Badanie polega na rozciąganiu znormalizowanej próbki aż do jej zerwania. Podczas badania określane są takie właściwości, jak graniczna wytrzymałość na rozciąganie oraz moduł sprężystości.

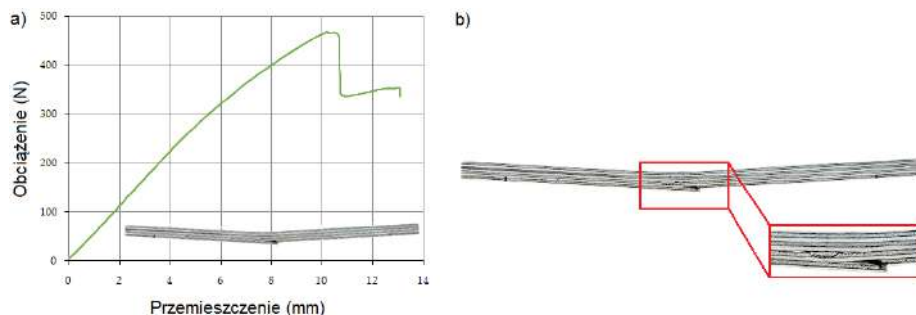
Badanie zginania trzypunktowego jest jedną z podstawowych metod określania wytrzymałości na zginanie i modułu sprężystości. Zginanie trzypunktowe z zadaną prędkością ruchu stempla służy między innymi do badania charakteru pęknięcia i wyznaczania modułu sprężystości. Zgodnie z normą EN 310, prędkość obciążenia powinna być dobrana tak, aby próbka uległa zniszczeniu w ciągu  $60 \pm 30$  s. Gęstość płyt sklejkowych określono zgodnie z normą EN 323.

Na rysunku 3.2 zaprezentowano przykładowy, uzyskany w badaniach wykres naprężenia w funkcji odkształcenia po wykonanej statycznej próbie rozciągania.



Rys. 3.2. Sklejka (12 mm): a) statyczna próba rozciągania, b) próbka po zniszczeniu [217]

Na rysunku 3.3 zaprezentowano przykładowy, uzyskany w badaniach, wykres siły obciążenia w funkcji przemieszczenia po wykonanej próbie trójpunktowego zginania.



Rys. 3.3. Sklejka (12 mm): a) statyczna próba zginania, b) próbka po zniszczeniu [217]

W tabeli 3.1 zestawiono wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne zastosowanej w badaniach sklejki.

Tabela 3.1. Wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne sklejki

	Gęstość g/cm <sup>3</sup>	Wytrzymałość na zginanie MPa	Moduł sprężystości MPa	Moduł zginania MPa	Wytrzymałość na rozciąganie MPa
Sklejka	0,65(0,1)	75(9)	5560(261)	2200(189)	36(5) *

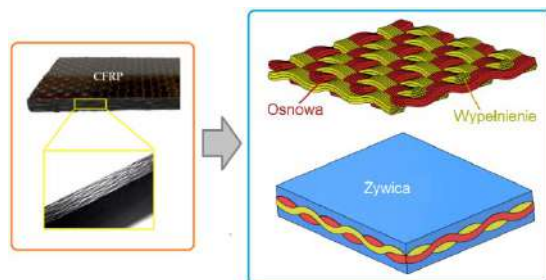
\* Wartości w nawiasach to odchylenie standardowe pomiaru

#### CFRP i właściwości mechaniczne

Zastosowano laminat CFRP, w którym włókna w tkaninie węglowej o splocie płóciennym przebiegają pod kątem 0°/90° względem siebie. Dzięki splotowi 1/1 włókna są do siebie prostopadłe. Panel CFRP użyty w tym badaniu składał się w 50% z włókien węglowych i w 50% z żywicy epoksydowej. Zwiększa to stosunek sztywności zginania do wytrzymałości na ściskanie i rozciąganie. Precyzyjny splot włókien pozwala na uzyskanie bardzo delikatnego wyglądu tkaniny, co oznacza, że produkty węglowe charakteryzują się eleganckim wzornictwem, dopasowanym do potrzeb branży wyposażenia wnętrz.

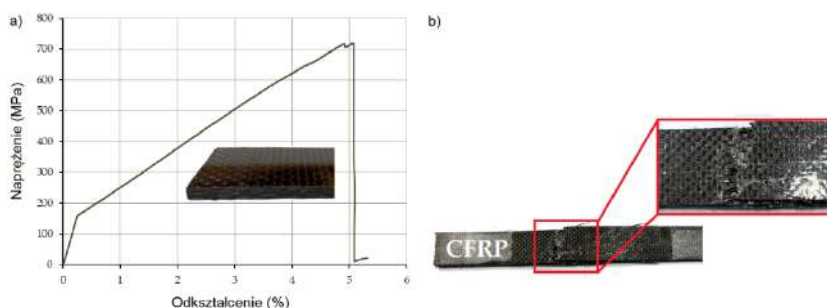
Jak pokazano na rys. 3.4, specyficzna struktura splotu, zwana strukturą płaską, składa się z przeplatających się włókien podłużnych (osnowa) i włókien poprzecznych (wypełnienie) w układzie „nad-pod”, co skutkuje spójnym i symetrycznym wzorem krzyżowym. Laminat CFRP użyty w tym badaniu składał się z pięciu warstw, a średnica włókien węglowych wynosiła około 8 μm.

Płyta CFRP jest wytwarzana z prepregów, czyli warstw włókien węglowych, które na etapie produkcji surowca zostały nasycone żywicą epoksydową. Żywica chroni włókna przed uszkodzeniem i nadaje im odpowiednią lepkość, co ułatwia przyleganie tkanin do powierzchni formy.



Rys. 3.4. Ilustracja struktury CFRP [217]

Podobnie, jak w przypadku sklejki, przed przystąpieniem do badań zasadniczych, wykonano pomiary wybranych właściwości mechanicznych i fizycznych badanych materiałów. Na rysunku 3.5 zaprezentowano przykładowy, uzyskany w badaniach, wykres naprężenia w funkcji odkształcenia po wykonanej statycznej próbie rozciągania laminatu CFRP.



Rys. 3.5. CFRP: a) statyczna próba rozciągania, b) próbka po zniszczeniu [217]

W tabeli 3.2 zestawiono wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne zastosowanego w badaniach laminatu CFRP.

Tabela 3.2. Wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne laminatu

	Gęstość g/cm <sup>3</sup>	Wytrzymałość na zginanie MPa	Moduł sprężystości MPa	Moduł zginania MPa	Wytrzymałość na rozciąganie MPa
CFRP	1,55(0,3)	850(15)	64530(676)	82 000 (645)	752(25) *

\* Wartości w nawiasach to odchylenie standardowe pomiaru

Porównując wyniki uzyskanych badań, które przedstawiono w tab. 3.1 i 3.2, można zauważyć, że zastosowane w badaniach materiały charakteryzują się dość znacznym zróżnicowaniem właściwości mechanicznych. Właściwości mechaniczne materiałów mają fundamentalne znaczenie dla zrozumienia zachowania

elementów w konstrukcjach inżynierskich. Od wytrzymałości na rozciąganie po twardość i elastyczność, właściwości te odgrywają kluczową rolę w projektowaniu i inżynierii wielu produktów i konstrukcji.

### Klej

Płyta sklejkowa została przyklejona do płyty CFRP za pomocą kleju meta-krylowego ACRA LOCK SA 10-15 BLK. Zgodnie z kartą techniczną jest to klej o podwyższonej elastyczności, zalecany do łączenia płyt kompozytowych w przyczepach samochodowych i kamperach. Do celów laboratoryjnych głównym kryterium wyboru było przeznaczenie kleju i jego wydajność. Ekonomicznie ceny większości podobnych klejów są zbliżone.

Skuteczność wzmocnienia elementów konstrukcyjnych zależy od prawidłowego wykonania procesu klejenia. Przed nałożeniem kleju powierzchnie forniru i płyty CFRP zostały przeszlifowane. Następnie płyta CFRP i sklejka zostały odpowiednio oczyszczone przy użyciu alkoholu izopropylowego. W procesie klejenia, w pierwszym kroku, warstwa kleju została równomiernie nałożona na powierzchnię sklejki za pomocą aplikatora, a następnie na powierzchnię laminatu CFRP. Po nałożeniu kleju, płyty zostały dociśnięte do siebie, aby je połączyć i zapewnić precyzyjną przyczepność klejonych powierzchni. Parametry łączenia były następujące: temperatura  $22 \pm 1^\circ\text{C}$ , nacisk  $0,35 \text{ N/mm}^2$  i czas 6 h. Próbkki sklejki zostały wzmocnione płytą CFRP na jednej z jej zewnętrznych powierzchni.

Pomiar twardości Shore'a kleju został wykonany zgodnie z normą ASTM D2240. Pomiar ten został wykonany po całkowitym utwardzeniu kleju. Czas utwardzania do pełnej wytrzymałości, zgodnie z informacjami producenta, wynosi 6 h. Pomiar twardości został wykonany w środku złącza, pomiędzy sklejką a płytą CFRP. Ze względu na utwardzanie chemiczne kleju, miejsce pomiaru twardości (od strony sklejki lub CFRP) nie wpływa na zmiany jej wartości. Wybrane właściwości kleju zestawiono w tab. 3.3.

Tabela 3.3. Wybrane właściwości mechaniczne kleju

Wytrzymałość na rozciąganie MPa	Twardość Shore'a	Wytrzymałość na ścinanie MPa
21-24	70D	17-21

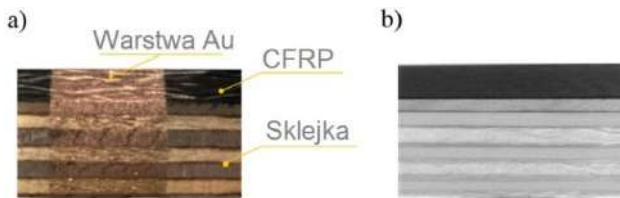
Rysunek 3.6 przedstawia lamelę ze sklejki wzmocnioną laminatem CFRP, którą przygotowano do badań.



Rys. 3.6. Połączenie klejone sklejki z CFRP [217]

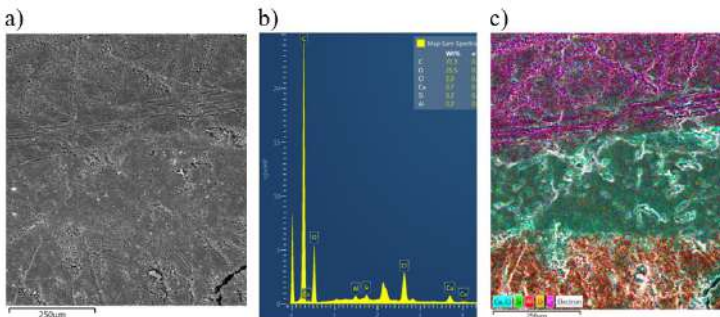
### Przygotowanie próbek

W celu wizualizacji struktury i analizy składu chemicznego przeprowadzono analizę składu chemicznego uzyskanego połączenia sklejka+CFRP za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego TESCAN. Ponadto, próbka połączenia sklejki z laminatem CFRP została prześwietlona i sfotografowana za pomocą tomografu rentgenowskiego General Electric phoenix v|tome|xm. Przed przystąpieniem do analizy z zastosowaniem mikroskopu skaningowego konieczne było odpowiednie przygotowanie próbek. Z uwagi, że sklejka należy do dielektryków, konieczne było wcześniejsze nałożenie (napylenie) na jej powierzchni cienkiej warstwy materiału przewodzącego prąd (rys. 3.7). W tym przypadku zastosowano złoto. Metodyka procesu napylenia została szczegółowo opisana w pracy [16].



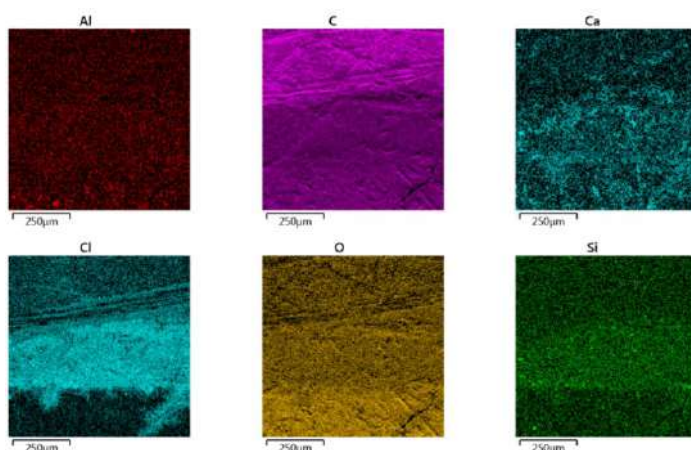
Rys. 3.7. Próbką: a) do analizy SEM, b) zdjęcie TK [217]

Na rysunku 3.8 przedstawiono zdjęcia wraz z analizą chemiczną wybranego fragmentu próbki przedstawionej na rys. 3.7. Do analizy wybrano obszar, w którym można wyodrębnić: laminat CFRP, klej oraz sklejkę. Jak można zauważyć (rys. 3.8c), widać zróżnicowany rozkład pierwiastków w analizowanym obszarze. Jak można było przewidzieć, analizując obszar, w który występuje laminat CFRP, wystąpił tutaj największy udział węgla. Jest to zrozumiałe, z uwagi na budowę laminatu CFRP. Przesuwając się ku dołowi, można wyodrębnić warstwę kleju, w której zanotowano znaczący udział pierwiastków takich jak: chlor oraz krzem. Jest to wynikiem udziału tych pierwiastków w składzie chemicznym kleju. Natomiast w ostatniej warstwie analizowanego obszaru, dominującymi pierwiastkami są: węgiel i tlen. Jest to wynikiem, tego, że sklejka należy do materiałów organicznych.



Rys. 3.8. Zdjęcia analizy SEM [217]

Na rysunku 3.9 przedstawiono rozkład dominujących w dokonanej analizie pierwiastków.



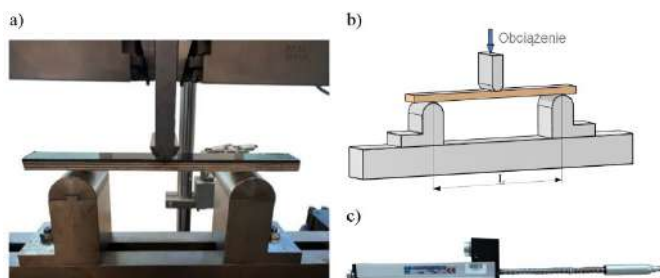
Rys. 3.9. Mapy SEM [217]

### Tor pomiarowy

W ramach przeprowadzonych badań, oprócz próby trzypunktowego zginania (rys. 3.10), dokonano pomiaru odkształceń występujących w belce zginanej (rys. 3.11). Ponadto, wyznaczono charakterystykę dynamiczną uzyskanego połączenia sklejkki z laminatem CFRP.

### *Test zginania trzypunktowego*

W próbie zginania trzypunktowego zgodnie z normą EN 310, prostopadłościenną próbkę umieszcza się na dwóch podporach i poddaje się ciągłemu odkształcaniu za pomocą centralnie umieszczonego stępła zginającego za pomocą maszyny wytrzymałościowej, z określoną prędkością badawczą, aż do pęknięcia. Podczas procesu odkształcania mierzona jest siła wywierana przez stempel zginający oraz ugięcie próbki pod stemplem zginającym.



Rys. 3.10. Trzypunktowa próba zginania: a) stanowisko pomiarowe, b) schemat pomiaru  $L = 240$  mm, c) czujnik do pomiaru przemieszczeń liniowych [217]

Próbki ze sklejki i połączenia sklejka + CFRP zostały użyte do testów zginania trzypunktowego na uniwersalnej maszynie do badań mechanicznych zgodnie z normą. Każda próbka została przetestowana przy płaskim zginaniu o rozpiętości  $L = 240$  mm i prędkości  $0,3$  mm/min, aby określić podstawowe wskaźniki wytrzymałościowe: MoE i MoR. Ugięcie w połowie rozpiętości  $\Delta$  mierzono przy użyciu czujnika przemieszczeń liniowych Megatron SPR18-100.

Oznaczenie modułu sprężystości realizowane było w środku długości próbki podpartej w dwóch punktach. Moduł sprężystości obliczano biorąc pod uwagę prostoliniowy odcinek krzywej obciążenie-odkształcenie. Oblicza się wartość modułu pozornego, a nie rzeczywistego, ponieważ metoda oznaczania obejmuje nie tylko zginanie lecz także ścinanie. Każda próbka w badaniach została przetestowana w ten sam sposób i była obciążana do momentu zniszczenia w celu ustalenia zarówno modułu zerwania (MoR), jak i modułu sprężystości (MoE). Wartość MoR  $N/mm^2$  obliczono z maksymalną siłą obciążającą określoną równaniem (3.1):

$$MoR = \frac{F \cdot L}{2W_x} \quad (3.1)$$

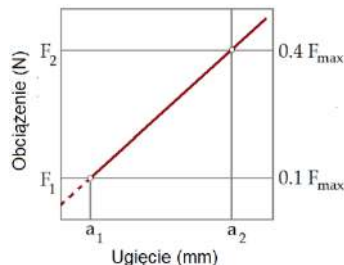
gdzie:  $L$  – odległość między środkami podpór mm,  $W_x$  – wskaźnik wytrzymałości przekroju na zginania  $mm^3$  (3.2),  $I_x$  – moment bezwładności przekroju  $mm^4$ ,  $y$  – odległość skrajnych włókien od osi obojętnej mm,  $F$  – maksymalna siła N.

$$W_x = \frac{I_x}{y} \quad (3.2)$$

Moduł sprężystości MoE  $N/mm^2$  w każdej próbie obliczono we wzoru (3.3) określonego w EN 310:

$$MoE = \frac{L^3(F_2 - F_1)}{4bh^3(a_2 - a_1)} \quad (3.3)$$

gdzie:  $b$  – szerokość próbki mm,  $h$  – grubość próbki mm,  $(F_2 - F_1)$  – przyrost obciążenia prostoliniowego odcinka krzywej obciążenie-odkształcenie (rys. 3.11) N,  $(a_2 - a_1)$  – przyrost strzałki ugięcia mierzony w środku długości próbki (odpowiadający  $F_2 - F_1$ ) (rys. 3.11) mm.



Rys. 3.11. Wykres obciążenie-odkształcenie w zakresie odkształcenia sprężystego [217]

Na rysunku 3.11 przedstawiono wykres obciążenie-odkształcenie w zakresie odkształcenia sprężystego, który posłużył do interpretacji graficznej występujących we wzorze (3.3) zmiennych.

### *Test zginania belki wspornikowej*

W przeprowadzonych badaniach, oprócz testu zginania lameli metodą trzy-punktową, przeprowadzono badania zginania lameli przyjmując model belki wspornikowej (belka utwierdzona jednostronnie, drugi koniec belki swobodny). Badanie takie miało na celu uzyskanie dogodniejszego pomiar odkształceń  $\varepsilon$  lameli oraz przede wszystkim możliwość analizy dynamicznej lameli. Podczas próby zginania rejestrowano sygnały odkształcenia  $\varepsilon$  w kierunku prostopadłym do płaszczyzny połączenia sklejk z laminatem CFRP.

Schematyczny diagram konfiguracji toru pomiarowego i systemu archiwizacji danych pomiarowych z badań dotyczących odkształceń jak i analiz dynamicznych belki pokazano na rys. 3.12.

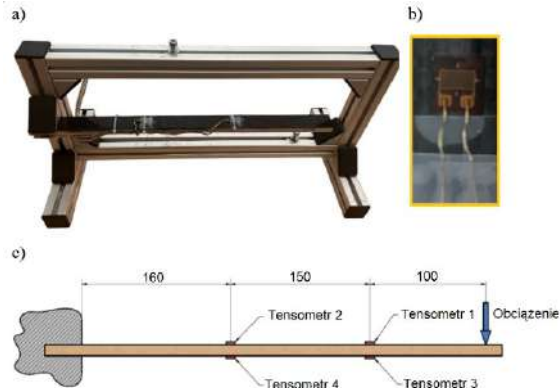


Rys. 3.12. Tor pomiarowy do analizy odkształceń i charakterystyki dynamicznej [217]

Wartość odkształceń lameli podczas zginania mierzono za pomocą tensometrów TENMEX T-2/350, które zostały naklejone na belce wg konfiguracji przedstawionej na rys. 3.13. Zgodnie z zaleceniami firmy TENMEX, tensometry zostały przyklejone do powierzchni sklejk/CFRP za pomocą kleju poliestrowego utwardzanego w temperaturze pokojowej. Po dokładnym oczyszczeniu powierzchni zastosowano typową procedurę przyklejania czujnika tensometrycznego. Tensometry zostały włączone do obwodu, aby utworzyć ćwierć-mościek Wheatstone'a.

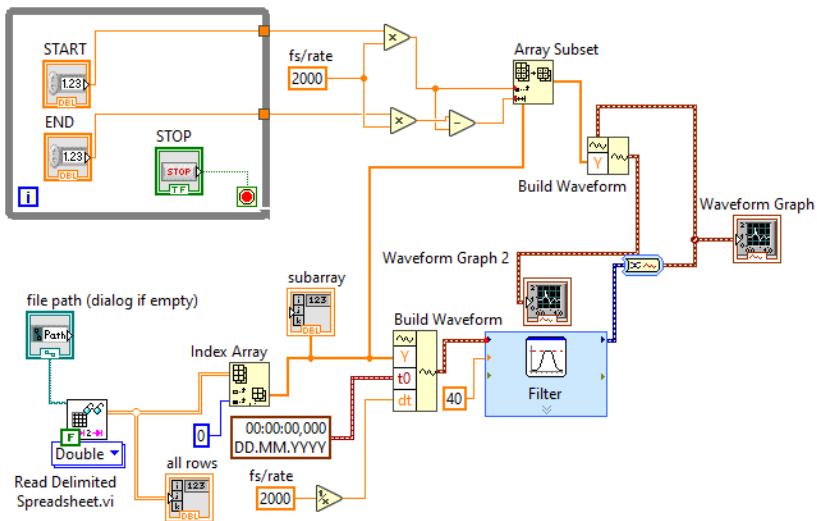
W trakcie badań dokonywano pomiaru odkształceń zarówno dla lameli uzyskanej z połączenia sklejk z laminatem CFRP jak i dla lameli tylko ze sklejk. Siła obciążająca belkę przedstawioną na rys. 3.13 wynosiła 30 N. Tensometry przyklejono z obu stron belki zginanej.

W układzie rejestrującym sygnały zastosowano Controller NI Compact Four-Slot cDAQ-9132. Sygnały z tensometrów za pośrednictwem układu Quarter-Bridge Strain Gage NI-9236 były rejestrowane na dysku twardym.



Rys. 3.13. Pomiar odkształceń belki: a) stanowisko pomiarowe, b) tensometr, c) schemat pomiarowy [217]

Ważną informacją dotyczącą właściwości dynamicznych jest określenie charakterystyki częstotliwościowej analizowanej belki, czyli pod wpływem pobudzenia belki wymuszeniem  $F(t)$  obserwujemy odpowiedź układu na zaistniałe wymuszenie. W celu wymuszenia przemieszczenia belki zastosowano młotek modalny KISTLER 9724A, którym pobudzono belkę. Odpowiedź układu na wymuszenie wyznaczano na podstawie odkształceń układu tensometrycznego. W tym celu opracowano w środowisku LabVIEW 2022 aplikację pozwalającą na wyznaczenie częstotliwości drgań własnych lameli na podstawie zarejestrowanych sygnałów odkształceń. Diagram opracowanej aplikacji przedstawiono na rys. 3.14.

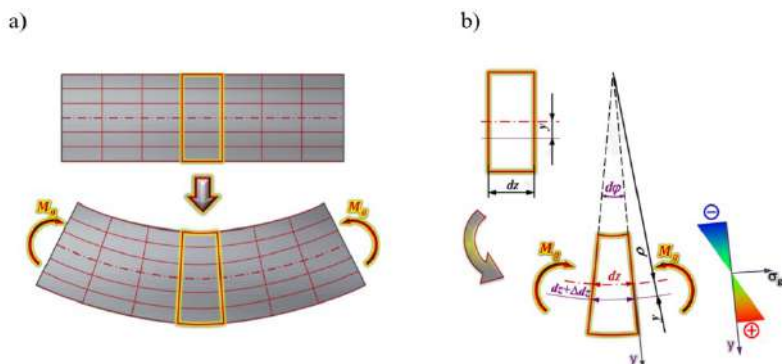


Rys. 3.14. Diagram blokowy w LabVIEW 2022 [217]

### 3.1.3. Wyniki badań i ich analiza

#### Zginanie trzypunktowe

Rozważając pryzmatyczny pręt o przekroju prostokątnym i na jego powierzchniach bocznych należy myślowo nanieść siatkę utworzoną z linii równoległych do osi pręta oraz z linii obwodowych leżących w płaszczyznach przekrojów poprzecznych pręta (rys. 3.15).



Rys. 3.15. Odskształcenie pręta zginanego; a, b – objaśnienia w tekście [217]

Następnie kolorem żółtym oznaczyć elementy siatki położone w jednej płaszczyźnie przekroju poprzecznego pręta, jak to pokazano na rys. 3.15a, przedstawiającym pręt w stanie nieodkształconym. Jeżeli teraz w pionowej płaszczyźnie symetrii „yz” obciążony zostanie pręt momentem  $M_g$ , to zauważyć będzie można, że w odkształconym pręcie linie obwodowe pozostaną płaskie, a płaszczyzny przekrojów poprzecznych zaznaczonego fragmentu siatki, nachyła się do siebie pod kątem. Włókna górne się skrócą, włókna dolne się wydłużą, a długości włókien środkowych, położonych w połowie przekroju nie ulegną zmianie. W związku z tym, że włókna górne uległy skróceniu, w tej części w kierunku poprzecznym pręt się rozszerzy, w części zaś dolnej zwęzi i prostokątny przekrój poprzeczny pręta przyjmie kształt pokazany na rys. 3.15b (zbliżony do trapezowego). Jeżeli promień krzywizny warstwy obojętnej oznaczy się  $\rho$ , to długość odcinka włókna warstwy obojętnej można wyrazić wzorem (3.4):

$$dz = d\varphi \cdot \rho \quad (3.4)$$

Włókno położone w odległości  $y$  od warstwy obojętnej przed odkształceniem miało długość równą  $d\varphi \cdot \rho$  natomiast po odkształceniu (3.5):

$$dz + \Delta dz = (\rho + y)d\varphi \quad (3.5)$$

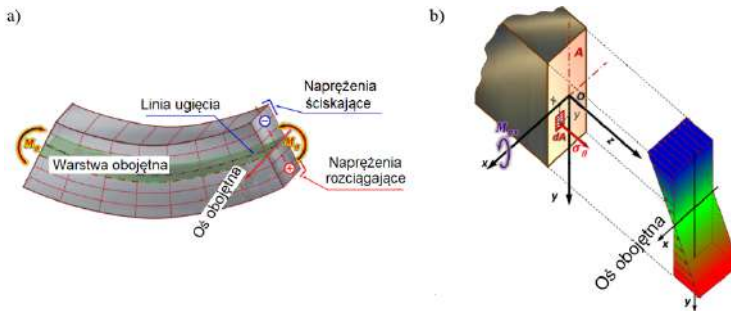
Wydłużenie (skrócenie) względne włókna wynosi więc (3.6):

$$\varepsilon = \frac{(dz + \Delta z) - dz}{dz} = \frac{(\rho + y)d\varphi - \rho \cdot d\varphi}{\rho \cdot d\varphi} \quad (3.6)$$

po uproszczeniu uzyskuje się (3.7):

$$\varepsilon = \frac{y}{\rho} \quad (3.7)$$

Dla danego przekroju promień krzywizny  $\rho$  zgiętej belki jest stały ( $\rho = \text{const.}$ ), zatem z powyższego wzoru wynika, że naprężenia w poszczególnych punktach przekroju poprzecznego belki zginanej zmieniają się proporcjonalnie do odległości tych punktów od warstwy obojętnej, jak to pokazano na rysunku rys. 3.16b.



Rys. 3.16. Rozkład naprężeń w pręcie zginanym; a, b – objaśnienia w tekście [217]

zgodnie z prawem Hooke'a (3.8):

$$\sigma_g = E \cdot \varepsilon \quad (3.8)$$

podstawiając zależność (3.7), uzyskuje się (3.9):

$$\sigma_g = \frac{E}{\rho} \cdot y \quad (3.9)$$

Moment elementarnej siły względem osi obojętnej (rys. 3.16b) wynosi  $\sigma_g \cdot y \cdot dA$  i suma tych momentów zebrana na całym polu  $A$  przekroju poprzecznego pręta musi równoważyć przyłożony do pręta moment  $M_{gx}$  a więc drugi warunek równowagi rozpatrywanej belki (rys. 3.16) przybiera postać (3.10):

$$M_{gx} = \int_A \sigma_g \cdot y \cdot dA = \frac{E}{\rho} \cdot \int_A y^2 \cdot dA \quad (3.10)$$

Otrzymana całka jest momentem bezwładności przekroju poprzecznego pręta  $I_x$ , czyli (3.11):

$$M_{gx} = M_g = \frac{E}{\rho} \cdot I_x \quad (3.11)$$

zatem zależność (3.11) można zapisać w postaci:

$$\frac{1}{\rho} = \frac{M_g}{E \cdot I_x} \quad (3.12)$$

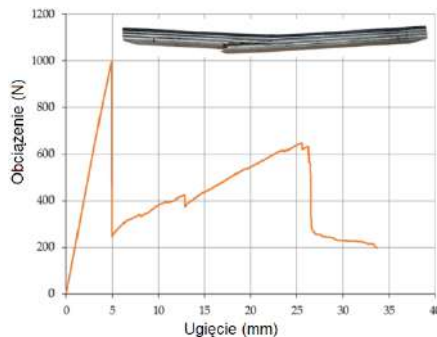
po podstawieniu zaś wzoru (3.9) otrzymuje się (3.13):

$$\frac{1}{\rho} = \frac{\sigma_g}{E \cdot y} \quad (3.13)$$

uwzględniając (3.12) można wyznaczyć (3.14):

$$\sigma_g = \frac{M_g}{I_x} \cdot y \quad (3.14)$$

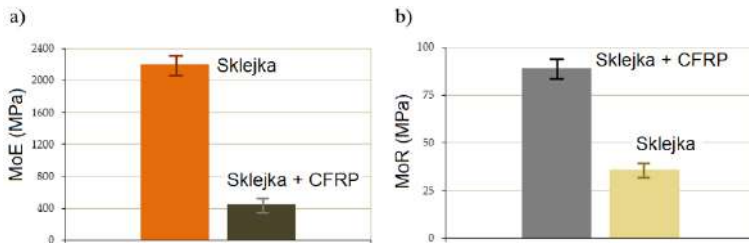
Z otrzymanej zależności można zaobserwować, że w zginanym pręcie naprężenia w przekroju poprzecznym są wprost proporcjonalne do odległości  $y$  danego punktu przekroju od warstwy obojętnej, jak to przedstawiono na rys. 3.16b. Zgodnie ze wzorem (3.14) w pręcie zginanym największe naprężenia występują we włóknach położonych najdalej od osi obojętnej. W przypadku gdy oś obojętnej jest równocześnie osią symetrii pręta, największe naprężenia występują we włóknach dolnych (rozciągające) i we włóknach górnych (ściskające).



Rys. 3.17. Trzypunktowa próba zginania [217]

Wszystkie belki zastosowane w teście zginania uległy zniszczeniu w obszarach najbardziej oddalonych od osi obojętnej. W przypadku lameli niewzmocnionych płytą CFRP zniszczenie miało charakter gwałtowny (rys. 3.3) i spowodowane było nagłym pęknięciem. W przypadku lameli wzmocnionych arkuszem CFRP proces zniszczenia przebiegał stosunkowo wolno z zaobserwowanym rozprzestrzenianiem się pęknięć (rys. 3.17).

W trakcie testów zginania nie zaobserwowano zniszczenia połączenia klejowego pomiędzy arkuszem CFRP a sklejką. Zarówno zwiększenie wytrzymałości na zginanie jak i zmniejszenie strzałki ugięcia zaobserwowano w przypadku belek wzmocnionych CFRP. Dla belek nie wzmocnionych płytą CFRP odnotowano maksymalne obciążenie niszczące 455 N, natomiast dla belek wzmocnionych CFRP zanotowano maksymalne obciążenie niszczące 1050 N. Wyznaczony za pomocą metody trzypunktowej moduł sprężystości wyniósł:  $MoE = 415(35)$  MPa dla lameli sklejką z laminatem CFRP i  $MoE = 2200(115)$  MPa dla lameli ze sklejki. Natomiast wytrzymałość na zginanie:  $MoR = 91(12)$  MPa dla lameli sklejką z laminatem CFRP i  $MoR = 32(8)$  MPa dla lameli ze sklejki. Wartości podane w nawiasach oznaczają odchylenie standardowe pomiaru. Wyniki w formie graficznej zaprezentowano na rys. 3.18.



Rys. 3.18. Wartości MoE i MoR uzyskane w trzypunktowej próbie zginania [217]

Jak można zauważyć (rys. 3.18), w przypadku zastosowania wzmocnienia lameli sklejkowych laminatem CFRP wartość naprężeń zginających ( $MoR$ ) uległa trzykrotnemu zwiększeniu, a wartość modułu sprężystości ( $MoE$ ) ponad pięciokrotnemu zmniejszeniu wartości w porównaniu z lamelą sklejkową.

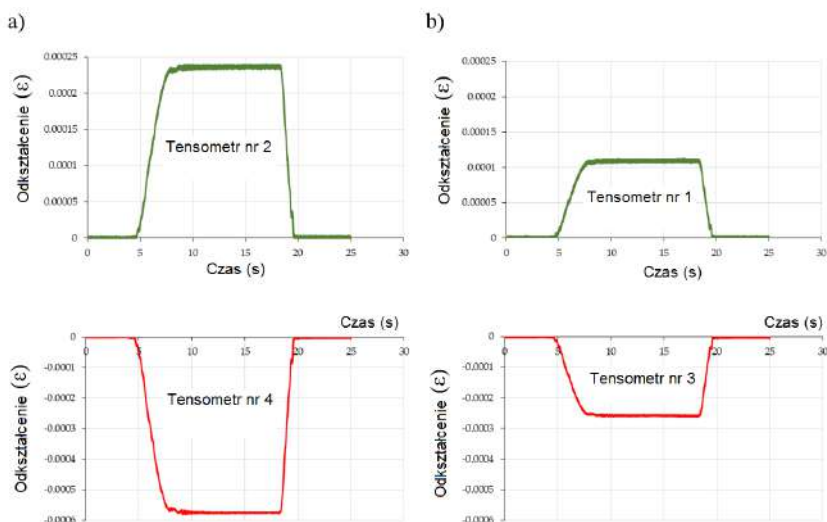
### Odkształcenia połączenia hybrydowego

Zarówno sklejka, jak i CFRP są materiałami anizotropowymi, tzn. ich właściwości mechaniczne różnią się w różnych kierunkach przestrzennych. Liczba różnych kierunków jest ograniczona założeniem trzech wzajemnie prostopadłych płaszczyzn. Pomimo szerokiego zastosowania w wielu zastosowaniach konstrukcyjnych, numeryczne i analityczne modelowanie materiałów drewnopochodnych, jak również ogólne zrozumienie zachowania mechanicznego pozostają niewystarczające.

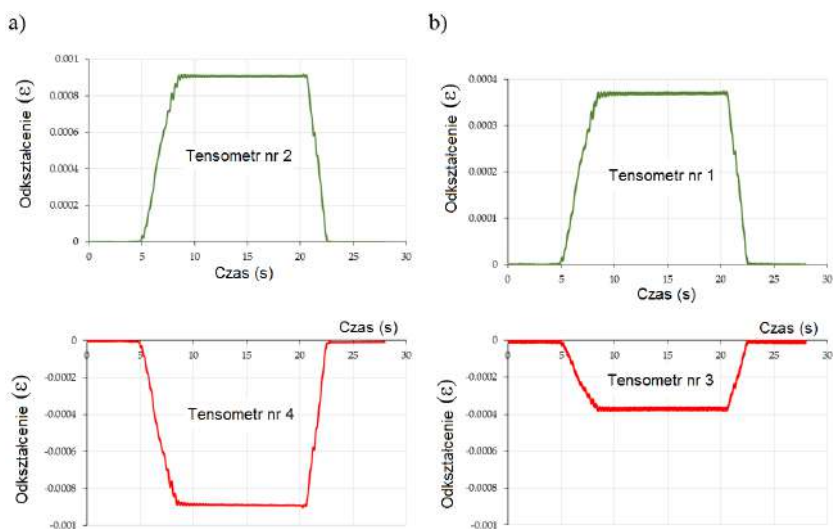
Istnieje niewiele badań skupiających się na zachowaniu tego szeroko stosowanego materiału. Pomiarы odkształceń drewna i materiałów drewnopochodnych tradycyjnie przeprowadza się za pomocą tensometrów. Na rysunku 3.19 i 3.20 przedstawiono przykładowe wartości odkształceń lameli wzmocnionych laminatem CFRP, jak i niewzmocnionych uzyskane w trakcie przeprowadzonych badań.

Miejsce, w którym realizowano pomiar odkształceń na powierzchni lameli przedstawiono na rys. 3.13. Na podstawie zrealizowanych pomiarów odkształceń lameli  $\epsilon$  metodą tensometryczną i wyznaczonego wskaźnika  $MoE$  (rys. 3.18)

w próbie trzypunktowego zginania określono wartości naprężeń występujących na powierzchni lameli. Naprężenia te mają charakter ściskający i rozciągający (rys. 3.16).

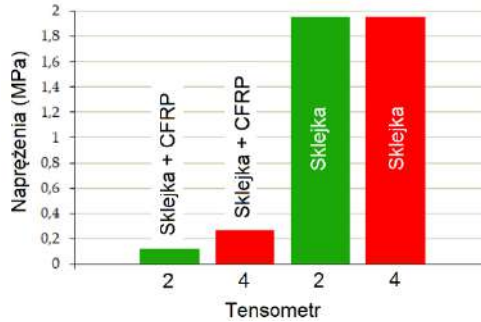


Rys. 3.19. Odkształcenie lameli ze sklejkii wzmocnionej laminatem CFRP [217]



Rys. 3.20. Odkształcenie lameli ze sklejkii [217]

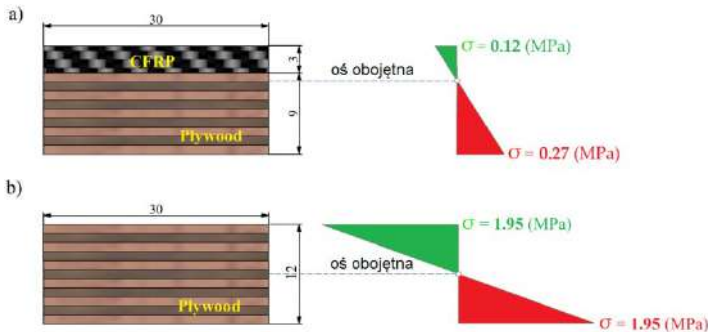
Na rysunku 3.21 przedstawiono w formie graficznej rozkład naprężeń występujących na powierzchniach lameli. Wartości naprężeń wyznaczono z uproszczonego prawa Hooke'a (3.9). Kolorem zielonym oznaczono naprężenia rozciągające, a kolorem czerwonym naprężenia ściskające.



Rys. 3.21. Wartość naprężeń rozciągających i ściskających uzyskana podczas pomiarów [217]

Jak można zauważyć (rys. 3.21 i 3.22), w przypadku zastosowania wzmocnienia lameli sklejkowych laminatem CFRP wartość naprężeń rozciągających uległa szesnastokrotnemu, a wartość naprężeń ściskających ponad siedmiokrotnemu zmniejszeniu w porównaniu z lamelą sklejkową. Ponadto, oś obojętna zginania przesunęła się w kierunku laminatu CFRP, w wyniku hybrydowej budowy analizowanej lameli.

Całkiem odmienna jest sytuacja, gdy analizowane jest zginanie lameli ze sklejkki. Wówczas odnotowuje się zbliżone, wręcz identyczne wartości naprężeń na powierzchni lameli niezależnie od rodzaju naprężeń (rozciągające czy ściskające). Dla obu typów naprężeń odnotowano, w przeprowadzonych badaniach, zbliżone wartości. W związku z zachowaniem symetrii w wartościach naprężeń, położenie osi obojętnej przechodzi przez środek geometryczny przekroju poprzecznego lameli.



Rys. 3.22. Porównanie rozkładu naprężeń i położenia osi obojętnej: a) belka sklejk/CFRP, b) belka sklejk [217]

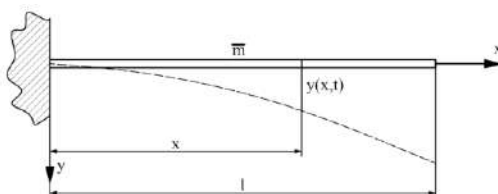
### Charakterystyka dynamiczna

Ważnym etapem w analizie dynamicznej konstrukcji jest określenie jej charakterystyki częstotliwościowej. Impuls Diraca (zwany deltą Diraca) posłużył do wyznaczenia odpowiedzi impulsowej układu.

Przeprowadzono analizę dynamiczną belki wzmocnionej laminatem CFRP i niewzmocnionej. W tym celu, pobudzo układ wymuszeniem w postaci impulsu Diraca z pomocą młotka modalnego. Znając sygnał siły wymuszającej oraz odpowiedź układu w postaci odkształcenia, dokonano analizy modalnej umożliwiającej wyznaczenie częstotliwości drgań własnych belki (rys. 3.13a). Metodę wyznaczania charakterystyki częstotliwościowej opisano w pracy [226].

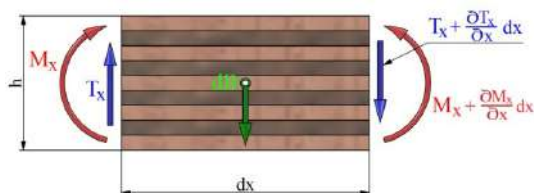
Podczas ruchu drgającej belki pokazanej na rysunku rys. 3.13a i 3.23 przemieszczenia  $y$  jej dowolnego punktu są funkcjami dwóch zmiennych niezależnych: odciętej  $x$  oraz czasu  $t$  (3.15):

$$y = f(x, t) \quad (3.15)$$



Rys. 3.23. Belka wspornikowa o masie  $m$  rozłożonej równomiernie wzdłuż całej rozpiętości  $l$  [217]

Ponieważ przemieszczenie  $y$  określa się w stosunku do położenia równowagi statycznej, rozpatrując więc działające na belkę siły pomijany jest ciężar własny, a uwzględniane są jedynie siły bezwładności i sprężystości. Rozpatrzmy drgania małe, tzn. dające się opisać liniowymi równaniami różniczkowymi, w głównej płaszczyźnie zginania, przy czym przemieszczenia są prostopadłe do osi podłużnej  $x$ , a wymiary poprzecznego przekroju belki, małe w porównaniu z jej długością ( $l : h > 10$ ). Podczas ruchu drgającego każdy element belki podlega działaniu sił bezwładności powodowanych zmianami prędkości (przyśpieszenia) ruchu. Siły zastępujące działanie odciętych części belki na rozpatrywany element, o nieskończenie małej długości  $dx$  pokazano na rys. 3.24.



Rys. 3.24. Siły zastępujące działanie odciętych części pręta na rozpatrywany element, o nieskończenie małej długości  $dx$  [217]

Ponadto na element działa siłą bezwładności równa (3.16):

$$dB = -\bar{m} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} dx \quad (3.16)$$

gdzie:  $\bar{m} = m / l$ .

Do wprowadzenia pochodnych cząstkowych zmusza zależność przemieszczenia na kierunku  $y$  od dwóch zmiennych (3.15). Po wprowadzeniu zgodnie z zasadą d'Alemberta siły bezwładności korzysta się z równań równowagi. W związku z tym można opisać warunek sumy rzutów sił na oś pionową (3.17):

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} dx + dB = 0 \quad (3.17)$$

Po podstawieniu wartości (3.16) i podzieleniu przez  $dx$  otrzymuje się (3.18):

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} - \bar{m} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (3.18)$$

Następnie wykorzystać należy zależność między siłą poprzeczną a momentem zginającym (3.19):

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} = T_x \quad (3.19)$$

oraz równanie różniczkowe osi odkształconej belki zginanej (3.20):

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = -\frac{M_x}{EJ} \quad (3.20)$$

Po wprowadzeniu przytoczonych zależności do (3.17) i uporządkowaniu otrzymuje się cząstkowe różniczkowe równanie liniowe czwartego rzędu (3.21):

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{EJ}{\bar{m}} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0 \quad (3.21)$$

Jest to równanie swobodnych drgań poprzecznych belki o masie równomiernie rozłożonej, przy pominięciu wpływu sił poprzecznych oraz sił bezwładności w ruchu obrotowym, które dałyby moment bezwładności względem osi  $z$ , prostopadłej do  $x$  i  $y$  rozpatrywanego elementu.

Ograniczono się do poszukiwania tylko takich rozwiązań równania (3.21), które określają tzw. „falę stojącą”. W takim przypadku rozwiązanie szczególnie opisanego równania może być przedstawione jako funkcja rozdzielonych zmiennych, czyli w formie iloczynu dwóch funkcji (metoda Fouriera). Pierwsza funkcja jest zależna tylko od odciętej  $x$ , a druga tylko od czasu  $t$  (3.22):

$$y = X(x) T(t) \quad (3.22)$$

przy czym funkcja  $X(x)$  określa typ drgań własnych i nosi nazwę funkcji własnej postaci drgań danego układu, natomiast  $T(t)$  jest funkcją czasu. Nie należy jej mylić z siłą poprzeczną  $T_x$ . Częstkowe pochodne równania (3.22) zapisać można w postaci (3.23) i (3.24):

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = X(x) \frac{d^2 T(t)}{dt^2} \quad (3.23)$$

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = T(t) \frac{d^4 X(x)}{dx^4} \quad (3.24)$$

Następnie cząstkowe pochodne funkcji  $y$  zostały wyrażone przez pochodne zwyczajne, podstawiając zależności (3.23) i (3.24) do równania (3.21):

$$X(x) \frac{d^2 T(t)}{dt^2} + \frac{EJ}{\bar{m}} T(t) \frac{d^4 X(x)}{dx^4} \quad (3.25)$$

stąd (3.26):

$$\frac{EJ}{\bar{m}} \frac{d^4 X(x)}{dx^4} = - \frac{d^2 T(t)}{dt^2} T(t) \quad (3.26)$$

Z przedstawionej zależności wynika, że lewa strona zależy tylko od odciętej  $x$ , a prawa tylko od czasu  $t$ . Można więc wyciągnąć wniosek, że zarówno lewa, jak i prawa część równości (3.26) ostatecznie nie zależy od zmiennych  $x$  oraz  $t$ , czyli że każda z nich jest równa stałej licznice, którą oznaczymy  $\omega^2$ . Wniosek ten wynika również z tego, że równość (3.26) zachodzi w każdym punkcie belki i w każdej chwili czasowej. W ten sposób zamiast jednego równania różniczkowego z cząstkowymi pochodnymi funkcji  $y(x, t)$  otrzymano dwa niezależne, zwyczajne równania różniczkowe jednorodne (3.27) i (3.28):

$$\frac{d^2 T(t)}{dt^2} + \omega^2 T(t) = 0 \quad (3.27)$$

$$\frac{d^4 X(x)}{dx^4} - \omega^2 \frac{\bar{m}}{EJ} X(x) = 0 \quad (3.28)$$

Równania te mają następujące rozwiązania:

- (3.27): (3.29)

$$T(t) = A \sin(\omega t + \lambda_0) \quad (3.29)$$

świadczące o tym, że rozpatrywany ruch jest ruchem drgającym o częstotliwości  $\omega$ ,

- (3.28): (3.30)

$$X(x) = C_1 \sin \alpha x + C_2 \cos \alpha x + C_3 \sinh \alpha x + C_4 \cosh \alpha x \quad (3.30)$$

opisujące formy drgań.

W równaniu (3.30) zostało wprowadzone oznaczenie (3.31):

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{\bar{m}\omega^2}{EJ}} \quad (3.31)$$

Stałe  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$ , i  $C_4$  określane są m.in. na podstawie warunków brzegowych, tj. w zależności od sposobu zamocowania belki.

Na podporze ( $x=0$ ) zarówno ugięcie belki  $y_x$  jak i kąt obrotu  $\psi_x$  są równe zeru, natomiast dla swobodnego końca belki ( $x=l$ ) moment zginający  $M_x$  oraz siła poprzeczna  $T_x$  są równe zeru:

$$x = 0, y_x = X(x) = 0, \psi_x = \frac{dX(x)}{dx} = 0 \quad (3.32)$$

$$x = l, M_x = -EJ \frac{d^2X(x)}{dx^2} = 0, T_x = -EJ \frac{dX^3(x)}{dx^3} = 0 \quad (3.33)$$

Po podstawieniu równania (3.30) do warunków (3.32) i (3.33) otrzymano zależność pomiędzy stałymi (3.34):

$$C_2 + C_4 = 0, C_1 + C_3 = 0 \quad (3.34)$$

które podstawione do rozwiązania (3.30) dadzą dla trzeciego i czwartego warunku (3.32) i (3.33) dwa równania jednorodne.

Z kolei przyrównanie do zera wyznacznika tych równań, jako warunku koniecznego i wystarczającego istnienia rozwiązania, doprowadzi do następującej zależności (3.35):

$$\cos \alpha l \cdot \cosh \alpha l = -1 \quad (3.35)$$

Pierwiastki tego równania można znaleźć np. drogą graficzną, sporządzając wykres funkcji  $\cos \alpha l$  oraz  $1 / \cosh \alpha l$ . Punkty przecięć tych wykresów dadzą następujące wartości  $\alpha$  (3.36):

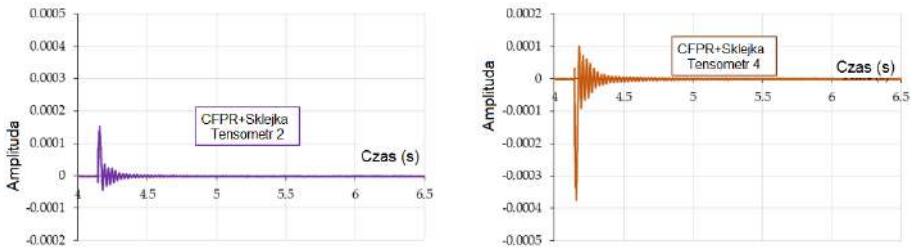
$$\alpha_1 = \frac{1.875}{l}, \alpha_2 = \frac{4.694}{l}, \alpha_3 = \frac{7.855}{l}, \text{ itd.} \quad (3.36)$$

Zależność między częstością drgań własnych a wielkością  $\alpha$  określić można wzorem (3.31).

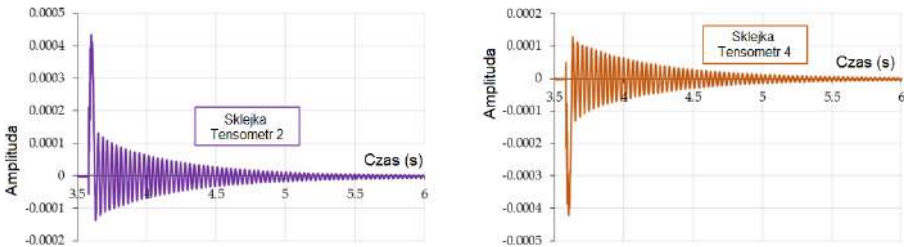
Obliczone na tej podstawie częstotliwości drgań omawianej belki, licząc od najniższej podstawowej, przedstawiają się następująco (3.37):

$$\omega_1 = \frac{3.516}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \omega_2 = \frac{22.034}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \omega_3 = \frac{61.701}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \text{ itd.} \quad (3.37)$$

Rysunki 3.25 i 3.26 przedstawiają przykłady przebiegów czasowych amplitudy wychylenia ze stanu równowagi badanych lameli.



Rys. 3.25. Przebiegi czasowe amplitudy odkształcenia lameli wzmocnionej CFRP [217]



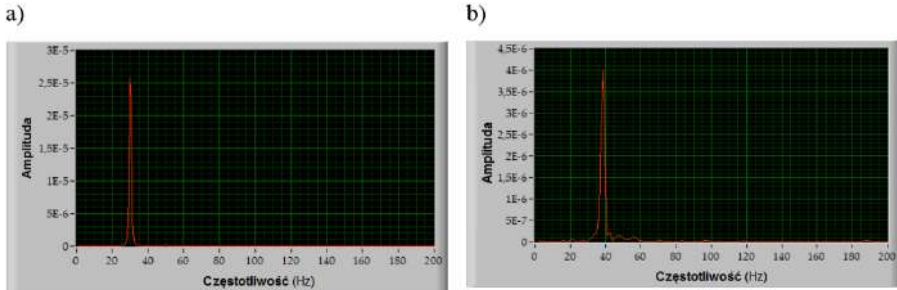
Rys. 3.26. Przebiegi czasowe amplitudy odkształcenia lameli ze sklejki [217]

Znając sygnał siły wymuszającej oraz odpowiedź układu w postaci przyspieszenia, dokonano analizy modalnej umożliwiającej wyznaczenie częstotliwości drgań własnych lameli (rys. 3.13). Wyznaczono początek pojedynczego uderzenia młotkiem modalnym. Jest on rozpoznany na sygnale siły, jako przekroczenie progu będącego pięciokrotnością maksymalnej wartości z pierwszych 100 próbek sygnału. Następnie wyodrębnianych zostaje 750 próbek [226]. Dla zastosowanej częstotliwości próbkowania 50 kHz okno pojedynczego uderzenia wynosi 15 ms.

Rysunek 3.27 przedstawia przykładowe widma wyodrębnione z całego sygnału z wykorzystaniem powyższych kryteriów.

Znając wartość pierwszej częstotliwości własnej lameli  $\omega_1$  oraz geometrię lameli możemy z zależności (3.37) wyznaczyć moduł sprężystości ( $E = \text{MoE}$ ). Wy-

znaczony za pomocą metody dynamicznej moduł sprężystości dla lameli wzmacnianych laminatem CFRP wyniósł  $MoE = 401 \text{ MPa}$ . Natomiast wartość modułu sprężystości dla lameli ze sklejki odnotowano jako wartość  $MoE = 2348 \text{ MPa}$ .



Rys. 3.27. Częstość drgań własnych belki wspornikowej: a) sklejka, b) CFRP+sklejka [217]

W przeprowadzonych badaniach dotyczących określenia modułu sprężystości nie zaobserwowano różnic istotnych statystycznie pod względem metody oceny. W badaniach dotyczących oznaczenia modułu sprężystości przy zginaniu metodą trzypunktową uzyskano wynik  $MOE = 415 \text{ MPa}$  dla lameli wzmacnianych laminatem CFRP i  $MoE = 2238 \text{ MPa}$  dla lameli ze sklejki.

### 3.2. Własności mechaniczne materiałów stosowanych w badaniach

Przedstawione w rozdziale 3.1 procedury określenia wybranych właściwości materiałów pozwoliły na wyznaczenie dokładnych wartości dla materiałów zastosowanych w przeprowadzonych badaniach.

W testach jako materiał obrabiany zastosowano cztery rodzaje materiałów drewnopochodnych: płytę Medium-Density Fibreboard (MDF), płytę wiórową, sklejkę oraz płytę High Pressure Laminate (HPL). Na rysunku 3.28 pokazano materiały obrabiane w trakcie badań.



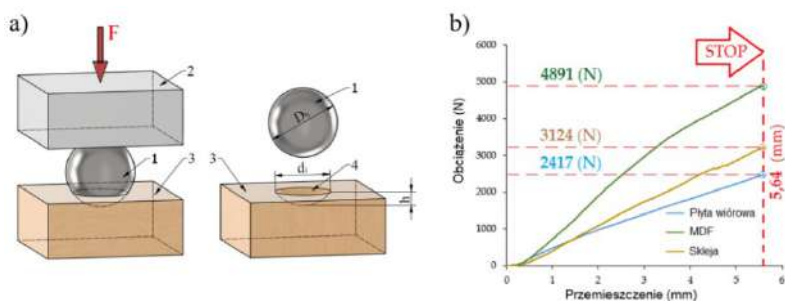
Rys. 3.28. Materiał obrabiany [159]

Pierwsze trzy materiały należą do grupy materiałów najczęściej stosowanych w przemyśle meblarskim. Natomiast HPL to specjalnie prasowane tworzywo

sztuczne, które dzięki dużej gęstości i twardości charakteryzuje się bardzo dużą odpornością na uszkodzenia. Płyta HPL wyróżnia się trwałą powłoką, odporną na blaknięcie i uszkodzenia mechaniczne. To sprawia, że znajduje szerokie spektrum zastosowania w branży wykończeniowej i meblarskiej.

Przed przystąpieniem do badań zasadniczych, wykonano pomiary wybranych własności mechanicznych i fizycznych obrabianych materiałów. Pomiar gęstości płyty HPL dokonano zgodnie z normą ISO 1183-1:2019 dla pozostałych materiałów zgodnie z normą EN 622-5. Właściwości mechaniczne dla HPL określono zgodnie z normą EN ISO 178. Dla pozostałych materiałów zgodnie z normą EN 310.

Wartość twardości Janki określono za pomocą kulki Janki o średnicy 11,28 mm według ASTM D 1037 (rys. 3.29). Obciążenie przykładano w sposób ciągły przez cały czas trwania badania, przy równomiernej prędkości ruchu ruchomej poprzeczki uniwersalnej maszyny wytrzymałościowej wynoszącej 5 mm/min. Jako miarę twardości rejestrowano maksymalne obciążenie potrzebne do osadzenia kulki do połowy jej średnicy.



Rys. 3.29. Pomiar twardości metodą Janki [159]

Wyniki przeprowadzonych badań w zakresie właściwości mechanicznych przedstawiono w tab. 3.4. Jak można zauważyć, zastosowane w badaniach materiały charakteryzują się dość znacznym zróżnicowaniem właściwości mechanicznych.

Tabela 3.4. Wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne

Parametr	Gęstość kg/m <sup>3</sup>	Wytrzymałość na zginanie MPa	Moduł sprężystości MPa	Twardość Janki N
Sklejka	650(32)	85(9)	5 600(261)	3 228(189)*
MDF	730(23)	38(4)	2 530(176)	4 932(245)*
HPL	1 470(29)	110(13)	9 250(349)	-
Płyta wiórowa	690(19)	12(3)	1 850(138)	2 367(153)*

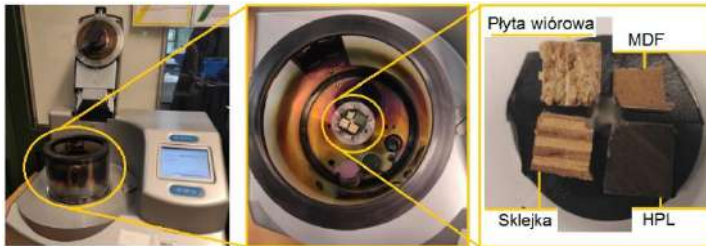
\* Wartości w nawiasach to odchylenie standardowe obszaru

Właściwości mechaniczne materiałów mają fundamentalne znaczenie dla zrozumienia zachowania elementów w procesach obróbki skrawaniem. Od wytrzymałości na rozciąganie po twardość i elastyczność, właściwości te odgrywają kluczową rolę w projektowaniu i inżynierii wielu produktów i konstrukcji.

Zastosowane w badaniach materiały obrabiane charakteryzują się wyraźnym zróżnicowaniem gęstości materiału na przekroju poprzecznym, co wynika z ich charakterystycznej wielowarstwowej struktury. W celu wizualizacji struktury i analizy składu chemicznego przeprowadzono analizę materiału obrabianego za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego TESCAN.

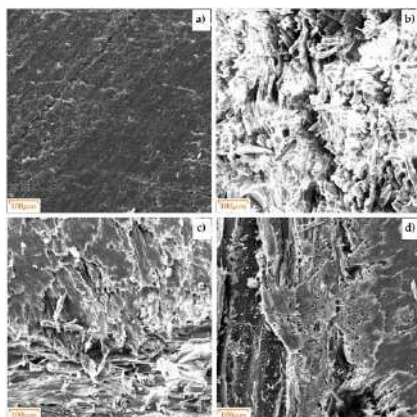
Przed przystąpieniem do pomiarów z zastosowaniem mikroskopu skaningowego konieczne było odpowiednie przygotowanie próbek. Z uwagi, że badane materiały należą do dielektryków, konieczne było nałożenie (napylenie) na nie cienkiej warstwy materiału przewodzącego prąd. Próbki materiałów obrabianych umieszczono na 15 minut w suszarce z wymuszonym obiegiem powietrza firmy Memmert w temperaturze 60°C w celu wyparowania użytego do oczyszczenia próbek acetonu oraz przygotowania próbek do procesu napyłania.

Następnie osuszone z acetonu próbki umieszczono w napylarce wysokopróżniowej Q150 w celu naniesienia na ich powierzchni cienkiej warstwy miedzi, która przyczynia się do poprawy przewodności elektrycznej (rys. 3.30) w trakcie badań na mikroskopie elektronowym. Próbki były napyłane miedzią przez 60 sekund, natężenie prądu podczas napyłania wynosiło 60 mA. Napyłone próbki umieszczono w skaningowym mikroskopie elektronowym z przystawką EDS firmy TESCAN i rozpoczęto pomiar jakościowy i ilościowy pierwiastków.



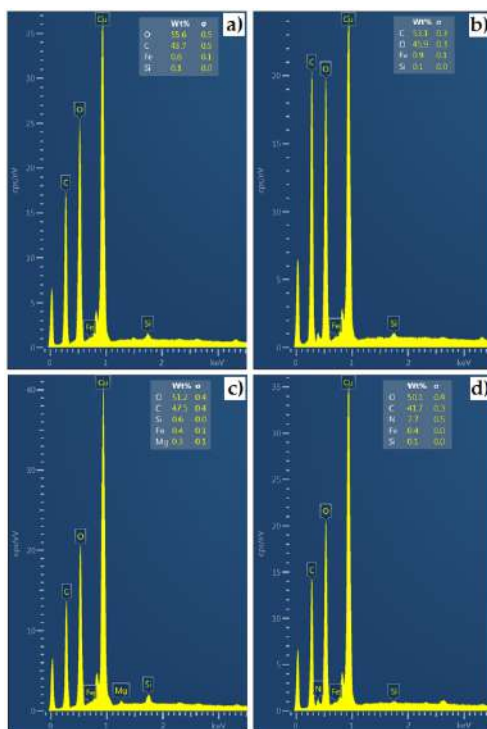
Rys. 3.30. Proces napyłania warstwy miedzi [159]

Struktura materiałów obrabianych różni się od siebie. Na rysunku 3.31 widać różne ułożenie struktury oraz różną gęstość co przekłada się między innymi na twardość i wytrzymałość materiału. Płyta HPL charakteryzuje się jednolitym ułożeniem warstw poprawiając właściwości wytrzymałościowe materiału. W przypadku sklejki można zauważyć warstwy o różnym stopniu gęstości. Płyta MDF ma strukturę o średniej gęstości. Płyta wiórowa ze względu na sposób powstania ma strukturę nieregularną.



Rys. 3.31. Materiał obrabiany SEM: a) HPL, b) MDF, c) płyta wiórowa, d) sklejka [159]

Po wykonanej analizie EDS (rys. 3.32) można zauważyć, że we wszystkich materiałach występują następujące pierwiastki: tlen, węgiel, żelazo i siarka. W przypadku płyty HPL zawartość procentowa węgla jest najwyższa w porównaniu do pozostałych materiałów i wynosi około 47,5%. Po dokonaniu analizy EDS w przypadku płyty HPL zauważono w składzie tego materiału dodatek magnezu.



Rys. 3.32. Materiał obrabiany: a) płyta wiórowa, b) MDF, c) HPL, d) sklejka [159]

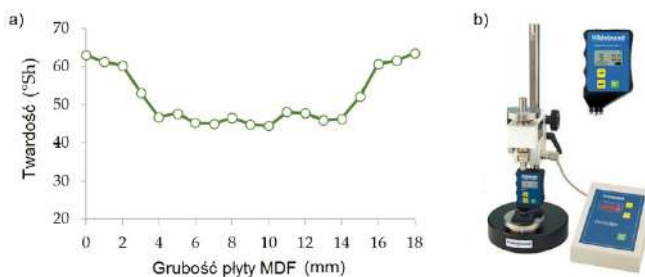
Aby dokładniej scharakteryzować płytę MDF, przeprowadzono laboratoryjny pomiar rozkładu jej lokalnej gęstości za pomocą tomografu rentgenowskiego Phoenix v|tome|x m.

Tomografy rentgenowskie pozwalają na uzyskanie obrazów tomograficznych badanego obiektu, a następnie przedstawiają jego obraz przestrzenny (3D) z wielu ujęć płaskich (2D) wykonanych w różnych położeniach. Obrazy tomograficzne zawierają informacje o położeniu i gęstości cech absorbujących w obiekcie. Jakakolwiek różnicę w materiale wewnątrz obiektu, zmianę jego gęstości można zobrazować i zmierzyć. Na rysunku 3.33 przedstawiono zdjęcie przekroju poprzecznego płyty MDF, na którym można zaobserwować wyraźne zróżnicowanie gęstości płyty. Największa gęstość i twardość występuje w warstwach zewnętrznych płyty (rys. 3.34) . Natomiast mniejsza gęstość i twardość występuje w warstwie wewnętrznej.



Rys. 3.33. Pomiar gęstości MDF na tomografie rentgenowskim Phoenix v|tome|x m [156]

Dodatkowo, dokonano pomiaru rozkład twardości obrabianego materiału za pomocą twardościomierza Shore'a w skali D (rys. 3.34). Jak można zaobserwować, rozkład twardości ściśle powiązany jest z profilem gęstości. Największa twardość występuje w warstwach zewnętrznych o grubości około 2,3 mm i wynosi 62 Sh w skali D. W miarę oddalania się od warstwy zewnętrznej twardość maleje osiągając na głębokości od 7 mm do 11 mm wartość 43 Sh w skali D.



Rys. 3.34. Pomiar twardości: a) profil twardości płyty MDF, b) twardościomierz Shore'a [156]

### 3.3. Podsumowanie

Wszystkie próbki badane w procesie zginania trzypunktowego uległy zniszczeniu w obszarach najbardziej oddalonych od osi obojętnej. W przypadku próbek niewzmocnionych zniszczenie było nagłe i objawiało się nagłym pęknięciem. W przypadku próbek sklejk wzmacnionych CFRP proces zniszczenia był poprzedzony stosunkowo powolną propagacją pęknięć. Podczas prób zginania nie zaobserwowano żadnego uszkodzenia połączenia klejowego pomiędzy płytą CFRP a sklejką. W przypadku próbek sklejk wzmacnionych CFRP zaobserwowano zarówno wzrost wytrzymałości na zginanie, jak i zmniejszenie wartości strzałki ugięcia. W przypadku sklejk wzmacnionych CFRP, gdzie próbka była poddana naprężeniom rozciągającym, wartość naprężenia rozciągającego zmniejszyła się szesnastokrotnie, a wartość naprężenia ściskającego zmniejszyła się ponad siedmiokrotnie w porównaniu do próbki sklejki niewzmocnionej. Na podstawie naprężeń występujących po stronie rozciąganej i ściskanej powierzchni próbki sklejki wzmacnionej CFRP podczas próby zginania wspornikowego stwierdzono, że wartość modułu wytrzymałości na zginanie (MoR) zmniejszyła się trzykrotnie, a wartość modułu sprężystości (MoE) zmniejszyła się ponad pięciokrotnie w porównaniu do próbki sklejk niewzmocnionej. Analiza dynamiczna pozwoliła określić, że częstotliwość drgań własnych próbki sklejk wzmacnionych CFRP wzrosła o około 33% w porównaniu z próbką sklejk niewzmocnionych. W przeprowadzonych badaniach mających na celu wyznaczenie modułu sprężystości (MoE) dwóch rodzajów badanych próbek nie zaobserwowano statystycznie istotnych różnic w zakresie metody ich wyznaczania.



## 4. WPLYW PARAMETRÓW SKRAWANIA NA PRZEBIEG PROCESU SKRAWANIA

### 4.1. Frezowanie

#### 4.1.1. Metodyka badań

Powszechnie wiadomo, że stan zużycia ostrza narzędzia skrawającego ma znaczący wpływ na dokładność obróbki i integralność powierzchni przedmiotu obrabianego w procesie skrawania. Ponadto nadmierne zużycie ostrza może prowadzić do pogorszenia jakości powierzchni przedmiotu obrabianego, a nawet do pęknięcia narzędzia [227].

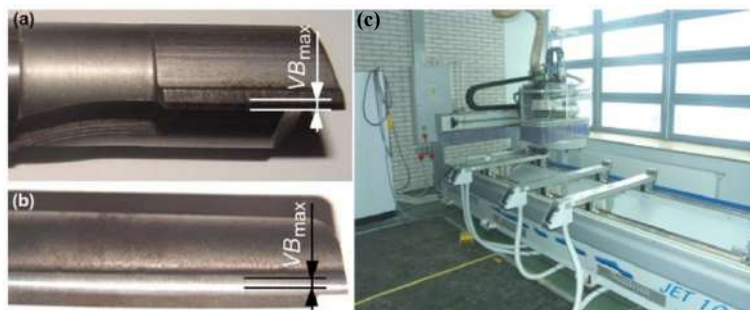
Aby zmniejszyć niekorzystny wpływ zużycia ostrza na obróbkę, narzędzie jest zwykle okresowo wymieniane w oparciu o doświadczenie operatora. Prowadzi to do mniejszego wykorzystania narzędzia i niższej wydajności produkcji. Według statystyk przestoje maszyny spowodowane wymianą narzędzia stanowią 20% całkowitego przestoju podczas procesu obróbki [228], a koszty narzędzia stanowią od 3 do 12% całkowitego kosztu wytwarzania [229].

Dokładny i niezawodny system monitorowania stanu narzędzia może zmniejszyć koszty o 10 – 40% poprzez skrócenie przestojów i maksymalizację trwałości ostrzy narzędzi skrawających [230]. Dlatego też niezwykle istotne jest zbadanie dokładniejszego i skuteczniejszego systemu monitorowania procesów skrawania w celu zmniejszenia kosztów wytwarzania oraz poprawy jakości i wydajności wytwarzania.

Materiał ostrza i parametry obróbki są głównymi warunkami decydującymi o jakości powierzchni płyty drewnopochodnej. Głównym celem tego etapu badań było określenie wpływu prędkości skrawania na trwałość ostrza narzędzia skrawającego. Analizowano zużycia freza z ostrzami z węgla spiekanego i freza ze stali szybko tnącej podczas obróbki płyty wiórowej surowej i płyty pokrytej laminatem. Ponadto, postanowiono określić wpływ podstawowych parametrów skrawania na wartości sygnałów sił.

Zastosowano analizę wariancji (ANOVA), aby określić istotność wpływu parametrów obróbki i zużycia ostrza na wartość współczynnika delaminacji  $A_{del}$  w przypadku obróbki płyty wiórowej laminowanej. Współczynnik delaminacji  $A_{del}$  jest zdefiniowany tutaj jako stosunek powierzchni rozwarstwienia  $mm^2$  do długości odcinka pomiarowego  $cm$ . Ten aspekt analizowano tylko dla płyty pokrytej laminatem. Do określenia trwałości ostrza narzędzia skrawającego przyjęto kryterium geometryczne, tj. maksymalne starcie na powierzchni przyłożenia ostrza  $VB_{max}$ .

W badaniach dotyczących procesu frezowania zastosowano frezy ze stali szybko tnącej o średnicy 14 mm (rys. 4.1a) i frezy z ostrzami z węgla spiekanego o średnicy 12 mm (rys. 4.1b).

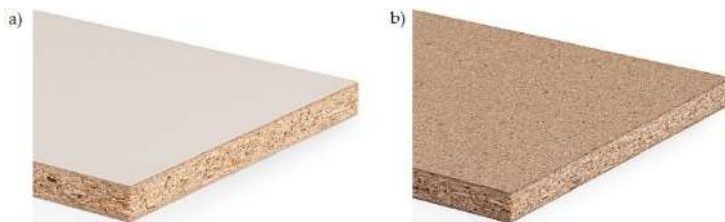


Rys. 4.1. Narzędzia skrawające (a, b) i centrum obróbki (c) [14]

Badania przeprowadzono na standardowym centrum obróbkowym CNC Buselato Jet 100 (rys. 4.1c). Wybrane właściwości fizyczne i mechaniczne typowych płyt wiórowych o grubości 18 mm (rys. 4.2), określone zgodnie z odpowiednimi normami, przedstawiono w tab 4.1.

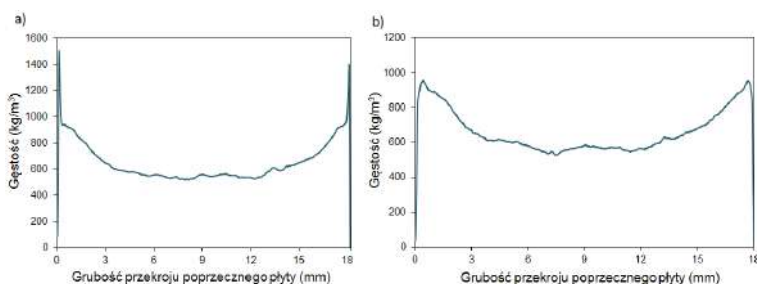
Tabela 4.1. Wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne sklejk

Material	Gęstość kg/m <sup>3</sup>	Wytrzymałość na odrywanie warstwy przypow- ierzchniowej N/mm <sup>2</sup>	Wytrzyma- łość na rozciąganie prostopadle N/mm <sup>2</sup>	Wyтры- małość na zginanie N/mm <sup>2</sup>	Moduł sprężystości przy zginaniu N/mm <sup>2</sup>
Płyta wió- rowa lami- nowana	670	1,3	0,43	16,39	2453
Płyta wiórowa surowa	650	0,8	0,35	13	1600
Metoda badania	EN 323 [231]	EN 311 [232]	EN 319 [233]	EN 310 [234]	EN 310 [234]



Rys. 4.2. Płyta wiórowa laminowana (a) i surowa płyta wiórowa (b)

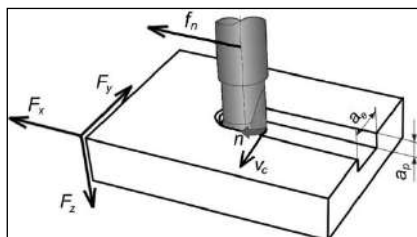
Płyta wiórowa laminowana charakteryzuje się wyraźnym zróżnicowaniem gęstości materiału na przekroju poprzecznym, co wynika z jej wielowarstwowej struktury. Aby dokładniej scharakteryzować materiał obrabiany przeprowadzono laboratoryjny pomiar jego lokalnej gęstości (rys. 4.3a).



Rys. 4.3. Średni profil gęstości dla: a) płyty wiórowej laminowanej i b) surowej płyty wiórowej

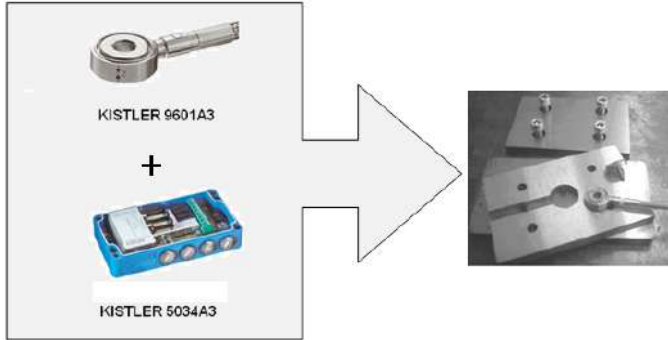
Podobnie jak to miało miejsce w przypadku płyty laminowanej przeprowadzono także badania gęstości surowej płyty wiórowej w przekroju poprzecznym (rys. 4.3b).

Jako kryterium zużycia przyjęto maksymalne zużycie powierzchni przyłożenia ostrza  $VB_{max}$ . Zgodnie z normą ISO 8688-1:1996 [235], w przypadku ostrzy ze stali szybko tnącej, jako wartość graniczną tego wskaźnika zużycia przyjęto wartość  $VB_{max} = 1$  mm. Dla węgla spiekane przyjęto wartość  $VB_{max} = 0,2$  mm. Przy określeniu wpływu podstawowych parametrów skrawania (prędkość skrawania, posuw) na wartości sygnałów składowych siły występujących w obróbce, tj.  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  (rys. 4.4) przyjęto poniższy rozkład składowych siły.



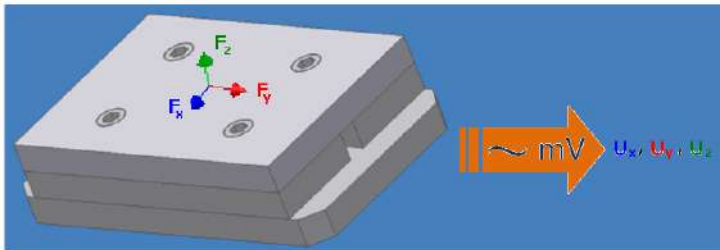
Rys. 4.4. Rozkład składowych siły przy frezowaniu [143]

W przeprowadzonych eksperymentach zastosowano czujnik piezoelektryczny typu Kistler 9601A3 oraz przedwzmacniacz ładunku 5034A3 do pomiaru składowych siły. Czujnik zabudowano wg konfiguracji „płyta pomiarowa” (rys. 4.5).



Rys. 4.5. Platforma pomiarowa wraz z zainstalowanym czujnikiem siły skrawania

Chcąc dokładnie określić zależność pomiędzy siłą działającą na układ pomiarowy (wejście) a sygnałem w postaci napięcia uzyskanym na wyjściu z układu (rys. 4.6), postanowiono wyznaczyć charakterystykę statyczną zbudowanego układu do pomiaru siły skrawania.



Rys. 4.6. Zależność pomiędzy siłą na wejściu a sygnałem pochodzącym z czujnika na wyjściu

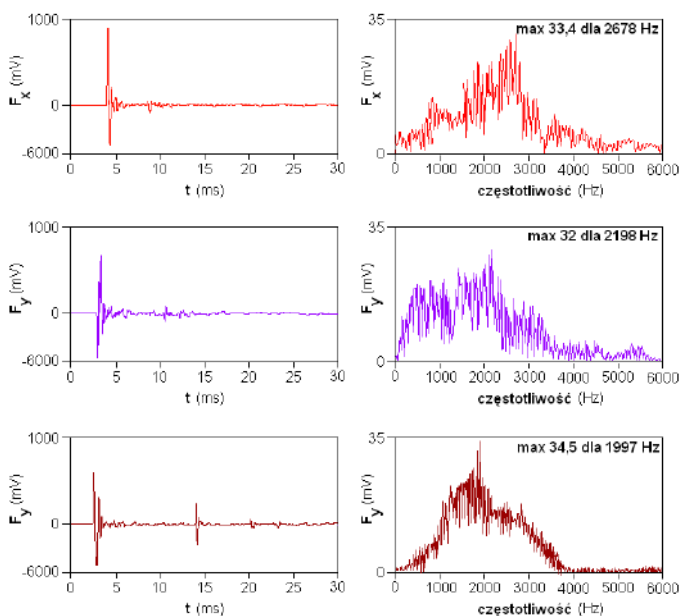
Do celów analizy i prezentacji wyników badań sygnały z czujnika mogą być przeliczane na jednostki siły w układzie SI wg zależności (4.1-4.3) [60]:

$$F_z = \frac{U_{zz}}{15} \quad (4.1)$$

$$F_x = \frac{U_{xx}}{16} \quad (4.2)$$

$$F_y = \frac{U_{yy}}{9} \quad (4.3)$$

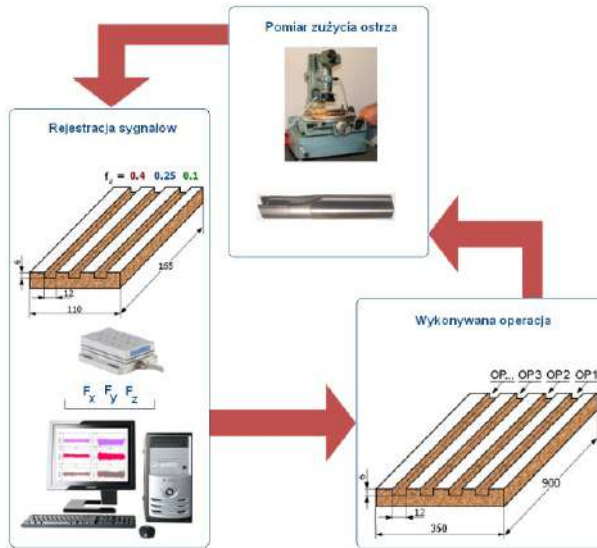
Dokładność przedstawionego układu do pomiaru siły skrawania zależy także od charakterystyk amplitudowo-częstotliwościowych. Badanie charakterystyki dynamicznej platformy pomiarowej wraz z zainstalowanym w nim czujnikiem przeprowadzono po uprzednim zamontowaniu go na obrabiarce CNC. Następnie uderzono w układ pomiarowy, w wyniku czego otrzymano czasowe przebiegi sygnałów. Widma otrzymanych sygnałów (rys. 4.7) odpowiadają w przybliżeniu charakterystykam amplitudowo-częstotliwościowym układu pomiarowego. Jak widać, pierwsza częstotliwość własna drgań kołowych występuje powyżej częstotliwości 2 kHz. W praktyce przemysłowej zalecane jest, aby częstość drgań własnych układu pomiarowego była trzykrotnie wyższa od najwyższej częstotliwości występującej podczas frezowania.



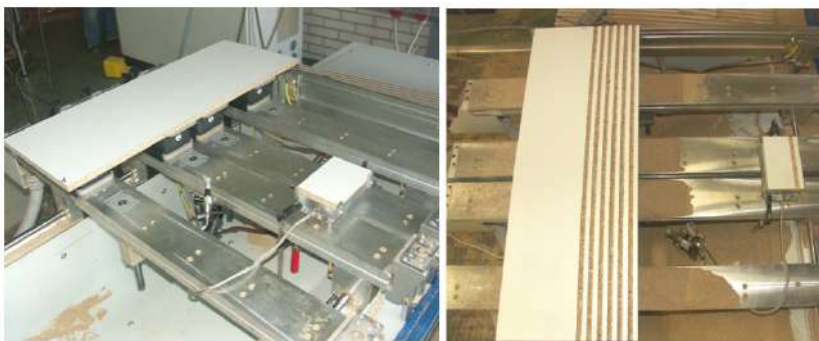
Rys. 4.7. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa układu do pomiaru sił

Wartości parametrów skrawania odpowiadały typowej obróbce w prowadzonej warunkach przemysłowych wykonywanej z prędkościami skrawania odpowiadającymi oczekiwanym okresom trwałości narzędzia. Badania trwałości ostrzy freza ze stali szybko tnącej wykonywane były na płycie wiórowej laminowanej z głębokością skrawania  $a_p = 6$  mm i szerokością frezowania  $a_e = 14$  mm. Wykonywano próby dla pięciu wartości prędkości obrotowych freza  $n$ : 6000, 9000, 12000, 15000, 18000 obr/min. Dla każdej wartości prędkości obrotowej wykonywano trzy próby trwałościowe. Wartości wskaźnika zużycia ostrza mierzono za pomocą mikroskopu laboratoryjnego, a wartości składowych siły skrawania rejestrowano na platformie pomiarowej z przyjętymi trzema wartościami posuwu na ostrze.

W ramach każdej próby trwałościowej, przy posuwie na ostrze wynoszącym 0,25 mm/ostrze, realizowano identyczną operację – powtarzaną wielokrotnie (rys. 4.8 i 4.9), aż do momentu uzyskania przyjętego kryterium zużycia ostrza narzędzia skrawającego. Po każdej operacji w ramach danej próby trwałościowej dokonywano pomiaru wartości wskaźnika zużycia ostrza, a następnie rejestrowano przebiegi sygnałów sił na platformie pomiarowej z trzema przyjętymi wartościami posuwu na ostrze (0,1, 0,25, 0,4 mm/ostrze).



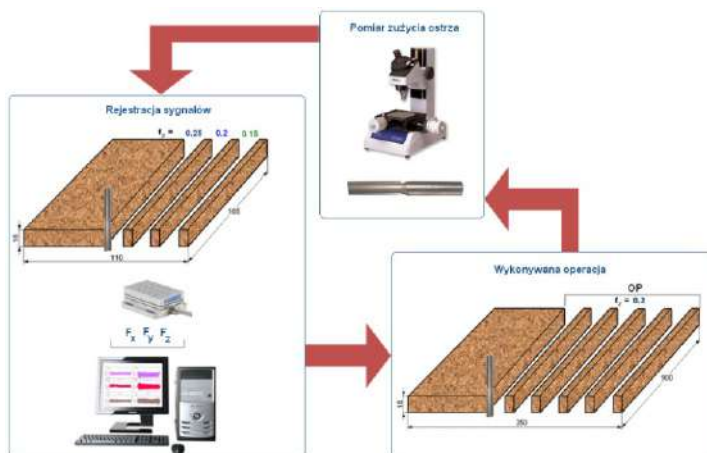
Rys. 4.8. Schemat realizacji próby trwałościowej przeprowadzanej na płycie pokrytej laminatem



Rys. 4.9. Wykonywana operacja i metodyka rejestracji sygnałów składowych siły skrawania

W ramach badań prowadzonych na surowej płycie wiórowej również wykonywano pięć prób trwałościowych ostrzy narzędzi skrawających, wykonanych

z węgla spiekane. Podczas każdej próby trwałościowej, wykonywano identyczną operację, powtarzaną wielokrotnie, do momentu uzyskania przyjętej wartości wskaźnika zużycia ostrza (rys. 4.10).



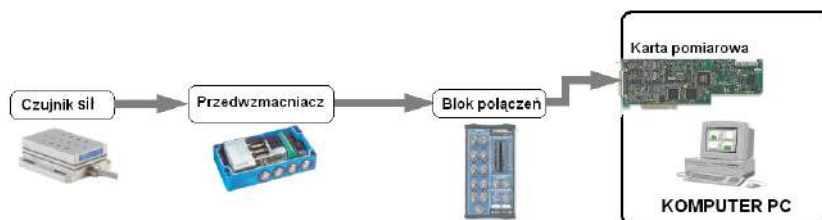
Rys. 4.10. Schemat realizacji próby trwałościowej przeprowadzanej na surowej płycie wiórowej

W trakcie prób stosowano stałą wartość posuwu na ostrze  $f_z = 0,20$  mm, stałą głębokość skrawania  $a_p = 18$  mm, ale inną dla każdej próby wartość prędkości skrawania odpowiadającą przyjętym wartościom prędkości obrotowej  $n$ . Po każdej próbie, jak w przypadku płyty laminowanej, dokonywano pomiaru zużycia ostrza, a następnie przeprowadzano rejestrację sygnałów sił.

Pomiar i rejestracja sygnałów składowych siły skrawania prowadzone były dla parametrów skrawania przyjętych w próbach trwałościowych oraz dodatkowo dla dwóch wartości posuwu na ostrze (0,15 i 0,25 mm/ostrze).

Rejestracja sygnałów sił wykonywana była również dla każdego nowego narzędzia we wszystkich próbach trwałościowych zgodnie z przedstawioną powyżej metodyką.

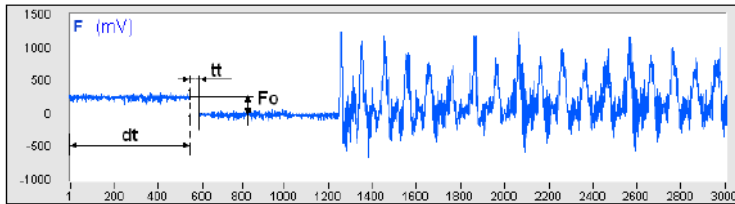
Sygnały sił skrawania poprzez przedwzmacniacz ładunkowy przesyłano do przetwornika analogowo-cyfrowego NI PCI-6034 zainstalowanego w komputerze osobistym i rejestrowano z częstotliwością próbkowania 50 kHz (rys. 4.11).



Rys. 4.11. Tor pomiarowy

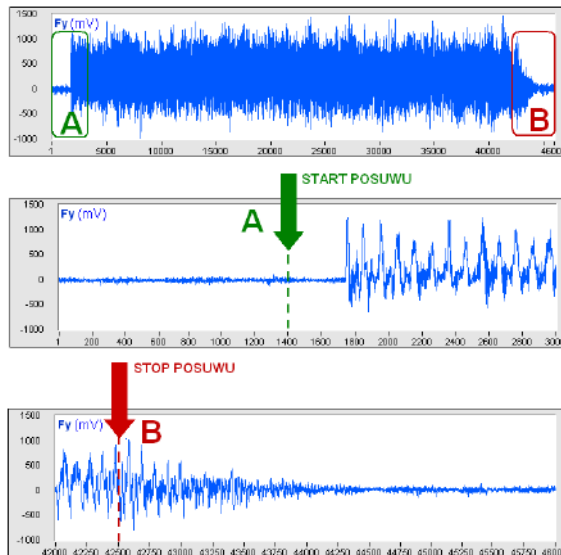
Do analizy zarejestrowanych wyników badań przygotowano własny program komputerowy (w języku programowania LabView) umożliwiający, w wybranych odcinakach czasu, wyznaczenie wartości przyjętych miar zarejestrowanych sygnałów składowych siły skrawania. Jako miarę sygnałów postanowiono wyznaczyć wartość średniokwadratową (RMS) sygnałów obu składowych,  $F_x$  i  $F_y$ .

Jednakże z uwagi na występujące zjawisko „dryftu” sygnałów względem wartości zero konieczne było tarowanie sygnału. Za wartość odniesienia przyjmuje się sygnał otrzymany po czasie  $dt$  od startu posuwu roboczego. Tarowanie trwa krótką chwilę  $tt$ . Przez cały czas tarowania, każda nowa wartość sygnału, wyższa od dotychczas zanotowanej, jest traktowana jako nowa wartość odniesienia.



Rys. 4.12. Tarowanie sygnału

Następnie, z chwilą przekroczenia przez sygnał siły  $F_0$  założonej wartości oznaczającej początek skrawania  $F_0$  (rys. 4.12) następuje wyznaczanie wartości miary sygnałów. Przy czym, brana jest pod uwagę wartość średnia z zabiegu po czasie 0,1 sekundy od chwili przekroczenia przez sygnał wartości początkowej  $F_0$  (rys. 4.13).



Rys. 4.13. Sposób wyznaczania wartości miar sygnałów składowych siły skrawania

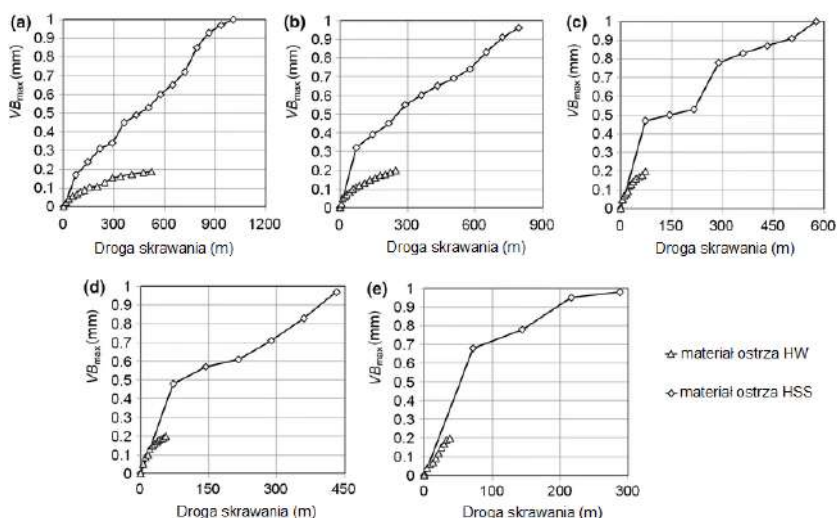
Sygnaly „start – stop” pomiaru (kiedy należy rozpocząć wyznaczanie miar, a kiedy zakończyć) podano w postaci liczby próbek w opisach plików (nagłówkach). Przykładowy opis tak przygotowanego pliku przedstawiono na rys. 4.14. Jako miary sygnałów postanowiono zastosować: wartość skuteczną (RMS) sygnału siły  $F_x$  i  $F_y$ .

Opis pliku	Liczba pomiarów:
1400 42500	45999

Rys. 4.14. Sposób opisu pliku

### 4.1.2. Ocena zużycia ostrza narzędzia skrawającego

Analizę statystyczną wyników z wykorzystaniem wielowymiarowej analizy wariancji przeprowadzono za pomocą programu STATISTICA. Wielowymiarowa analiza wariancji pozwala na sprawdzenie istotności wpływu kilku zmiennych niezależnych na zmienną zależną. Ponadto analiza wielowymiarowa umożliwia uwzględnienie w modelu statystycznym efektu synergicznego iloczynu wielu zmiennych. Biorąc pod uwagę przyjęty poziom istotności  $p = 0,05$ , wyznacza się istotność statystyczną poszczególnych grup zmiennych oraz zmiennych indywidualnych.



Rys. 4.15. Zmiana zużycia ostrza w funkcji drogi skrawania dla  $f_z = 0,25$  mm/ostrze i: a)  $n = 6000$  obr/min, b)  $n = 9000$  obr/min, c)  $n = 12\ 000$  obr/min, d)  $n = 15\ 000$  obr/min, e)  $n = 18\ 000$  obr/min [14]

Zaobserwowano istotny wpływ prędkości skrawania na trwałość ostrza (rys. 4.15). Wraz ze zwiększaniem wartości prędkości skrawania następowało skrócenie

okresu trwałości ostrza. Frez wykonany ze stali szybko tnącej pracujący z prędkością obrotową 18000 obr/min po przebyciu drogi skrawania wynoszącej około 37 m osiągnął założoną wartość zużycia powierzchni przyłożenia  $VB_{\max} = 1$  mm, a dopuszczalne zużycie ostrza freza pracującego przy prędkości obrotowej 6000 obr/min zostało osiągnięte po przebyciu około 523 m.

Założona wartość wskaźnika zużycia ostrza  $VB_{\max}$  dla freza z węgliku spiekanego była mniejsza niż w przypadku narzędzia ze stali szybko tnącej, ale droga skrawania niezbędna do osiągnięcia wskaźnika zużycia ostrza  $VB_{\max} = 0,2$  mm była większa. Ponadto w początkowym okresie eksploatacji narzędzia wraz ze wzrostem prędkości skrawania obserwowano szybki wzrost zużycia ostrza. W przypadku najniższej prędkości obrotowej  $n = 6000$  obr/min maksymalną wartość zużycia ostrza osiągnięto po przebyciu drogi skrawania 1000 m. Droga skrawania dla założonej wartości wskaźnika zużycia ostrza freza z węgliku spiekanego przy prędkości wynoszącej 18000 obr/min wynosiła 290 m.

Rozpatrując obróbkę przy najwyższej wartości prędkości obrotowej, droga skrawania ostrza freza z węgliku spiekanego dla osiągnięcia założonej wartości  $VB_{\max}$  była około ośmiokrotnie większa niż w przypadku freza ze stali szybko tnącej. Jednocześnie założona wartość przyjętego wskaźnika zużycia ostrza z węgliku spiekanego była pięciokrotnie mniejsza w porównaniu z frezem ze stali szybko tnącej.

Jak stwierdzili Porankiewicz i in. [236], zużycie ostrzy ze stali szybko tnącej w procesie skrawania materiałów drewnopochodnych jest intensywniejsze od zużycia ostrzy z węgliku spiekanego. Zastosowanie narzędzi z ostrzami z węgliku spiekanego mogłoby dać lepsze rezultaty, jednak występują duże przypadkowe wykruszenia krawędzi skrawającej znacznie obniżając jego wydajność [237]. Plastov [238] stwierdził, że jakość frezowania płyt wiórowych laminowanych maleje wraz ze wzrostem zużycia ostrza.

Zastosowana wielowymiarowa analiza wariancji (ANOVA) pozwala sprawdzić istotność wpływu kilku zmiennych niezależnych na zmienną zależną. Wiadomo, że ANOVA jest szczególnie przydatna do określania wpływu parametrów procesu na analizowaną zmienną [239]. Ponadto umożliwia ona uwzględnienie synergicznego efektu wpływu wielu zmiennych w modelu statystycznym. Biorąc pod uwagę przyjęty poziom istotności  $p = 0.05$ , istotność statystyczną poszczególnych grup zmiennych i zmiennych indywidualnych wyznaczono za pomocą programu Statistica. Opisano istotność wpływu dwóch kontrolowanych parametrów  $f_z$  i  $v_c$  na zmianę wartości sił występujących w procesie frezowania płyt wiórowych.

Zmiana zużycia ostrza w trakcie skrawania jest procesem ciągłym, dlatego w analizie przyjęto następujące zakresy zmian zużycia ostrza narzędzia ze stali szybko tnącej:  $VB1 = 0-0,04$  mm,  $VB2 = 0,405-0,7$  mm i  $VB3 = 0,705-1$  mm. W przypadku freza z węgliku spiekanego przyjęto następujące zakresy zmian zużycia ostrza:  $VB1 = 0-0,05$  mm,  $VB2 = 0,055-0,1$  mm,  $VB3 = 0,105-0,15$  mm i  $VB4 = 0,155-0,2$  mm.

#### 4. WPLYW PARAMETRÓW SKRAWANIA NA PRZEBIEG PROCESU SKRAWANIA

Wyniki analizy dla obu materiałów frezów (tab. 4.2 i 4.3) pozwalają na odrzucenie, na poziomie istotności  $p < 0,001$ , hipotezy o braku wpływu parametrów  $VB_{max}$  i  $v_c$  na wartość sygnału siły  $F_x$ . Zaobserwowano występowanie statystycznie istotnych interakcji pomiędzy analizowanymi czynnikami: interakcji pomiędzy wartościami sygnałów siły a iloczynami czynników  $VB_{max}$  i  $f_z$  (przy  $p = 0,005$ ) oraz  $VB_{max}$  i  $v_c$  (przy  $p < 0,001$ ). Podczas obróbki przy użyciu narzędzia z ostrzami z węgla spiekanego zaobserwowano statystycznie istotne interakcje między parametrami  $VB_{max}$  i  $f_z$  (przy  $p = 0,027$ ) oraz  $VB_{max}$  i  $v_c$  (przy  $p = 0,042$ ).

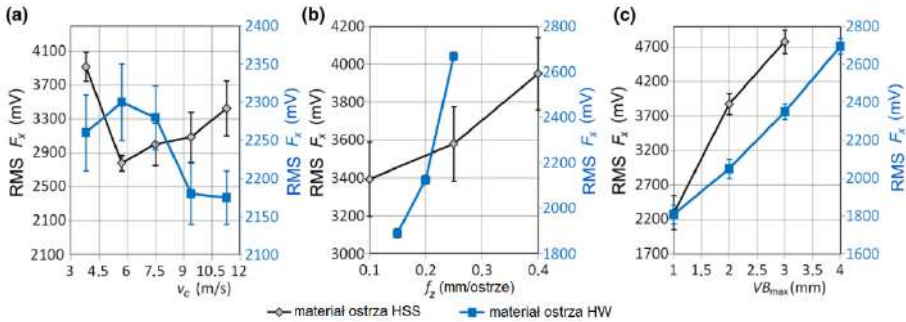
Tabela 4.2. Znaczenie wpływu parametrów skrawania i zużycia narzędzi ze stali szybkotnącej na wartość sygnałów składowych siły  $F_x$  i  $F_y$

Zmienne	Składowa siły $F_x$		Składowa siły $F_y$	
	Wartość p	Znaczenie	Wartość p	Znaczenie
$f_z$	0,001	Istotne	0,004	Nieistotne
$VB_{max}$	0,001	Istotne	0,001	Istotne
$v_c$	0,001	Istotne	0,001	Istotne
$f_z \cdot VB_{max}$	0,005	Istotne	0,135	Nieistotne
$f_z \cdot v_c$	0,656	Nieistotne	0,013	Nieistotne
$VB_{max} \cdot v_c$	0,001	Istotne	0,001	Istotne
$f_z \cdot VB_{max} \cdot v_c$	0,997	Nieistotne	0,886	Nieistotne

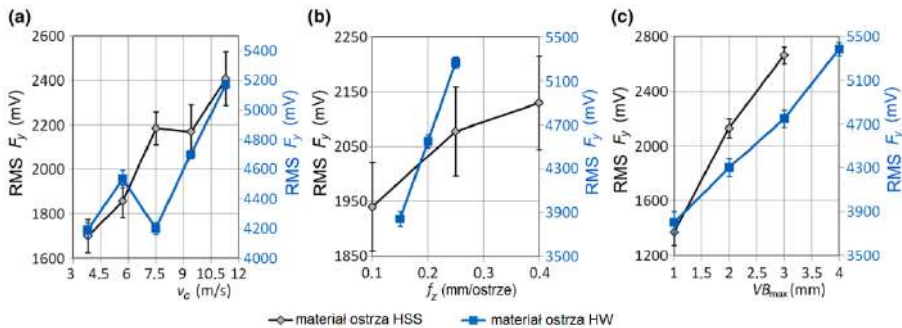
Tabela 4.3. Znaczenie wpływu parametrów skrawania i zużycia narzędzi z węgla spiekanego na wartość sygnałów składowych siły  $F_x$  i  $F_y$

Zmienne	Składowa siły $F_x$		Składowa siły $F_y$	
	Wartość p	Znaczenie	Wartość p	Znaczenie
$f_z$	0,001	Istotne	0,001	Istotne
$VB_{max}$	0,001	Istotne	0,001	Istotne
$v_c$	0,001	Istotne	0,001	Istotne
$f_z \cdot VB_{max}$	0,027	Nieistotne	0,096	Nieistotne
$f_z \cdot v_c$	0,001	Istotne	0,001	Istotne
$VB_{max} \cdot v_c$	0,042	Nieistotne	0,014	Nieistotne
$f_z \cdot VB_{max} \cdot v_c$	0,006	Nieistotne	0,276	Nieistotne

Występowała silna korelacja pomiędzy wartością sygnału siły  $F_y$  a wartościami parametrów  $VB_{max}$  i  $v_c$  przy  $p < 0,001$  a wartością posuwu  $f_z$  na poziomie istotności  $p = 0,004$ . Dwuczynnikowe formuły  $f_z \cdot v_c$  i  $VB_{max} \cdot v_c$  wniósł istotne informacje predykcyjne do analizy wariancji na poziomie istotności odpowiednio  $p = 0,013$  i  $p < 0,001$ . Wpływ posuwu na ostrze  $f_z$  i zużycia  $VB_{max}$  na wartość średniokwadratową sygnałów  $F_x$  i  $F_z$  jest wyraźny w zakresie wartości tych parametrów zastosowanych w badaniu, tj. wzrost wartości tych parametrów skutkował wzrostem wartości średniokwadratowych sygnałów  $F_x$  (rys. 4.16) i  $F_y$  (rys. 4.17).



Rys. 4.16. Wpływ parametrów skrawania a) prędkości skrawania  $v_c$  i b) posuwu na ostrze  $f_z$  oraz c) zużycia ostrza na wartość średniokwadratową (RMS) sygnałów siły  $F_x$  [14]



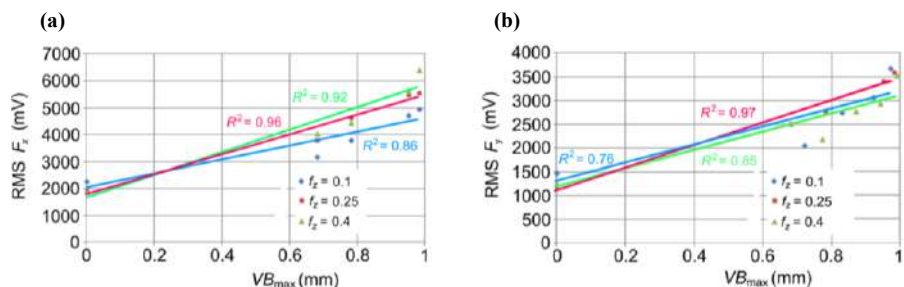
Rys. 4.17. Wpływ parametrów skrawania a) prędkości skrawania  $v_c$  i b) posuwu na ostrze  $f_z$  oraz c) zużycia ostrza na wartość średniokwadratową (RMS) sygnałów siły  $F_y$  [14]

Gaitonde i in. [131] stwierdzili, że do skrawania materiału potrzebna jest mniejsza siła skrawania, co skutkuje minimalną delaminacją. Palmqvist i in. [240] opisali bardzo istotny wpływ zmian siły skrawania podczas obróbki rotacyjnej. Co więcej, według Kowaluka i in. [241] podstawowym parametrem, który pomaga skutecznie diagnozować operację frezowania, jest siła normalna do kierunku posuwu.

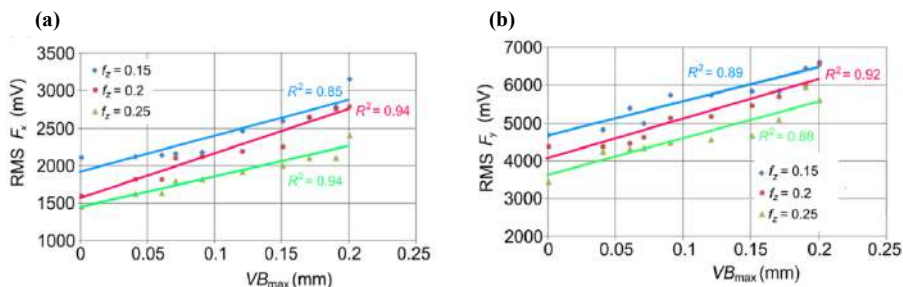
Dla freza, którego ostrza zostały wykonane ze stali szybko tnącej, w zakresie maksymalnego zużycia  $VB_0 - 0,4$  mm, nie zaobserwowano wpływu zużycia ostrza

na wartość sygnałów siły  $F_x$  i  $F_y$  (rys. 4.18a i 4.19a). Przy zużyciu powyżej wartości 0,4 mm zaobserwowano wpływ zużycia ostrza na wartość obu analizowanych sygnałów siły.

Podczas obróbki narzędziem z węgla spiekane go zaobserwowano wpływ posuwu na wartość siły skrawania (rys. 4.18b i 4.19b). Podobne zależności zaobserwowano dla wszystkich analizowanych prędkości skrawania. Największy wzrost amplitudy sygnału związany ze wzrostem zużycia powierzchni przyłożenia ostrza zaobserwowano dla składowej siły  $F_y$ .



Rys. 4.18. Zależność średniej kwadratowej (RMS) sygnału siły  $F_x$  od zużycia ostrza przy  $v_c = 13,9$  m/s dla narzędzia z ostrzami: a) ze stali szybko tnącej i b) z węgla spiekane go [14]



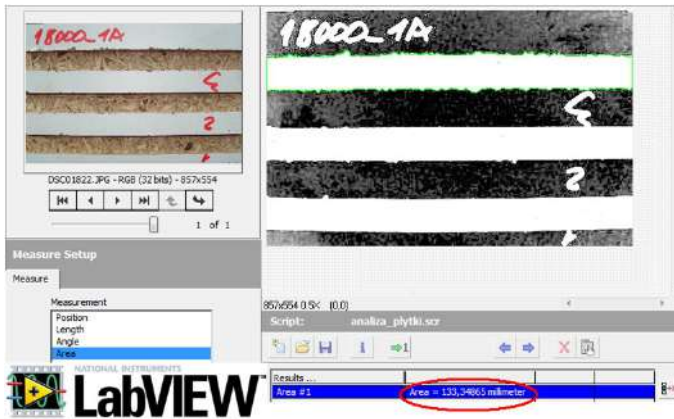
Rys. 4.19. Zależność średniej kwadratowej (RMS) sygnału siły  $F_y$  od zużycia ostrza przy  $v_c = 13,9$  m/s dla narzędzia z ostrzami: a) ze stali szybko tnącej i b) z węgla spiekane go [14]

### 4.1.3. Ocena jakości powierzchni obrobionej

W następnym etapie analizy otrzymanych wyników, chcąc określić wpływ zużycia ostrza, posuwu i prędkości skrawania na jakość powierzchni obrobionej, postanowiono dokonać analizy jakości powierzchni przedmiotu obrobionego.

Mając do dyspozycji materiał badawczy w postaci obrazów cyfrowych powierzchni obrobionej, uzyskanych w trakcie rejestracji sygnałów sił, przeprowadzono cyfrową analizę powierzchni obrobionej. Zdjęcia w formie cyfrowej przesłano do komputera, a następnie poddano je obróbce przy pomocy aplikacji Vision Assistant w środowisku LabView.

W celu określenia jakości powierzchni obrobionej postanowiono przyjęć wskaźnik  $A_{del}$  na długości pomiarowej  $L_p$  równej 165 mm (rys. 4.20).



Rys. 4.20. Analiza obrazu w środowisku LabView

Dla celów analizy jakości obróbki określano wskaźnik  $A_{del}$  zdefiniowany równaniem (4.4):

$$A_{del} = \frac{S}{L_p} \quad (4.4)$$

gdzie:  $S$  – pole powierzchni wyrwań laminatu  $\text{mm}^2$ ,  $L_p$  – długość próbki pomiarowej  $\text{cm}$ .

W tabeli 4.4 zaprezentowano przykładowe, uzyskane w trakcie badań, przebiegi sygnałów sił ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) wraz z odpowiadającym im stanem zużycia narzędzia skrawającego i jakością powierzchni obrobionej. Porównania dokonano dla ostrza nowego gdzie  $VB_{max} = 0,01$  mm i stępionego o wartości  $VB_{max} = 1$  mm w wybranej próbie trwałościowej.

W tabeli 4.5 zaprezentowano przykładowe, uzyskane w trakcie badań, przebiegi sygnałów sił ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) wraz z odpowiadającym im stanem zużycia narzędzia skrawającego. Porównania dokonano dla ostrza nowego gdzie  $VB_{max} = 0$  mm i stępionego o wartości  $VB_{max} = 0,2$  mm w wybranej próbie trwałościowej.

#### 4. WPŁYW PARAMETRÓW SKRAWANIA NA PRZEBIEG PROCESU SKRAWANIA

Tabela 4.4. Przebiegi sygnałów sił ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) wraz z odpowiadającym im stanem zużycia narzędzia skrawającego oraz fragmentem obrabianego przedmiotu (dla narzędzia nowego i stępionego)

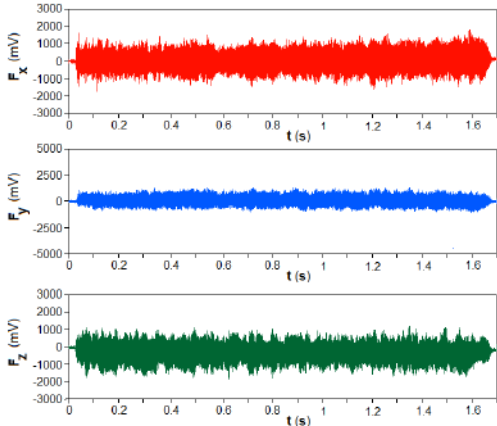

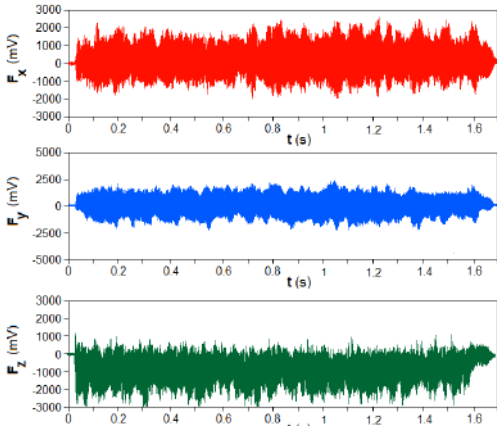
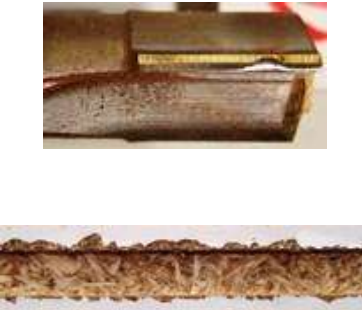
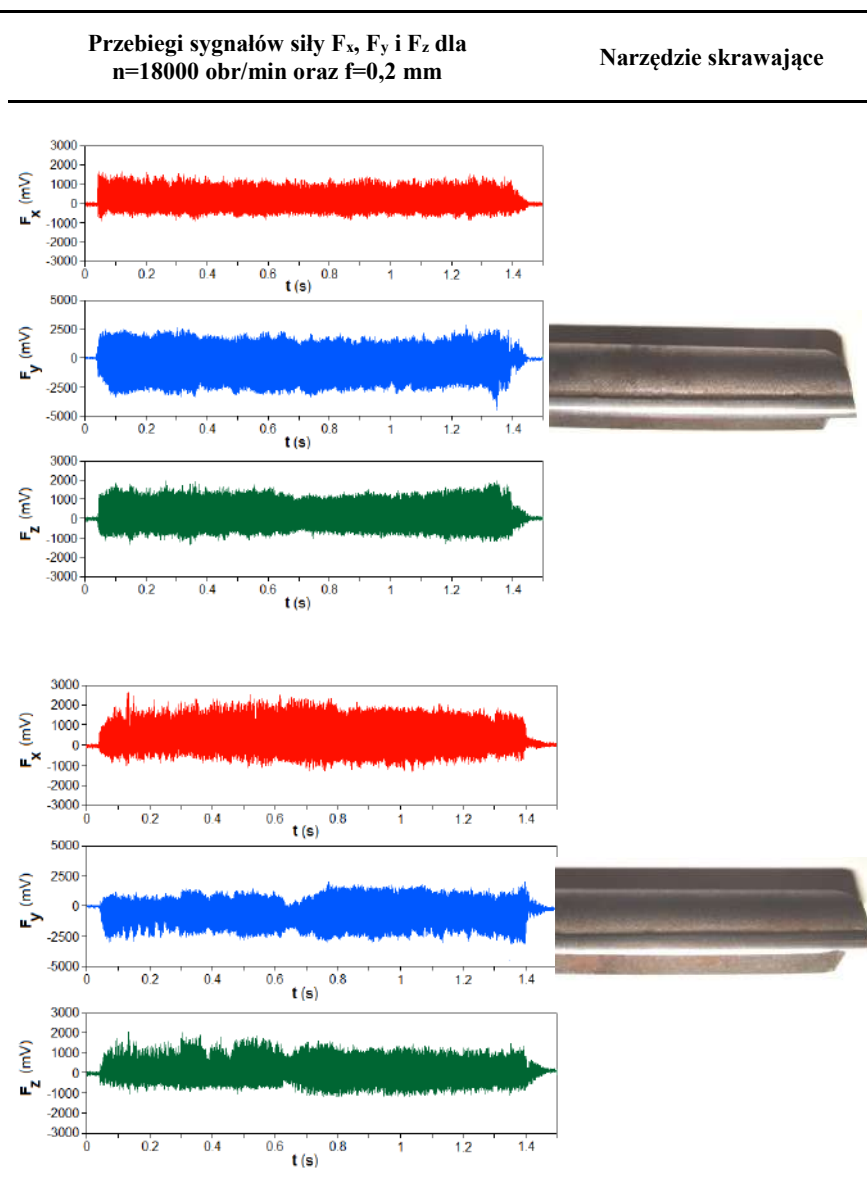
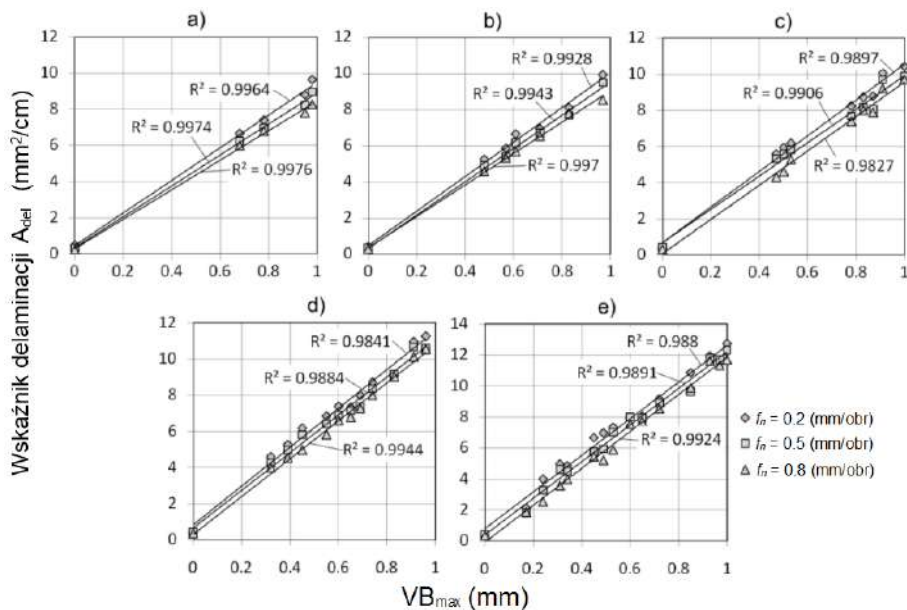
Przebiegi sygnałów siły $F_x$ , $F_y$ i $F_z$ dla $n=12000$ obr/min oraz $f=0,25$ mm	Narzędzie skrawające i obrabiany przedmiot
	
	

Tabela 4.5. Przebiegi sygnałów sił ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) wraz z odpowiadającym im stanem zużycia narzędzia skrawającego

Rysunek 4.21 przedstawia zależność między współczynnikiem rozwarstwienia  $A_{del}$  a wskaźnikiem zużycia ostrza  $VB_{max}$  dla wszystkich prędkości stosowanych w badaniach. Obserwuje się nie tylko wyraźną zależność między zużyciem

ostrza  $VB_{max}$ , a współczynnikiem delaminacji  $A_{del}$ . Zaobserwowano pływ prędkości skrawania, im mniejsza wartość prędkości tym większy obszar delaminacji, co prowadzi do wzrostu wartości współczynnika  $A_{del}$ . Było to szczególnie widoczne przy większych wartościach zużycia ostrza. Wyniki te są zgodne z wynikami Mercy i in. [242]. Do tego samego wniosku doszli Davim i in. [134], którzy stwierdzili, że dzięki zastosowaniu wyższej prędkości skrawania możliwe jest zmniejszenie tendencji do delaminacji podczas frezowania.



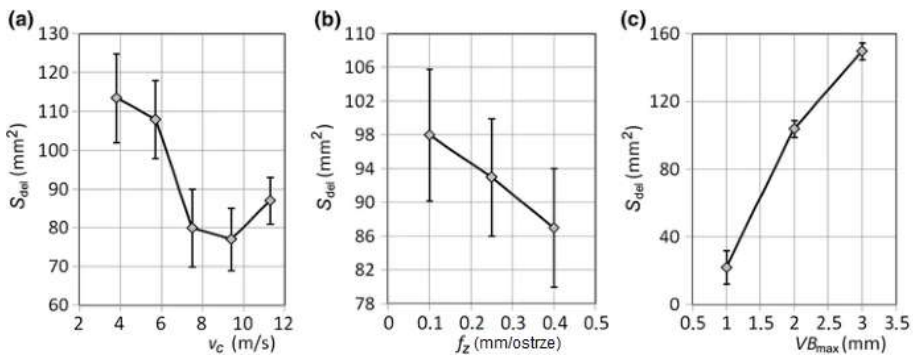
Rys. 4.21. Zależność współczynnika delaminacji  $A_{del}$  od zużycia narzędzia ze stali szybko tnącej [14]

Podobne wyniki uzyskali Gaitonde i in. [243], stwierdzili, że jakość powierzchni płyty MDF obrobionej podczas frezowania można zoptymalizować przez stosowanie niższej wartości prędkości posuwu i wyższej wartości prędkości skrawania. W przypadku posuwu na ostrze  $f_z$  nie zaobserwowano wyraźnego wpływu na wzrost zjawiska delaminacji krawędzi płyty wiórowej. Wniosek ten nie zgadza się z wynikami badań przeprowadzonych przez Davim i in. [244], którzy badali zmianę chropowatości powierzchni podczas frezowania płyt MDF w zakresie prędkości posuwu od 0,5 do 5 m/min. Autorzy ci stwierdzili, że chropowatość powierzchni wzrasta wraz ze wzrostem wartości posuwu. Nie oznacza to jednak, że wpływ parametru  $f_z$  jest pomijalny, ponieważ w przeprowadzonych badaniach wartość  $f_z$  była ograniczona do określonego zakresu.

Wyniki analizy wariancji (rys. 4.22) potwierdziły, że wartość zużycia ostrza freza ze stali szybko tnącej ma istotny wpływ na proces delaminacji. Podobne wnioski można wyciągnąć w odniesieniu do wpływu wartości prędkości skrawania

na wartość pola powierzchni delaminacji  $S_{del}$  (przy  $p < 0.001$ ). Davim i in. [135] stwierdzili, że wraz ze wzrostem wartości prędkości skrawania zmniejsza się współczynnik rozwarstwienia. Gaitonde i in. [243] zaobserwowali, że skrawanie z dużą prędkością skrawania odgrywa główną rolę w redukcji uszkodzeń podczas frezowania kompozytów wzmocnianych włóknem węglowym. W kolejnych badaniach Davim i in. [112] wskazują również, że delaminacja wzrasta wraz z posuwem i prędkością skrawania dla obu materiałów narzędziowych, HSS i węglika spiekane.

Podsumowując, zmiana zarówno wartości prędkości skrawania, jak i wskaźnika zużycia ostrza ma statystycznie istotny wpływ na pole powierzchni delaminacji. Jednakże zmiana posuwu na ostrze nie ma istotnego wpływu ( $p = 0,092$ ). Nie zaobserwowano statystycznie istotnego synergicznego efektu analizowanych parametrów na wartość powierzchni rozwarstwienia.



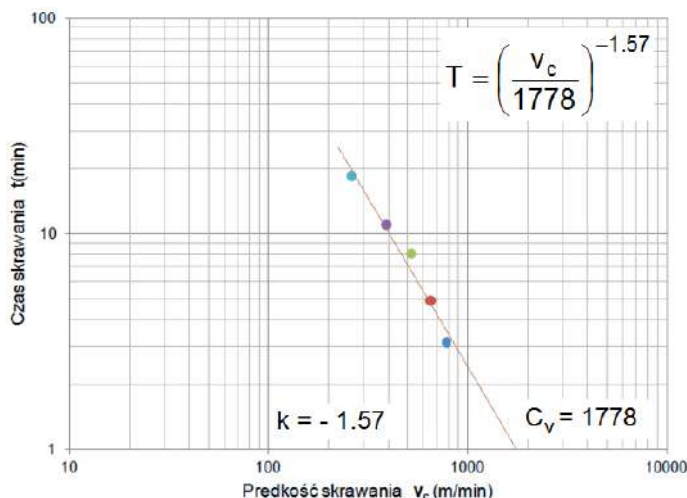
Rys. 4.22. Wpływ: a) prędkości skrawania  $v_c$  i b) posuwu na ostrze  $f_z$  oraz c) wskaźnika zużycia ostrza na wartość powierzchni delaminacji przy narzędziu ze stali szybkoobrotowej [14]

#### 4.1.4. Ekonomiczna i wydajnościowa obróbka płyt drewnopochodnych

W pracy (rozdział 1.5) wyprowadzono wzory matematyczne w celu określenia ekonomicznej prędkości skrawania i prędkości skrawania największej wydajności, zakładając, że znane są składowe czasowe i kosztowe operacji.

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań, w postaci zależności prędkości skrawania od okresu trwałości ostrza skrawającego, postanowiono przeprowadzić analizę pod kątem określenia prędkości skrawania największej wydajności  $v_q$  i ekonomicznej prędkości skrawania  $v_e$ . Wartości prędkości ekonomicznej i największej wydajności określono zarówno dla narzędzia z ostrzami ze stali szybkoobrotowej jak i z węglika spiekane.

Na wykresie podwójnie logarytmicznym (rys. 4.23) przedstawiono wpływ prędkości skrawania na trwałość ostrza ze stali szybkoobrotowej dla pięciu prób trwałościowych T1 – T5 prowadzonych z różnymi (przyjętymi) prędkościami skrawania.



Rys. 4.23. Wpływ prędkości skrawania na okres trwałość ostrza ze stali szybko tnącej

Następnie określono wykładnik potęgowy  $k$  oraz stałą  $C_v$  w równaniu Taylora. W wyniku czego otrzymano równanie w postaci (4.5):

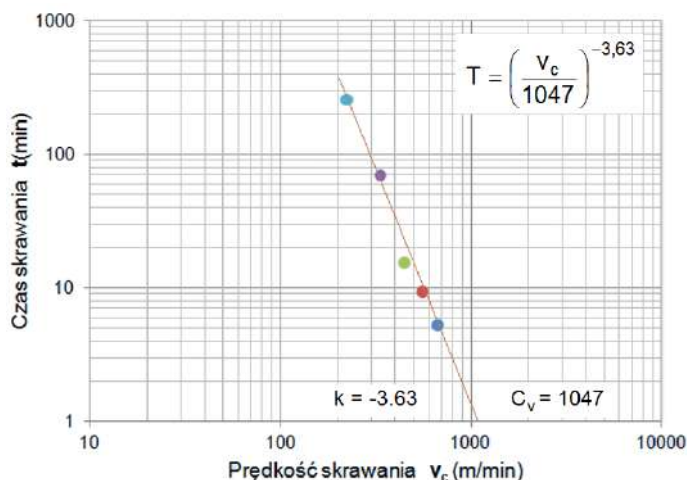
$$T = \left( \frac{v_c}{1778} \right)^{-1.57} \quad (4.5)$$

Wyniki prób trwałościowych dla freza z ostrzami z węgla spiekane również naniesiono na wykres podwójnie logarymiczny (rys. 4.24), a następnie określono zależność Taylora (4.6).

$$T = \left( \frac{v_c}{1047} \right)^{-3.63} \quad (4.6)$$

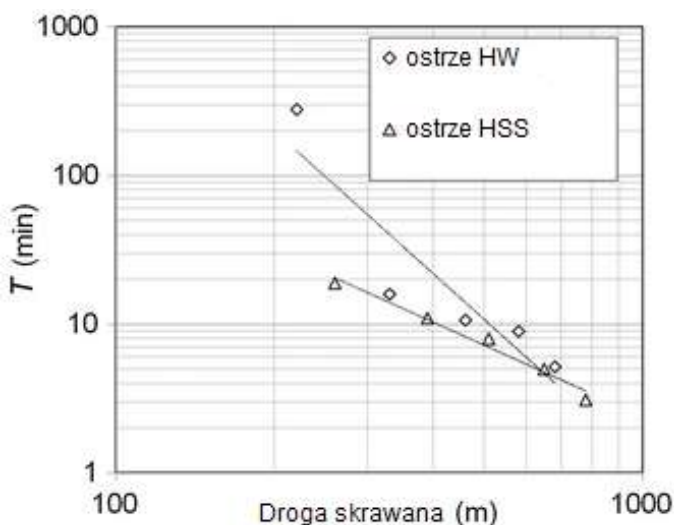
Na podstawie linii aproksymacji określono wartości parametrów w równaniu Taylora, które są niezbędne do oceny wartości prędkości skrawania  $v_q$  (1.27) i  $v_c$  (1.33):

- narzędzie ze stali szybko tnącej:  $k = -1.57$ ,  $C_v = 1778$ ,
- narzędzie z węgla spiekane:  $k = -3.63$ ,  $C_v = 1047$ .



Rys. 4.24. Wpływ prędkości skrawania na okres trwałość ostrza z węgla spiekanego

Na rysunku 4.25 w podwójnie logarytmicznym układzie współrzędnych przedstawiono wpływ prędkości skrawania na trwałość ostrza w pięciu testach trwałości przeprowadzonych przy różnych prędkościach skrawania dla obydwu badanych materiałów ostrza.



Rys. 4.25. Wpływ prędkości skrawania na trwałość ostrza

Aby określić prędkość skrawania odpowiadającą maksymalnej wydajności  $v_q$ , trwałość ostrza odpowiadającą najwyższej wydajności  $T_q$ , ekonomiczną prędkość skrawania  $v_e$  i ekonomiczną trwałość ostrza  $T_e$  (tab. 4.6), konieczne było przyjęcie wartości stałych w równaniach (1.27) i (1.33):  $t_z$ ,  $K_O$ ,  $K_N$ . Wartości

parametrów przyjęto następująco:  $t_z = 2$  min,  $K_O = 35$  EUR/h,  $K_N = 12$  EUR. Zgodnie z równaniem (1.33), istotnym parametrem, który wpłynął na wartość ekonomicznej prędkości skrawania  $v_e$ , jest stosunek kosztów  $K_N$  do  $K_O$ . Tak więc, jeśli koszt maszyny do obróbki tworzy drewnopochodnych, konserwacji i kosztów ogólnych  $K_O$  maleje, to ekonomiczna trwałość ostrza wzrasta.

Tabela 4.6. Parametry efektywnej i ekonomicznej obróbki tworzyw drewnopochodnych

Material narzędziowy	Model do obróbki drewna	Prędkość skrawania $v_c$ m/s	Prędkość obrotowa n obr/min	Żywotność narzędzia $T_q, T_e$ min
Stal szybko tnąca	Wydajnościowy		>18 000	$T_q = 1,14$
	Ekonomiczny	5,92	11 309	$T_e = 12,54$
Węglik spiekany	Wydajnościowy		>18 000	$T_q = 5,26$
	Ekonomiczny	4,7	9123	$T_e = 110,46$

## 4.2. Wiercenie

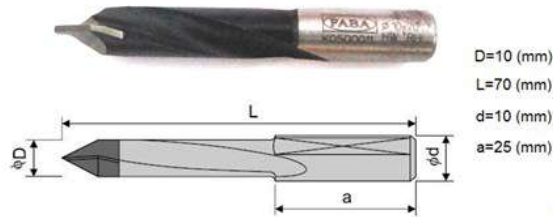
### 4.2.1. Metodyka badań

Optymalizacja procesu skrawania polega na odpowiednim doborze głównych parametrów obróbki, takich jak głębokość skrawania, posuw i prędkość skrawania, w celu zapewnienia odpowiedniej dokładności obróbki przy minimalnych kosztach i odpowiedniej wydajności procesu. W pracy przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych zużycia wiertel z ostrzami z węglików spiekanych podczas obróbki płyt wiórowych pokrytych laminatem.

Do oceny jakości powierzchni płyty wiórowej przyjęto maksymalny promień i obszar delaminacji wokół otworu przelotowego w płycie wiórowej laminowej. Parametry te są określane niezależnie na wejściu i wyjściu otworu. Przeprowadzono analizę statystyczną wyników z wykorzystaniem wieloczynnikowej analizy wariancji (ANOVA). Zaproponowano również nową metodę określania ekonomicznej prędkości skrawania oraz prędkości skrawania odpowiadającej maksymalnej wydajności.

Badania przeprowadzono z wykorzystaniem standardowego centrum obróbczego CNC Busellato Jet 100. Materiałem obrabianym była płyta wiórowa laminowana (rys. 4.2a). Eksperymenty przeprowadzono z użyciem wiertel z ostrzami

z węgla spiekane (rys. 4.26) gatunku K20, średnicy 10 mm, kącie pochylenia linii śrubowej  $20^\circ$  i kącie wierzchołkowym  $60^\circ$ .



Rys. 4.26. Narzędzie skrawające zastosowane w procesie wiercenia

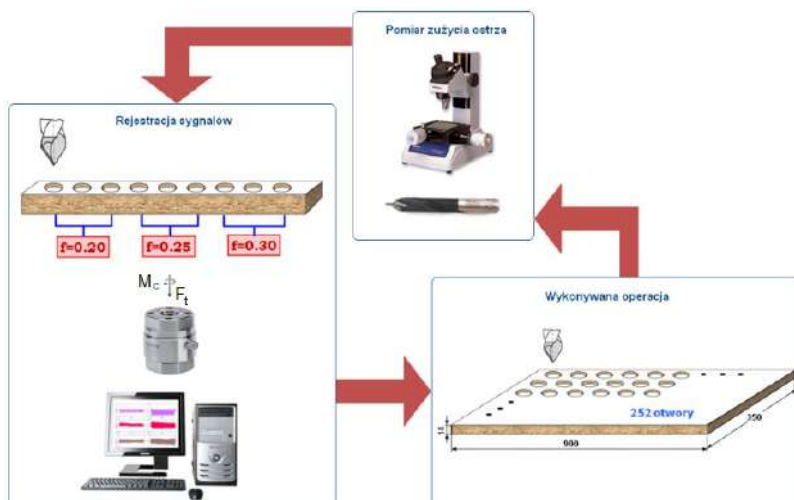
Jako kryterium zużycia przyjęto maksymalne zużycie powierzchni przyłożenia ostrza  $VB_{\max}$ . Wartość graniczną tego wskaźnika przyjęto  $VB_{\max} = 0,2$  mm.

Do pomiaru siły osiowej  $F_t$  i momentu skrawania  $M_c$  zastosowano piezoelektryczny czujnik firmy Kistler 9601A3 wraz ze wzmacniaczem ładunku 5073A211 (rys. 4.27). Tor pomiarowy do rejestracji wyżej wymienionych sygnałów przedstawiono na rys. 4.11.



Rys. 4.27. Czujnik siły osiowej ( $F_t$ ) i momentu skrawania ( $M_c$ ) typu 9345B2 wraz z przedwzmacniaczem ładunku 5073A211

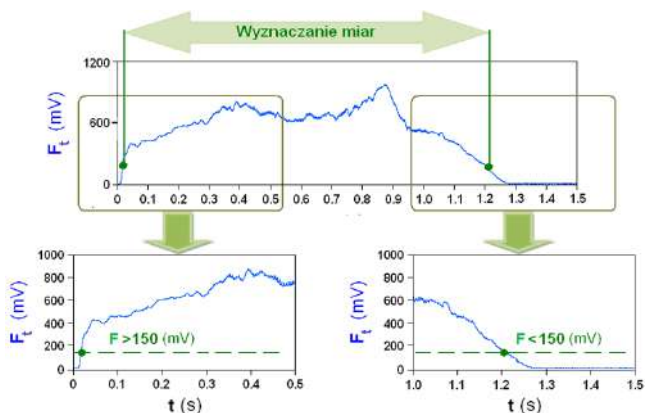
Dla każdej z przyjętych w badaniach wartości posuwu (0,2, 0,25, 0,3 mm/obr) przeprowadzono sześć testów dla pięciu prędkości obrotowych narzędzia  $n$  (12000, 10000, 8000, 6000, 4000 obr/min). Próby trwałościowe dla prędkości obrotowej wynoszącej 12000 obr/min wykonywano dwukrotnie dla każdej wartości posuwu. Testy powtórzono trzykrotnie, a zatem łączna liczba testów wynosiła 18. Testy przeprowadzono do osiągnięcia maksymalnej dopuszczalnej wartości wskaźnika zużycia ostrza. Na każdą próbę trwałościową narzędzia składało się wykonanie powtarzalnej operacji, w ramach której każdorazowo wykonywano 252 otwory. Po każdej zakończonej operacji następował pomiar zużycia ostrza oraz rejestracja sygnału siły osiowej  $F_t$ , a także momentu skrawania  $M_c$  przeprowadzana dla parametrów skrawania jak w próbie trwałościowej, ale również dodatkowo dla dwóch przyjętych w planie badań wartości posuwu (rys. 4.28).



Rys. 4.28. Schemat realizacji próby trwałościowej

Do analizy uzyskanych zarejestrowanych sygnałów przygotowano program komputerowy (w języku programowania LabView), który umożliwia przetwarzanie danych w wybranym zakresie czasowym. Program opiera się na automatycznym wyznaczaniu wartości siły osiowej i momentu skrawania w określonym zakresie czasowym sygnału.

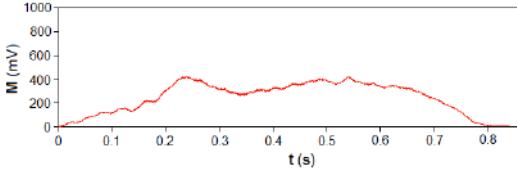

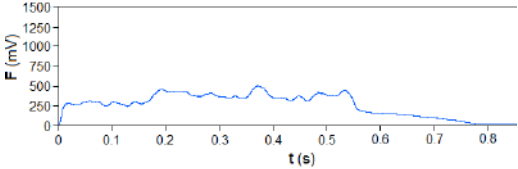

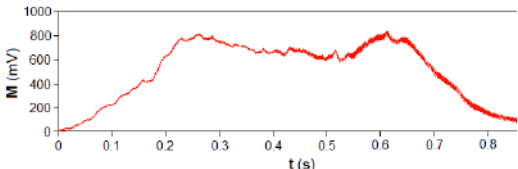

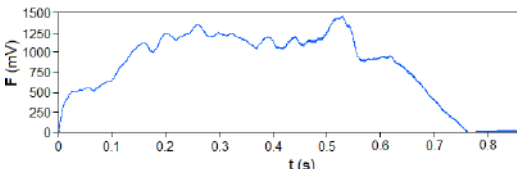

W miarę jak wartość sygnału siły osiowej przekracza przyjęty próg, wyznaczone są wybrane miary sygnału siły osiowej  $F_t$  i momentu skrawania  $M_c$ , tj. wartość średnia, wartość skuteczna (RMS). Parametry te są oceniane do momentu, aż wartość sygnału siły osiowej spadnie poniżej 150 mV. Taka procedura zapewnia powtarzalność zakresu czasowego sygnału, na podstawie którego wyznaczane są wartości parametrów. Uproszczony schemat wyznaczania miar sygnałów przedstawiono na rys. 4.29.

Rys. 4.29. Sposób wyznaczania miar sygnału siły  $F_t$  i momentu skrawania  $M_c$

W badaniach procesu wiercenia, oprócz przyjętego wskaźnika zużycia ostrza zdecydowano się na zastosowanie kolejnego wskaźnika zużycia, tj. długości cięciwy naroży  $VBK_E$  (rys. 1.28). Wartości wskaźników mierzono za pomocą mikroskopu Mitutoyo TM wyposażonym w kamerę cyfrową o rozdzielczości 600 dpi, co umożliwiała archiwizację obrazu na komputerze osobistym.

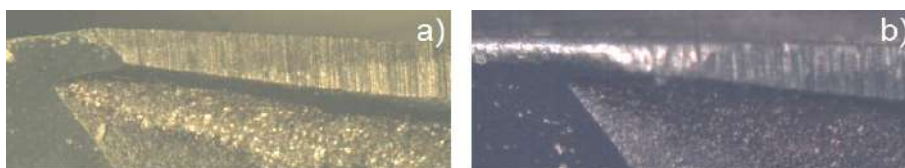
W tabeli 4.7 zaprezentowano przykładowe, uzyskane w trakcie badań, przebiegi sygnałów siły osiowej i momentu skrawania wraz z odpowiadającym im stanem zużycia ostrza narzędzia skrawającego i jakością powierzchni obrobionej. Porównania dokonano dla ostrza nowego, gdzie  $VB_{max} = 0,02$  mm i stępnego o wartości  $VB_{max} = 0,2$  mm w wybranej próbie trwałościowej.

Tabela 4.7. Przebiegi sygnałów wraz z odpowiadającym im stanem zużycia narzędzia skrawającego oraz fragment przedmiotu obrobionego

Przebiegi sygnałów siły osiowej i momentu skrawania $n = 10000$ (obr/min) oraz $f = 0,2$ (mm)	Narzędzie skrawające i wykonany otwór
	
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="759 878 841 904">Wejście</div> <div data-bbox="942 878 1024 904">Wyjście</div> </div> 
	
	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="759 1261 841 1287">Wejście</div> <div data-bbox="942 1261 1024 1287">Wyjście</div> </div> 

### 4.2.2. Ocena zużycia ostrza narzędzia skrawającego

Porównanie przeprowadzono dla różnych etapów zużycia ostrza, od nowego, gdzie  $VB_{max} = 0$  mm (rys. 4.30a), do stępionego ostrza o  $VB_{max} = 0,2$  mm (rys. 4.30b). Wzrost zużycia ostrza powoduje około dwukrotny wzrost momentu skrawania i prawie trzykrotny wzrost maksymalnej siły osiowej. Nowe wiertło charakteryzuje się niższymi wartościami siły i momentem skrawania w całym zakresie warunków pracy [154]. Jednakże Feito i in. [245] stwierdzili, że nowe narzędzie wykazało znikomy wpływ na siłę osiową.



Rys. 4.30. Widok stanu ostrza: a) nowe i b) stępienie

Wzrost wartości wskaźnika zużycia  $VB_{max}$  powoduje zwiększenie obszaru delaminacji w strefie uszkodzenia (tab. 4.8).

Tabela 4.8. Wpływ wartości wskaźnika zużycia ostrza na obszar delaminacji

Pole delaminacji	$VB_{max}$ mm				
	0	0,05	0,1	0,15	0,2
Delaminacja na wejściu					
Delaminacja na wyjściu					

Jak można zaobserwować uszkodzenia laminatu na wyjściu narzędzia z otworu były większe niż na wejściu do otworu. Podobne wyniki uzyskali również Feito i in. [245] oraz Hocheng i Tsao [246]. Gaitonde i in. [247] stwierdzili, że delaminacja jest liniowo zależna od prędkości posuwu i zaobserwowali, że skrawanie z dużą prędkością odgrywa główną rolę w redukcji uszkodzeń na wejściu otworu. Według wyników Gaitonde i in. [131] delaminacja jest uważana za główne

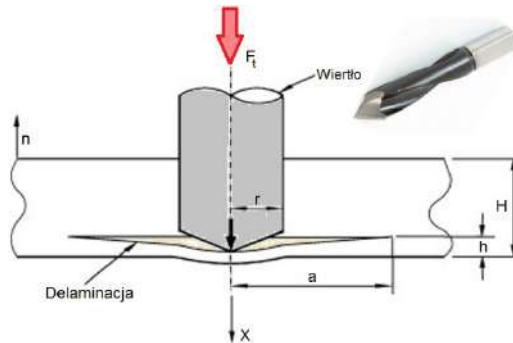
uszkodzenia występujące w wierceniu materiałów drewnopochodnych laminowanych. Analizuje się ją z wykorzystaniem klasycznej teorii zginania płyt i liniowej mechaniki pęknięcia sprężystego. Autorzy opisali możliwe mechanizmy powodujące delaminację zarówno na wyjściu, jak i na wejściu wiertła, a także przewidywali krytyczne wartości siły osiowej i momentu skrawania prowadzące do wystąpienia zjawiska delaminacji.

Podczas propagacji delaminacji, ruch wiertła o odległość  $dX$  jest związany z pracą wykonaną przez siłę osiową  $F_t$ , która powoduje ugięcie płyty, a także do propagacji pęknięcia międzywarstwowego. Równanie bilansu energetycznego można zapisać jako (4.7)

$$G_{IC}dA = F_t dX - dU \quad (4.7)$$

gdzie:  $dU$  – nieskończenie mała energia odkształcenia,  $dA$  – wzrost powierzchni pęknięcia rozwarstwiającego,  $G_{IC}$  – krytyczna energia rozprzestrzeniania się pęknięcia na jednostkę powierzchni.

Rysunek 4.31 przedstawia schemat delaminacji. Środek płytki kołowej jest obciążony wiertłem krętym o średnicy  $d$ .  $F_t$  to siła osiowa,  $X$  to przemieszczenie,  $H$  to grubość przedmiotu obrabianego,  $h$  to głębokość nieobrobionego materiału pod narzędziem, natomiast  $a$  to promień delaminacji. W modelu założono izotropowe zachowanie laminatu i jego czyste zginanie.



Rys. 4.31. Model płytki kołowej do analizy delaminacji

W przypadku okrągłej płytki poddanej obciążeniu skupionemu, zmagazynowana energia odkształcenia  $U$  wynosi (4.8):

$$U = \frac{8\pi M X^2}{a^2} \quad (4.8)$$

gdzie:

$$M = \frac{E h^3}{12(1 - \nu^2)} \quad (4.9)$$

a przemieszczenie  $X$  wynosi (4.10):

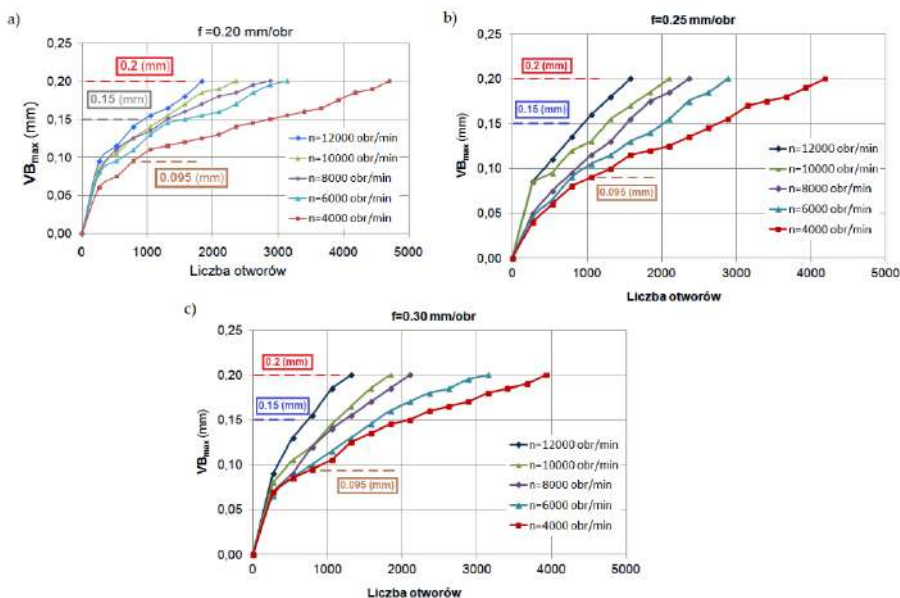
$$X = \frac{F_t a^2}{16\pi M} \quad (4.10)$$

Można obliczyć siłę osiową na początku rozprzestrzeniania się pęknięcia jako (4.11):

$$F_t = \pi \sqrt{32G_{IC}M} = \pi \left( \frac{8G_{IC}Eh^3}{3(1-\vartheta^2)} \right)^2 \quad (4.11)$$

Występująca siła osiowa nie powinna przekraczać wartości (4.11), która jest funkcją właściwości materiału i grubości nieobrobionego materiału, aby uniknąć rozwarstwienia. Siłę osiową można skorelować z prędkością posuwu.

Zmiany wartości zużycia ostrza  $VB_{max}$  w funkcji liczby wywierconych otworów dla 3 prędkości posuwu i 5 prędkości skrawania przedstawiono na rys. 4.32a-c. Przedstawione przebiegi zużycia ostrza w funkcji liczby wykonanych otworów wykonano na podstawie metodyki badań (rozdział 4.2.1).



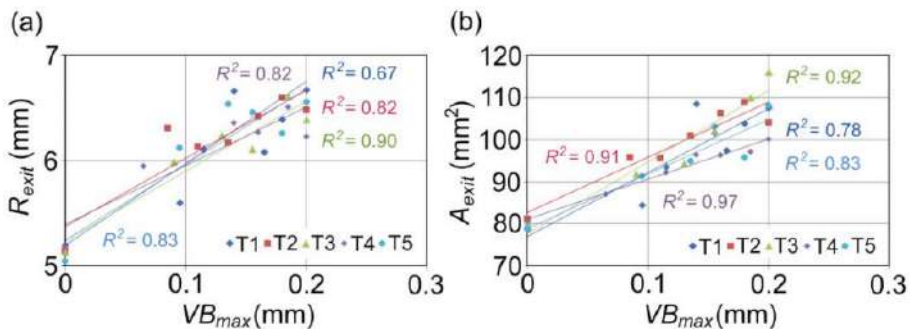
Rys. 4.32. Przebiegi zużycia narzędzia ( $VB_{max}$ ) w funkcji liczby wykonanych otworów dla pięciu prędkości skrawania dla stałej wartości posuwu  $f$

Zwiększenie wartości posuwu z 0,2 mm/obr do 0,3 mm/obr przy stałej minimalnej prędkości skrawania  $n = 4000$  obr/min powoduje, że liczba otworów wywierconych przez narzędzie do momentu osiągnięcia krytycznego zużycia zmniejsza się o około 19%. Przy tym samym zwiększeniu posuwu, ale przy najwyższej prędkości skrawania  $n = 12000$  obr/min, liczba otworów zmniejsza się o około

31%. Dla wszystkich wartości prędkości posuwu w zakresie liczby wywierconych otworów 0 – 800 wartość zużycia jest podobna dla wszystkich stosowanych wartości prędkości obrotowych. Im wyższa wartość zużycia, tym bardziej widoczna jest różnica w liczbie otworów wykonanych przy różnych prędkościach. Wiadomo, że połączenie niskiej prędkości posuwu z dużą prędkością skrawania jest niezbędne w celu zminimalizowania delaminacji podczas wiercenia płyt MDF [243].

Z drugiej strony niskie wartości prędkości posuwu zawsze zapewniają minimalną siłę nacisku w celu zmniejszenia rozwarstwienia [131]. Badania przeprowadzone przez Davim i in. [112, 134] wykazały, że dzięki zastosowaniu wyższych prędkości skrawania możliwe jest zmniejszenie tendencji do delaminacji podczas wiercenia. Wyniki przeprowadzonych badań potwierdziły wniosek wskazany przez Davim i in. [135]. Zbadali oni defekty zaobserwowane po stronie wejścia i wyjścia wierconych płyt MDF i ustalili związek między cechami uszkodzeń a parametrami obróbki. Stwierdzili, że należy stosować wyższe prędkości skrawania w celu uzyskania minimalnej delaminacji. Zmniejszenie prędkości skrawania zwiększa obszar uszkodzenia laminatu. Było to szczególnie widoczne przy większych wartościach zużycia ostrza. Te ustalenia są zgodne z wynikami Mercy i in. [242].

W trakcie analizy wyników badań zaobserwowano, że współczynniki  $VB_{max}$  i  $VBK_E$  są silnie skorelowane ( $R^2 = 0,97$ ), dlatego w dalszych analizach wykorzystany zostanie jedynie wskaźnik  $VB_{max}$ . Aby ocenić wpływ zmian wartości parametrów procesu wiercenia i wskaźników zużycia wiertła na jakość powierzchni płyty wiórowej, zbadano ich korelację dla 5 testów trwałościowych T1 - T5, przeprowadzonych z różnymi przyjętymi prędkościami skrawania. Najwyższą wartość współczynnika determinacji  $R^2$  uzyskano dla zależności wartości  $VB_{max}$  i maksymalnego promienia obszaru delaminacji na wyjściu otworu  $R_{exit}$  (rys. 4.33a) oraz obszaru delaminacji na wyjściu otworu  $A_{exit}$  (rys. 4.33b).



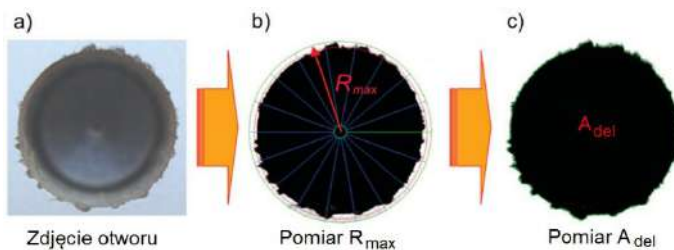
Rys. 4.33. Wpływ zużycia ostrza na wskaźniki delaminacji: a)  $R_{exit}$  i b)  $A_{exit}$  [142]

Stanowi to matematyczne potwierdzenie wniosków wyciągniętych na podstawie wizualnej analizy cyfrowych zdjęć stref delaminacji otworów (tab. 4.8). Oczekiwano, że obróbka z dużą prędkością zwiększy tempo zużycia ostrza, co z kolei pogorszy wykończenie powierzchni płyt MDF [158]. Jednakże płyty o niższej gęstości mają bardziej porowatą powierzchnię w porównaniu do płyt o wyższej gęstości [158].

### 4.2.3. Ocena jakości powierzchni obrobionej

W celu analizy jakości powierzchni przedmiotu obrabianego dokonywano cyfrowego zapisu obrazu każdego otworu wykonanego w trakcie rejestracji sygnałów pomiarowych zarówno na wejściu narzędzia w materiał jak i na jego wyjściu. W celu określenia jakości powierzchni wokół otworu w badaniach postanowiono przyjąć dwa najczęściej stosowane wskaźniki: maksymalny promień wyrwań laminatu  $R_{max}$  oraz pole powierzchni wyrwań laminatu  $A$  (rys. 4.34). Obydwa wskaźniki wyznaczane były zarówno na wejściu narzędzia w materiał obrabiany jak i na wyjściu narzędzia z materiału. W ten sposób określano cztery wskaźniki o symbolach:  $A_{wej}$ ,  $A_{wyj}$ ,  $R_{wej}$ ,  $R_{wyj}$ .

Aby wyznaczyć przyjęte wskaźniki, zarejestrowane obrazy przetwarzano w środowisku LabView (rys. 4.34).



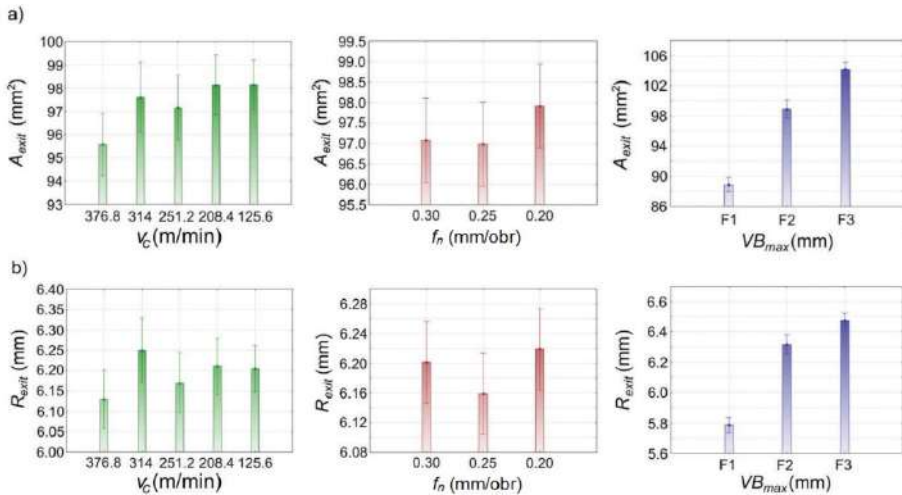
Rys. 4.34. Cyfrowe przetwarzanie obrazu w środowisku LabView: a) zdjęcie cyfrowe, b) i c) zdjęcie po obróbce [142]

Wpływ prędkości skrawania, posuwu i zużycia  $VB_{max}$  na wartość parametrów geometrycznych rozwarstwienia oceniano za pomocą analizy wariancji (ANOVA). Udowodniono, że metoda ANOVA nadaje się do określania udziału parametrów procesu w mierzonej charakterystyce produktu [131, 147, 148, 154, 247]. Każda składowa jest przypisana do identyfikowalnej przyczyny lub źródła zmienności. Rozważono następujące parametry geometryczne:

- obszar delaminacji przy wejściu narzędzia  $A_{ent}$ ,
- obszar delaminacji przy wyjściu narzędzia  $A_{exit}$ ,
- maksymalny promień obszaru delaminacji przy wejściu narzędzia  $R_{ent}$ ,
- maksymalny promień obszaru delaminacji przy wyjściu narzędzia  $R_{exit}$ .

Wyniki analizy (rys. 4.35a) pozwalają na odrzucenie, przy poziomie istotności  $p < 0,001$ , hipotezy o braku wpływu czynnika  $VB_{max}$  na obszar delaminacji

$A_{exit}$ . Można zatem stwierdzić, że wartość zużycia ostrza istotnie wpływa na proces delaminacji, wykorzystując do oceny obszar uszkodzenia laminatu  $A_{exit}$ .



Rys. 4.35. Wpływ wybranych parametrów na wartość przyjętych wskaźników delaminacji [142]

Podobne wnioski można wyciągnąć w odniesieniu do wpływu prędkości skrawania. Obserwuje się, na poziomie istotności  $p = 0,035$ , wpływ prędkości skrawania na obszar delaminacji przy wyjściu narzędzia  $A_{exit}$ . Wpływ prędkości posuwu jest statystycznie nieistotny ( $p = 0,375$ ).

Podsumowując, zarówno zmiana prędkości skrawania, jak i zużycie znacząco wpływają na obszar delaminacji  $A_{exit}$ , podczas gdy zmiana prędkości posuwu nie ma istotnego wpływu na  $A_{exit}$ . Ponadto, interakcja parametrów  $VB_{max}$  i  $v_c$  jest wysoce istotna ( $p = 0,026$ ). Davim i in. [135] również potwierdzili istotną rolę prędkości skrawania w ewolucji współczynnika delaminacji. Prakash i Palanikumar [150] wykorzystali prędkość wrzeciona, prędkość posuwu i średnicę wiertła jako parametry wiercenia. Ich badanie wykazało, że najważniejszym parametrem wpływającym na uszkodzenia laminatu jest prędkość posuwu. Analiza ANOVA, dla procesu wiercenia, przeprowadzona przez Valarmathi i in. [147] wykazała, że wzrost prędkości wrzeciona wpływa na zmniejszenie wartości siły osiowej podczas wiercenia płyt wiórowych MDF, natomiast wzrost prędkości posuwu wpływa na jej zwiększenie.

Wartość zużycia ostrza istotnie wpływa (przy  $p < 0,001$ ) na proces delaminacji, wykorzystując do oceny zjawiska maksymalny promień obszaru uszkodzenia laminatu przy wyjściu narzędzia  $R_{exit}$  (rys. 4.35b).

Przeciwny wniosek można wyciągnąć w odniesieniu do wpływu prędkości skrawania. Wpływ prędkości skrawania na maksymalny promień obszaru delaminacji jest statystycznie nieistotny (przy  $p = 0,221$ ). Podobnie jest w przypadku wpływu prędkości posuwu, jest również statystycznie nieistotny (przy  $p = 0,289$ ).

Delaminacja wzrasta wraz ze wzrostem zużycia powierzchni przyłożenia ostrza wiertła, ponieważ siła osiowa generowana podczas wiercenia rośnie wraz ze wzrostem zużycia powierzchni przyłożenia. Wpływ zużycia ostrza wiertła na współczynnik delaminacji staje się istotny przy wyższych prędkościach obrotowych wrzeciona [248].

Podsumowując, zmiana wartości prędkości skrawania i posuwu nie wpływa istotnie na maksymalny promień obszaru delaminacji  $R_{exit}$ . Nie stwierdzono statystycznie istotnej interakcji między analizowanymi czynnikami. Wyniki analizy ANOVA poziomu istotności wpływu prędkości skrawania, posuwu oraz sygnałów momentu skrawania i siły osiowej na czynniki jakości powierzchni przedstawiono w tab. 4.9.

Tabela 4.9. Poziom istotności parametrów obróbki tworzyw drewnopochodnych

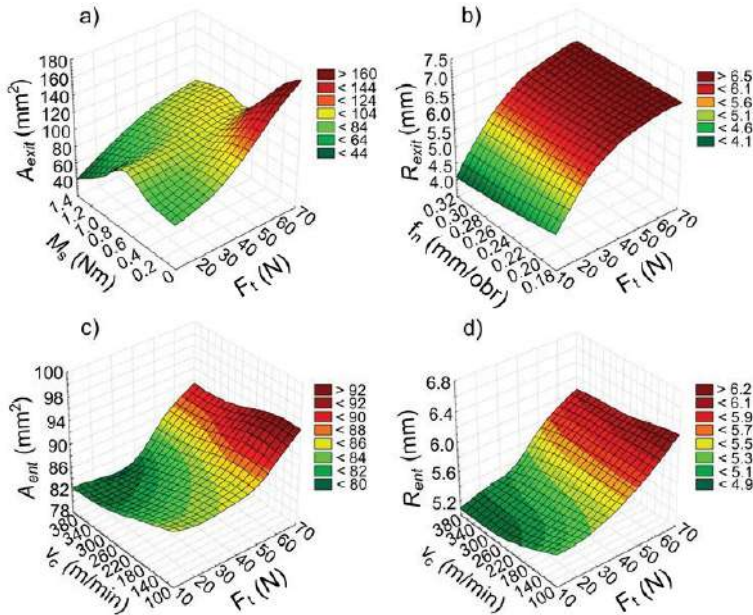
Zmienne	Poziom istotności p			
	$A_{ent}$	$A_{exit}$	$R_{ent}$	$R_{exit}$
$v_c$	0,001	0,035	0,001	0,221
$f_n$	0,101	0,375	0,089	0,289
$M_c$	0,074	0,030	0,254	0,351
$F_t$	0,001	0,001	0,001	0,001

Wpływ momentu skrawania jest statystycznie istotny tylko w przypadku jednego czynnika ( $A_{exit}$ ) użytego do oceny jakości obrobionej powierzchni. Wpływ posuwu jest statystycznie nieistotny dla wszystkich czynników i prędkości skrawania w przypadku dwóch czynników  $A_{ent}$  i  $R_{ent}$  (tab. 4.9). Najwyższy poziom istotności zaobserwowano w przypadku sygnału siły osiowej. Przy poziomie istotności  $p < 0,001$  można odrzucić hipotezę o braku wpływu siły osiowej na obszar delaminacji przy wyjściu narzędzia  $A_{exit}$  (rys. 4.36a). Co więcej, można odrzucić hipotezę o braku wpływu wartości posuwu i prędkości skrawania, na poziomie istotności odpowiednio  $p = 0,007$  i  $p = 0,030$ .

Uzyskane wyniki dobrze korelują z wynikami badań El-Sonbaty i in. [249], którzy wskazali, że wartości siły osiowej i momentu skrawania rosły wraz ze średnicą wiertła i prędkością posuwu, ze względu na wzrost powierzchni ścinania.

Wyniki przedstawione na rys. 4.36b pozwalają wnioskować, że istnieje statystycznie istotny (przy  $p < 0,001$ ) wpływ siły osiowej i prędkości posuwu na wartość maksymalnego promienia obszaru delaminacji przy wyjściu narzędzia  $R_{exit}$ . Wpływ prędkości skrawania i siły osiowej na wartość parametrów  $A_{ent}$  i  $R_{ent}$  jest bardzo podobny (rys. 4.36c, d). Oczywiście jest, że siła osiowa maleje wraz ze wzrostem prędkości skrawania [131]. Niższe siły skrawania implikują wolniejsze

zużycie ostrza, ponieważ oczekuje się, że wielkości sił skrawania będą silnie powiązane z tempem jego zużycia [158].



Rys. 4.36. Wpływ siły osiowej  $F_t$ , prędkości skrawania  $v_c$  i momentu skrawania  $M_c$  na wskaźniki delaminacji: a)  $A_{exit}$ , b)  $R_{exit}$ , c)  $A_{ent}$  i d)  $R_{ent}$  [142]

Eksperymenty przeprowadzone przez Hocheng i Tsao [246] wskazują, że istnieje krytyczna siła osiowa, poniżej której nie występują żadne uszkodzenia. Trwałość ostrzy wiertel stosowanych w obróbce materiałów drewnopochodnych zależy od wielu kombinacji parametrów skrawania oraz zużycia ostrza wiertła.

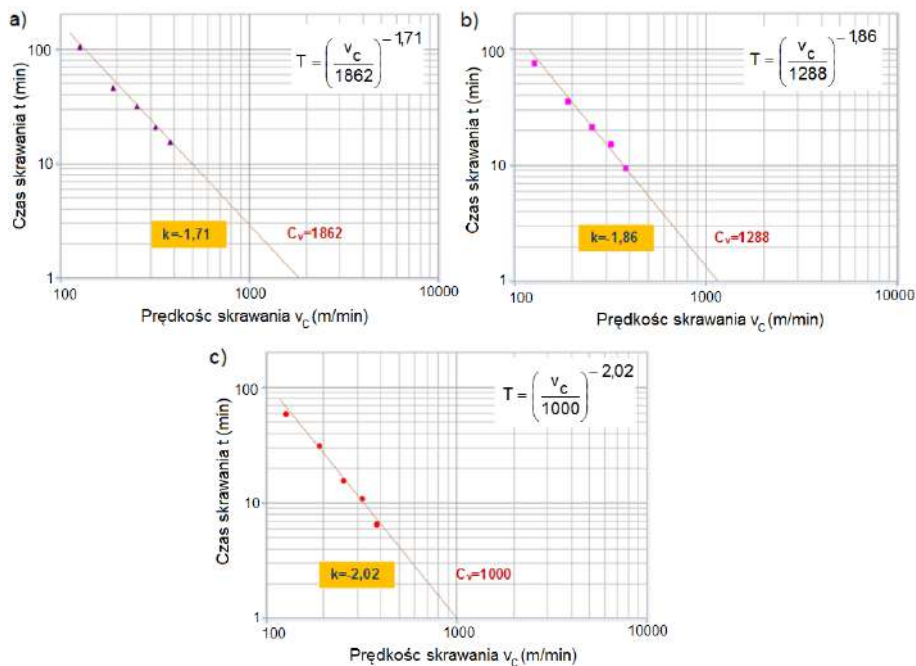
W badaniach określono wpływ parametrów skrawania i czynników zużycia ostrza na jakość powierzchni w procesie wiercenia laminowanej płyty wiórowej. Wykazano, że w procesie wiercenia płyty wiórowej wiertłem z węglika spiekane do otworów przelotowych jakość powierzchni otworu zależy głównie od zużycia powierzchni przyłożenia ostrza  $VB_{max}$  oraz prędkości skrawania.

Wraz ze wzrostem wartości zarówno prędkości skrawania, jak i posuwu, trwałość ostrza maleje i odwrotnie. Jednak w przypadku prędkości skrawania ten wpływ jest większy. Zarówno zmiana prędkości skrawania, jak i zużycie znacząco wpływają na obszar delaminacji przy wyjściu z otworu  $A_{exit}$ , podczas gdy zmiana prędkości posuwu nie ma znaczącego wpływu na  $A_{exit}$ . Najwyższy poziom istotności zaobserwowano w przypadku sygnału siły osiowej. Zmiana prędkości skrawania i prędkości posuwu nie wpływa znacząco na maksymalny promień obszaru rozwarstwienia przy wyjściu z otworu.

Statystyczna analiza wyników z wykorzystaniem wieloczynnikowej analizy wariancji pozwala określić zależność między parametrami procesu wiercenia a zużyciem ostrza. Prędkość posuwu i  $VB_{\max}$  to główne czynniki wpływające na wartość siły osiowej. Ponadto sygnał momentu skrawania w dużym stopniu zależy od prędkości skrawania, posuwu i wskaźnika zużycia  $VB_{\max}$ . Sygnały zarówno momentu skrawania, jak i siły osiowej są silnie skorelowane z jakością powierzchni otworów.

#### 4.2.4. Ekonomiczna i wydajnościowa obróbka płyt drewnopochodnych

Mając wyniki przeprowadzonych badań w postaci zależności prędkości skrawania od okresu trwałości ostrza narzędzia skrawającego przeprowadzono analizę pod kątem określenia prędkości skrawania największej wydajności  $v_q$  i ekonomicznej prędkości skrawania  $v_c$ . Na rysunku 4.37 przedstawiono na wykresach podwójnie logarytmicznych wpływ prędkości skrawania na trwałość ostrza dla trzech wartości posuwu, dla sześciu prób trwałościowych T1-T6 (dla każdej z wartości posuwu), prowadzonych z różnymi (przyjętymi) prędkościami skrawania.



Rys. 4.37. Zależność okresu trwałości ostrza od prędkości skrawania na wykresie podwójnie logarytmicznym: a) dla posuwu 0,2, b) dla posuwu 0,25, c) dla posuwu 0,3

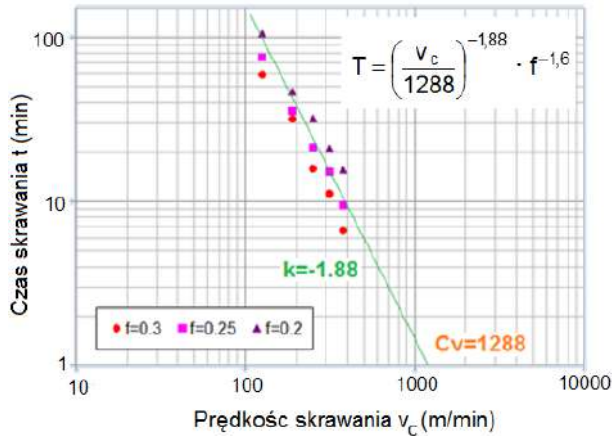
Poniżej przedstawiono uzyskane równania Taylora określające wpływ prędkości skrawania na trwałość ostrzy użytych wiertel. Łącznie uzyskano trzy równania, w zależności od stosowanego posuwu, w trakcie próby trwałościowej narzędzia. Dla wartości posuwu 0,2 mm/obr zależność Taylora opisana jest równaniem (4.12), dla posuwu 0,25 mm/obr – (4.13) dla posuwu 0,3 mm/obr – (4.14).

$$T = \left( \frac{v_c}{1862} \right)^{-1.71} \quad (4.12)$$

$$T = \left( \frac{v_c}{1288} \right)^{-1.86} \quad (4.13)$$

$$T = \left( \frac{v_c}{1000} \right)^{-2.02} \quad (4.14)$$

Z uwagi na zaobserwowany wpływ wartości posuwu na trwałość ostrza postanowiono w dalszej analizie skorzystać z rozszerzonej postaci równania Taylora uwzględniającej wartość posuwu. Aby określić taką zależność wyniki wszystkich 18 prób naniesiono na wykres podwójnie logarytmiczny (rys. 4.38), a następnie wyznaczono  $C_v$ , a także współczynnik kierunkowy prostej  $k$ .



Rys. 4.38. Zależność okresu trwałości narzędzia od prędkości skrawania na wykresie podwójnie logarytmicznym dla trzech wartości posuwu

Wyznaczenie równania (4.15) pozwoliło na dokładne określenie wpływu posuwu na trwałość ostrza. Jak można zaobserwować dla zmniejszającej się wartości posuwu rośnie trwałość ostrza.

$$T = \left( \frac{v_c}{1288} \right)^{-1.88} \cdot f^{-1.60} \quad (4.15)$$

Na podstawie powyższego równania można wyznaczyć prędkość skrawania dla założonego okresu trwałości ostrza, a także posuwu i odwrotnie. Zależność ta

może być zastosowana dla badanego przedziału prędkości skrawania, konkretnego rodzaju narzędzia, a także materiału obrabianego.

Wyniki przeprowadzonych badań wskazują jednoznacznie, że istnieje istotny wpływ wartości zarówno prędkości skrawania jak i posuwu na trwałość ostrza narzędzia skrawającego. Wraz ze wzrostem wartości zarówno prędkości skrawania jak i posuwu maleje trwałość ostrza narzędzia skrawającego i przeciwnie. Jednak w przypadku prędkości skrawania wpływ ten jest większy.

Chcąc wyznaczyć prędkość skrawania największej wydajności  $v_q$  (i odpowiadającą jej trwałość największej wydajności  $T_q$ ) oraz ekonomiczną prędkość skrawania  $v_e$  na podstawie zależności 1.27 i 1.33 (i odpowiadającą jej ekonomiczną trwałość ostrza  $T_e$ ) poczyniono założenia (przyjęto) odnośnie do takich wartości jak:  $t_z$ ,  $K_O$ ,  $K_N$ , które są niezbędne do wyznaczenia wyżej wymienionych prędkości skrawania.

I tak, dla celów analizy, przyjęto, że  $t_z = 2$  min,  $K_O = 150$  PLN/h,  $K_N = 55$  PLN. Uzyskane wartości przedstawiono w poniższych tabelach (tab. 4.10-4.12).

Tabela 4.10. Zestawienie parametrów obróbki wydajnościowej oraz ekonomicznej dla posuwu 0,2 mm/obr

Model obróbki	Prędkość skrawania m/s	Prędkość obrotowa obr/min	Okres trwałości ostrza min
Wydajnościowy		>12000	1,42
Ekonomiczny	5,91	11295	17,04

Tabela 4.11. Zestawienie parametrów obróbki wydajnościowej oraz ekonomicznej dla posuwu 0,25 mm/obr

Model obróbki	Prędkość skrawania m/s	Prędkość obrotowa obr/min	Okres trwałości ostrza min
Wydajnościowy		>12000	1,72
Ekonomiczny	4,22	8056	20,64

Tabela 4.12. Zestawienie parametrów obróbki wydajnościowej oraz ekonomicznej dla posuwu 0,3 mm/obr

Model obróbki	Prędkość skrawania m/s	Prędkość obrotowa obr/min	Okres trwałości ostrza min
Wydajnościowy		>12000	2,04
Ekonomiczny	3,42	6539	24,48

### 4.3. Posumowanie

Badania dotyczące zużycia dwuostrzowego freza z HSS i HW podczas frezowania płyty wiórowej pokrytej laminatem pozwoliły na określenie wpływu prędkości skrawania i posuwu na wartość sygnałów siły w procesie skrawania, a także na wartość współczynnika rozwarstwienia krawędzi płyty wiórowej. Znaczenie wpływu parametrów procesu skrawania i zużycia narzędzia na wartość współczynnika rozwarstwienia określono za pomocą wielowymiarowej analizy wariancji. Analiza statystyczna wyników eksperymentalnych wskazuje, że głównymi parametrami określającymi stopień uszkodzenia krawędzi płyty wiórowej są zużycie powierzchni przyłożenia narzędzia oraz prędkość skrawania. Ponadto oceniono ekonomiczną prędkość skrawania oraz prędkość skrawania odpowiadającą maksymalnej wydajności procesu frezowania. Wartość ekonomicznej prędkości skrawania można uzyskać na standardowej obrabiarce CNC. Prędkość skrawania zapewniająca maksymalną wydajność przekracza maksymalną prędkość skrawania, jaką można uzyskać na standardowej maszynie CNC do obróbki drewna.

Jak wiadomo materiał ostrzy narzędzi i parametry obróbki to główne czynniki decydujące o jakości powierzchni płyty wiórowej. W badaniach analizowano trwałość freza z węgla spiekane i freza dwuostrzowego ze stali szybkoobrotowej podczas obróbki płyty wiórowej pokrytej melaminą. Zastosowano analizę ANOVA w celu określenia istotności wpływu parametrów obróbki i zużycia narzędzia na wartość współczynnika rozwarstwienia. Jako współczynnik rozwarstwienia przyjęto stosunek powierzchni rozwarstwienia do zmierzonej długości próbki. Do określenia trwałości narzędzia skrawającego przyjęto kryterium geometryczne, tj. maksymalne zużycie powierzchni przyłożenia narzędzia. Zaobserwowano wyraźny wpływ prędkości skrawania na trwałość narzędzia. Zależność ta przejawiała się spadkiem trwałości narzędzia wraz ze wzrostem prędkości skrawania. Stwierdzono również, że zmniejszenie prędkości skrawania zwiększa wartość współ-

czynnika  $A_{del}$ . Było to szczególnie widoczne w przypadku wyższych wartości zużycia narzędzia. W przypadku posuwu na ostrze nie zaobserwowano wyraźnego wpływu na nasilenie zjawiska rozwarstwienia.

Trwałość wiertel podczas obróbki tworzyw drzewnych zależy od wielu kombinacji parametrów skrawania i zużycia ostrza wiertła. W przeprowadzonych badaniach określono wpływ parametrów skrawania i czynników zużycia narzędzia na jakość powierzchni w procesie wiercenia surowej i laminowanej płyty wiórowej. Wykazano, że w procesie wiercenia płyty wiórowej otworów przelotowych i wiertła z węgla spiekane, jakość powierzchni otworu zależy głównie od zużycia powierzchni przyłożenia narzędzia  $VB_{max}$  i prędkości skrawania. Wraz ze wzrostem zarówno prędkości skrawania, jak i posuwu, trwałość narzędzia maleje i odwrotnie. Jednak w przypadku prędkości skrawania ten efekt jest większy. Zarówno zmiana prędkości skrawania, jak i zużycia znacząco wpływa na obszar rozwarstwienia na wyjściu otworu  $A_{exit}$ , podczas gdy zmiana prędkości posuwu nie ma znaczącego wpływu na  $A_{exit}$ .

Wpływ momentu skrawania jest statystycznie istotny tylko w przypadku jednego czynnika  $A_{exit}$  używanego do oceny jakości obrobionej powierzchni. Wpływ posuwu jest statystycznie nieistotny dla wszystkich czynników i prędkości skrawania w przypadku dwóch czynników: powierzchni rozwarstwienia na wejściu otworu i maksymalnego promienia rozwarstwienia na wejściu otworu. Najwyższy poziom istotności zaobserwowano w przypadku sygnału siły osiowej. Zmiana prędkości skrawania i posuwu nie wpływa istotnie na maksymalny promień obszaru rozwarstwienia na wyjściu otworu. Analiza statystyczna wyników z wykorzystaniem wieloczynnikowej analizy wariancji pozwoliła na określenie zależności między parametrami procesu wiercenia a zużyciem narzędzia. Prędkość posuwu i  $VB_{max}$  to główne czynniki wpływające na wartość sygnału siły osiowej. Ponadto sygnał momentu skrawania w dużym stopniu zależy od prędkości skrawania, posuwu i współczynnika zużycia  $VB_{max}$ . Sygnały zarówno momentu skrawania, jak i siły osiowej są silnie skorelowane z jakością powierzchni otworów.



# 5. SKRAWALNOŚĆ PŁYT DREWNOPOCHODNYCH

## 5.1. Wiadomości ogólne

Skrawalność to pojęcie opisujące zespół wskaźników i kryteriów określających podatność na obróbkę materiału w określonych warunkach, natomiast zdolność narzędzia do wykonywania obróbki skrawaniem określana jest pojęciem skrawności. Obydwa parametry zależą przede wszystkim od: rodzaju prowadzonej obróbki, geometrii ostrza, rodzaju materiału. W zależności od rodzaju obróbki i jej warunków skrawalność i skrawność, może być różnie określana. Wskaźniki i kryteria skrawalności i skrawności są dobierane pod konkretne potrzeby.

Do tej pory nie został stworzony jednoznaczny ilościowy wskaźnik skrawalności. Jako podstawowe i najczęściej używane wskaźniki należy wymienić: prędkość skrawania i parametry chropowatości Ra i Rz. Materiał dobrze skrawalny to taki, który można obrabiać z wysoką okresową prędkością skrawania, dodatkowo z zachowaniem małej chropowatości powierzchni, przy obróbce wykańczającej. Jednak te kryteria bardzo często są ze sobą sprzeczne. Dlatego też wskaźniki trwałościowe i jakościowe traktowane są z reguły odrębnie, a ich zastosowanie zależy od okoliczności.

Metoda wyznaczania skrawalności za pomocą oporów skrawania jest stosowana zwłaszcza przy wierceniu, w szczególności przy wierceniu małych otworów. To w tym przypadku należy zadbać o obniżenie oporów skrawania, chociażby przez odpowiedni dobór geometrii ostrza. Głównym powodem jest napięty bilans między momentem skręcającym, a wytrzymałością ostrza, co może prowadzić do ukręcenia się narzędzia, mimo iż sam proces obróbki nie zużywa go szybko.

Inteligentne fabryki są kluczową cechą Przemysłu 4.0. Przemysł 4.0 koncentruje się na tworzeniu inteligentnych produktów, procesów i procedur [250] z naciskiem na zrównoważony rozwój [251, 252]. Istotą procesu jest kompleksowe zarządzanie fabrykami, co pozwala na redukcję czynników błędnych. W takim środowisku zachodzi wydajniejsza produkcja i komunikacja pomiędzy ludźmi, maszynami i zasobami, zgodnie z zasadami sieci społecznej [166, 253]. W Przemysle 4.0 zakłada się, że standardowe miejsca pracy zostaną zastąpione sztuczną inteligencją (AI) lub robotami [254, 255].

Olbrzymi i nieustający od początku lat 90. XX w. wzrost możliwości wykorzystania komputerów przy jednoczesnym spadku ich cen spowodowały, że coraz więcej producentów stosuje techniki informatyczne do sterowania produkcją we wszystkich fazach procesu produkcyjnego.

Istnieje wiele sposobów obróbki płyt drewnopochodnych [256, 257, 258], dlatego skrawalność tych materiałów można testować na wiele sposobów. Skrawalność każdego rodzaju płyt w przypadku wiercenia jest jedną z najważniejszych kwestii z praktycznego punktu widzenia. To ogólne przekonanie można udowodnić na wiele sposobów, ale wydaje się, że wystarczy przytoczyć dwa podstawowe argumenty. Po pierwsze, odporność na osiowe wyrywanie wkrętów jest jednym z najważniejszych parametrów technicznych charakteryzujących płyty drewnopochodne. Odporność tę należy określić doświadczalnie zgodnie z normą szczegółową. Procedura eksperymentalna wymaga uprzedniego wywiercenia odpowiedniego otworu w celu zamontowania wkrętu, dlatego wiercenie jest podstawową formą obróbki płyt.

Po drugie, wiercenie jest obecnie wykorzystywane nie tylko do wykonywania otworów do celów budowlanych. Badania metodą wiercenia są powszechnie uważane za najwygodniejszą (najszybszą i najbardziej oszczędną) metodę względnej oceny skrawalności drewna lub materiałów drewnopochodnych [160]. Wszelkie badania naukowe dotyczące obrabialności są ściśle eksperymentalne. Ogólnie od dawna wiadomo, że wszelkie próby teoretycznego określenia (prognozy) skrawalności na podstawie właściwości mechanicznych materiału są niedokładne [108]. Może to przeczyć przekonaniu, że np. znajomość geometrii ostrza, parametrów skrawania i normowych właściwości materiału pozwala na teoretyczne wyznaczenie sił skrawania.

Z dotychczasowych badań wynika, że rzeczywiste procesy skrawania, takie jak wiercenie, są zbyt skomplikowane z fizycznego punktu widzenia, aby znaleźć bezpośredni związek pomiędzy siłami skrawania, a wytrzymałością na rozciąganie lub ścinanie obrabianego materiału [108, 257, 258]. Jesteśmy po prostu zmuszeni do prowadzenia badań eksperymentalnych. Niestety, nie ma ogólnie przyjętej normy, którą można by bezpośrednio zastosować do badania skrawalności płyt drewnopochodnych.

Jedną z najbardziej niezawodnych procedur testowych (którą można zastosować do wiercenia w płytach drewnopochodnych) zaproponowali i wypróbowali Podziewski i in. [257]. Procedura uwzględnia dwa podstawowe aspekty (kryteria) skrawalności: jakość otworu i siłę skrawania. Wynika to z faktu, że Podziewski i in. [257] stwierdzili, że są to jedyne dwa podstawowe kryteria, które mają znaczenie przy wierceniu w materiałach drewnopochodnych. Problem jakości obróbki może znacznie ograniczyć zakres zastosowania materiału konstrukcyjnego, a nadmierne opory wiercenia mogą powodować konieczność ograniczenia prędkości posuwu i obniżenia wydajności obróbki.

## 5.2. Uniwersalny indeks skrawalności

W przeprowadzonych badaniach określono wartości siły osiowej  $F_t$ , momentu skrawania  $M_c$  oraz dokonano pomiaru i analizy grubości wiórów uzyskanych w trakcie testów. Do analizy sygnałów siły i momentu zaproponowano metodykę

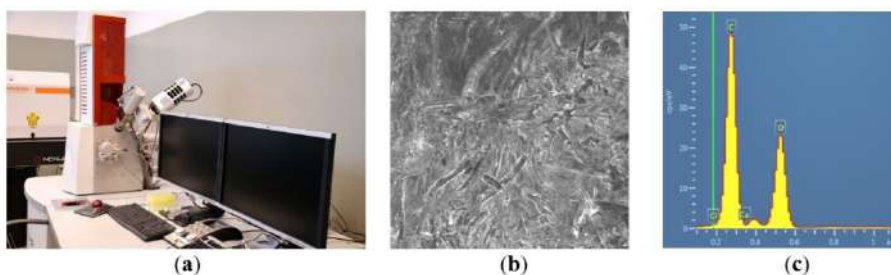
wyznaczania wartości średnich sygnałów celem uniknięcia losowych zmian wartości sygnałów. Uzyskane wyniki posłużyły do określenia indeksu skrawalności MDF w procesie wiercenia na podstawie pomiaru siły osiowej, momentu skrawania oraz kąta ścinania wióra. Wyniki uzyskane w trakcie badań wykazały, że indeks skrawalności oparty na zastosowanych w pracy kryteriach jest stały dla danego materiału obrabianego i nie zależy od parametrów skrawania.

### 5.2.1. Metodyka badań

W badaniach jako materiał obrabiany zastosowano płytę MDF o grubości 18 mm. W celu dokładniejszej analizy materiału wykonano pomiar własności mechanicznych i fizycznych. Wyniki uzyskanych badań przedstawiono w tab. 5.1. Ponadto za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego z przystawką EDS firmy TESCAN przeprowadzono analizę spektralną pierwiastków wchodzących w skład badanego materiału (rys. 5.1).

Tabela 5.1. Wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne płyt MDF użytej w badaniach

Material	Gęstość kg/m <sup>3</sup>	Wilgotność %	Wytrzymałość na zginanie MPa	Moduł sprężystości MPa
Płyta MDF	742	7,2	38	2530
Metoda badania	EN 323 [231]	EN 311 [232]	EN 310 [234]	EN 310 [234]



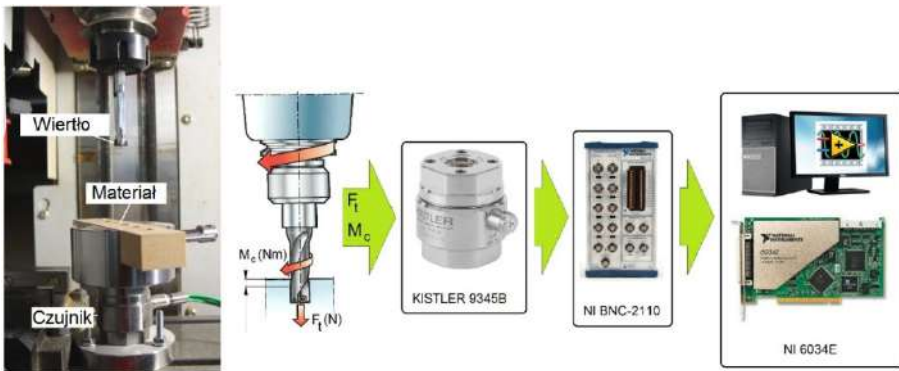
Rys. 5.1. Mikroskop skaningowy i analiza spektralna płyty MDF: a) stanowisko pomiarowe, b) mikrofotografia powierzchni płyty MDF, c) spektrum płyty MDF [160]

Jako narzędzie skrawające zastosowano (na podstawie literatury, zastosowań przemysłowych i zaleceń producenta narzędzia) wiertło o średnicy 9,3 mm z nasadzanym ostrzem. Ostrza wykonane z węgla spiekane P15 o kącie przystawienia  $\kappa_r = 90^\circ$  i kącie natarcia  $\gamma_o = 15^\circ$  (rys. 5.2).



Rys. 5.2. Narzędzie skrawające: uchwyt ISCAR (DCNS 090-027-090B-3D) oraz ostrze FPC 093 IC908

W ramach przeprowadzonych prób wiercono otwory nieprzelotowe w elementach o wymiarach  $130 \times 30 \times 18$  mm wykonanych z płyty MDF. Wielkości fizyczne  $F_t$  i  $M_c$  mierzone były za pomocą piezoelektrycznego czujnika przemysłowego KISTLER 9345B2. Sygnały pochodzące z czujnika rejestrowane były na dysku komputera osobistego (PC) w postaci cyfrowej za pośrednictwem karty analogowo-cyfrowej NI 6034E. Częstotliwość próbkowania sygnałów  $F_t$  i  $M_c$  podczas prowadzonych eksperymentów wynosiła 50 kHz na kanał, a rozdzielczość pomiarowa karty 16 bitów. Na rysunku 5.3 przedstawiono schemat toru pomiarowego stosowanego w badaniach. Ponadto, po każdym wywierconym otworze, przeprowadzano pomiar grubości uzyskiwanego wióra. Pomiary te realizowano na mikroskopie optycznym MITUTOYO wyposażonym w kamerę cyfrową.



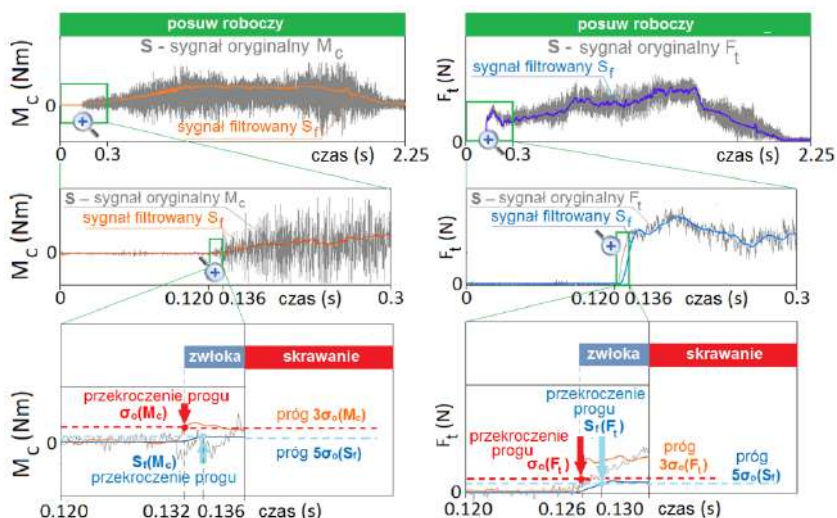
Rys. 5.3. Tor pomiarowy [160]

W trakcie badań wykonano serię otworów dla przyjętych zestawów parametrów skrawania. Podczas badań stosowano cztery wartości prędkości skrawania  $v_c$ : 0,24, 0,48, 0,73 i 0,97 m/s. Dla każdej wartości prędkości skrawania przyjmowano pięć wartości posuwu  $f_z$ : 0,1, 0,2, 0,3, 0,4, 0,5 mm/ostrze. Dla każdego zestawu parametrów przeprowadzono trzy powtórzenia.

### 5.2.2. Analiza wyników

#### Siła osiowa i moment skrawania

Do analizy zarejestrowanych sygnałów  $F_t$  i  $M_c$  przygotowano własny program komputerowy (w środowisku LabVIEW) umożliwiający w wybranych odcinkach czasu wyznaczenie średnich wartości rejestrowanych sygnałów siły osiowej i momentu skrawania. Działanie programu polegało na automatycznym wyznaczaniu wartości rejestrowanych sygnałów w ściśle określonych odcinkach czasowych. Przygotowanie sygnałów do analizy polegało na podzieleniu sygnału na równe fragmenty. Z takich fragmentów generowano wartość średnią sygnału. Zanim jednak możliwe było przeprowadzenie tych procedur, niezbędne było wyselekcjonowanie takich fragmentów sygnału, które będą najlepiej reprezentować wartość sygnału w trakcie obróbki. Najbardziej przydatne są fragmenty sygnału pochodzące z niezmiennych jego części. Pozwala to na uniknięcie losowych zmian sygnału.



Rys. 5.4. Metodyka wyznaczania początku skrawania [160]

Zaproponowany sposób wykrywania skrawania jest przedstawiony na rys. 5.4. Wykrywanie skrawania opiera się na sygnale siły osiowej  $F_t$  i momentu skrawania  $M_c$ . Po 50 ms od otrzymania sygnału z układu sterowania obrabiarki „start posuwu roboczego” usuwany jest offset sygnału. W tym celu wyznaczane jest odchylenie standardowe  $\sigma_0$  i wartość średnia sygnału  $S_{ave}$  pochodzącego z czujnika z segmentu o określonym przedziale czasowym 100 ms. Wartość średnia sygnału  $S_{ave}$  jest odejmowana od sygnału jako przesunięcie, a więc podczas „skrawania powietrza” sygnał powinien oscylować wokół zera.

Odchylenie standardowe obliczone podczas usuwania offsetu –  $\sigma_0$  (tutaj  $\sigma_0(F_t)$  i  $\sigma_0(M_c)$ ) jest miarą zakłóceń sygnału, która może być zależna od prędkości obrotowej wrzeciona, posuwu, itp. Dlatego może być użyte do określenia progu wartości wykrywania skrawania.

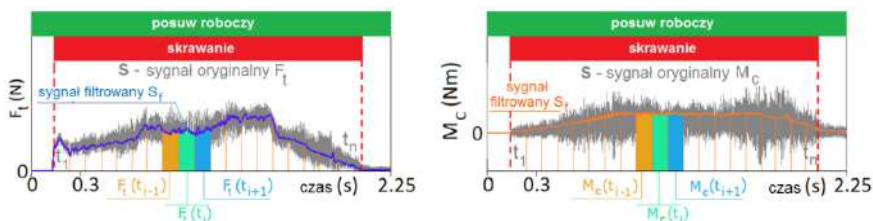
Po usunięciu offsetu, rozpoczyna się wykrywanie rzeczywistego skrawania. Z okresu 5 ms sygnału jest wyznaczane  $S_f$  i  $\sigma_c$ . Gdzie  $S_f$  – sygnał filtrowany dolnoprzepustowo 1kHz Butterworth II rzędu. Natomiast  $\sigma_c$  – to odchylenie standardowe tego sygnału. Rozpoznanie początku skrawania następuje, jeśli  $S_f > 5\sigma_0$  lub  $\sigma_c > 3\sigma_0$  dla dowolnego z sygnałów powyżej 25 ms. W przykładzie przedstawionym na rys. 5.4, pojawiło się przekroczenie wartości progowej przy 0,128 s dla odchylenia standardowego siły osiowej, skrawanie zostało rozpoznane przy 0,135 s. Zakończenie skrawania jest rozpoznawane gdy określana miar sygnału spadnie poniżej założonego progu jaki został określony w rozpoznawaniu początku skrawania. Mnożniki: 5 dla filtrowanego sygnału  $S_f$  i 3 dla odchylenia standardowego sygnału  $\sigma_c$  zostały ustalone na bazie doświadczeń własnych.

Po określeniu początku skrawania przeprowadzono segmentację sygnału, która polega na podzieleniu sygnału, w trakcie jego analizy, na równe fragmenty czasowe. Z takich wycinków, nazwanych segmentami, generowana była wartość średnia analizowanych sygnałów. Zgodnie z wcześniejszymi założeniami, aby uniknąć losowości zmian sygnału wybrano fragmenty pochodzące z niezmiennych jego części. Sposób oceny niezmienności sygnału  $F_L$  został przedstawiony na rys. 5.5 oraz został opisany równaniem (5.1). Im  $F_L$  będzie niższa, tym segment lepiej nadaje się do wyznaczenia wartości sygnału.

$$F_L = \left| \frac{MS(t_{i-1})}{MS(t_i)} - 1 \right| + \left| \frac{MS(t_{i+1})}{MS(t_i)} - 1 \right| \quad (5.1)$$

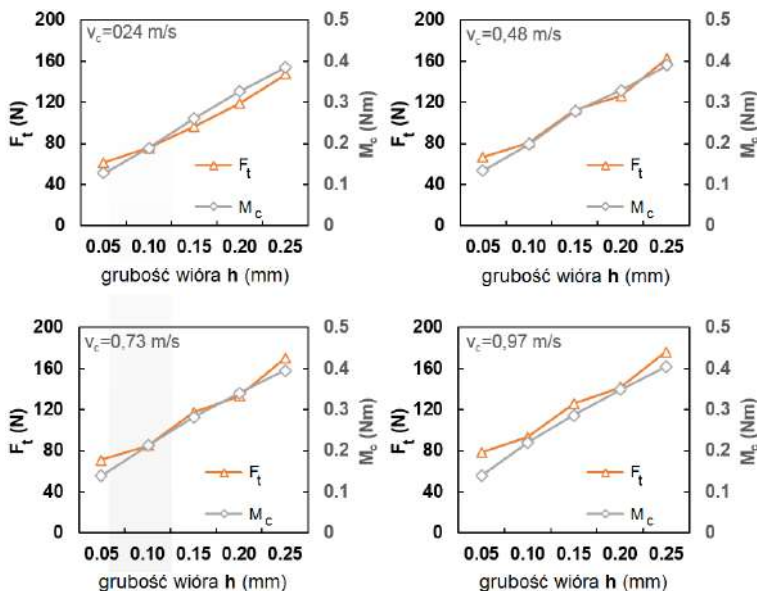
gdzie:  $MS(t_{i-1})$  – miara analizowanego sygnału dla czasu  $t_{i-1}$ ,  $MS(t_{i+1})$  – miara analizowanego sygnału dla czasu  $t_{i+1}$ .

Aby wybrać najlepsze fragmenty sygnału do wyznaczania wartości średniej z każdego zarejestrowanego sygnału (w trakcie wiercenia jednego otworu), należy wybrać segmenty sygnału posiadające najlepszą ocenę (rys. 5.5). Taka procedura prowadzona była dla wszystkich zarejestrowanych sygnałów otrzymanych dla każdego z wywierconych otworów. Końcowa selekcja polega wyborze takich fragmentów (w tym samym przedziale czasowym) sygnałów, dla których niezmiennosc  $F_L$  jest najmniejsza.



Rys. 5.5. Metodyka wyznaczania wartości sygnałów [160]

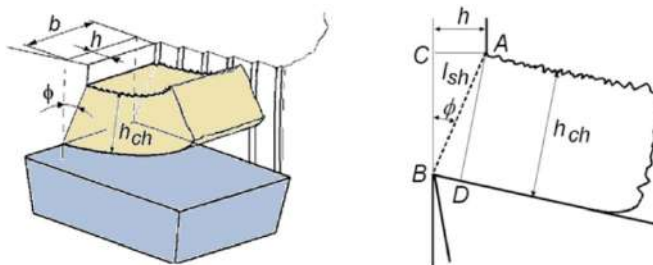
Na rysunku 5.6 przedstawiono przebiegi siły osiowej  $F_t$  i momentu skrawania  $M_c$  w zależności od grubości wióra co bezpośrednio związane jest z zastosowanymi parametrami skrawania. Zarówno wartość siły osiowej jak i momentu skrawania zależy od wartości posuwu. Nie zaobserwowano istotnego wpływu prędkości skrawania na wartość momentu, jak i siły osiowej.



Rys. 5.6. Wpływ grubości wióra na wartość siły osiowej i momentu skrawania [160]

### Proces tworzenia wióra

Ważnym parametrem procesu skrawania charakteryzującym wielkość odkształceń w strefie ścinania jest kąt ścinania  $\phi$  zawarty między kierunkiem prędkości skrawania, a strefą ścinania. Im jest on mniejszy, tym większa jest długość strefy ścinania (rys. 5.7), a więc i odkształcenia w strefie ścinania.























Rys. 5.7. Kąt ścinania i współczynnik spęcznienia wióra [160]

Kąt ścinania wpływa także na grubość wióra  $h_{ch}$ . Stosunek tej grubości do grubości warstwy skrawanej zwany jest współczynnikiem spęczenia wióra  $\Lambda_h$ . Może on być używany jako miara odkształceń w strefie ścinania (5.2):

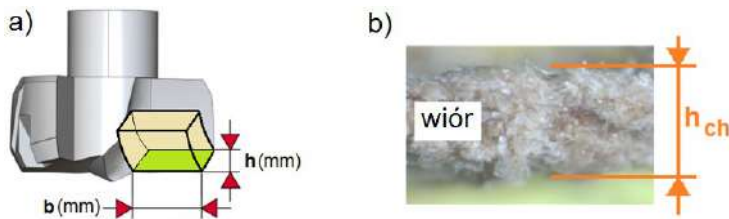
$$\Lambda_h = \frac{h_{ch}}{h} \quad (5.2)$$

W tabeli 5.2 przedstawiono kształty wiórów uzyskanych w trakcie przeprowadzonych badań, w zależności od stosowanych parametrów skrawania.

Tabela 5.2. Kształty wiórów uzyskane w trakcie badań

$v_c$ m/s	$f_z = 0,1$ mm/ostrze	$f_z = 0,2$ mm/ostrze	$f_z = 0,3$ mm/ostrze	$f_z = 0,4$ mm/ostrze	$f_z = 0,5$ mm/ostrze
0,24					
0,48					
0,73					
0,97					

Dysponując wiórami, przeprowadzono pomiar grubości wióra  $h_{ch}$  na mikroskopie optycznym. Na rysunku 5.8 przedstawiono przykładowy widok pomiaru grubości wióra uzyskanego w trakcie badań.



Rys. 5.8. Pomiar grubości wióra; a, b – objaśnienia w tekście [160]

Współczynnik spęczenia wióra ( $\Lambda_h$ ) może być wykorzystywany bezpośrednio do wyznaczenia kąta ścinania. Długość strefy ścinania  $l_{sh}$  jest przeciwprostokątną AC dwóch trójkątów: ABC i ACD (rys. 5.7) stąd (5.3):

$$l_{sh} = \frac{h}{\sin\phi} = \frac{h_{ch}}{\cos(\phi - \gamma_o)} \quad (5.3)$$

Wyznaczając z powyższego równania  $\Lambda_h$  oraz uwzględniając (5.4):

$$\cos(\phi - \gamma_o) = \sin\phi\sin\gamma_o + \cos\phi\cos\gamma_o \quad (5.4)$$

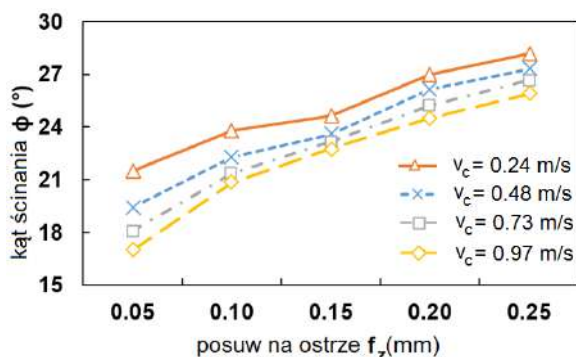
otrzymuje się (5.5):

$$\Lambda_h = \frac{h_{ch}}{h} = \sin\gamma_o + \frac{1}{\operatorname{tg}\phi} \cos\gamma_o \quad (5.5)$$

co da się przekształcić do poszukiwanej zależności kąta ścinania od współczynnika śpęczenia wióra (5.6):

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{\cos\gamma_o}{\Lambda_h - \sin\gamma_o} \quad (5.6)$$

Rysunek 5.9 przedstawia przebiegi zmienności kąta ścinania w zależności od prędkości skrawania i posuwu. Na wartość kąta ścinania istotny wpływ ma wartość posuwu jak i prędkości skrawania. Ze wzrostem wartości posuwu wzrasta wartość kąta ścinania. Natomiast wpływ prędkości skrawania na ten kąt jest odwrotny w odniesieniu do wpływu wartości posuwu.

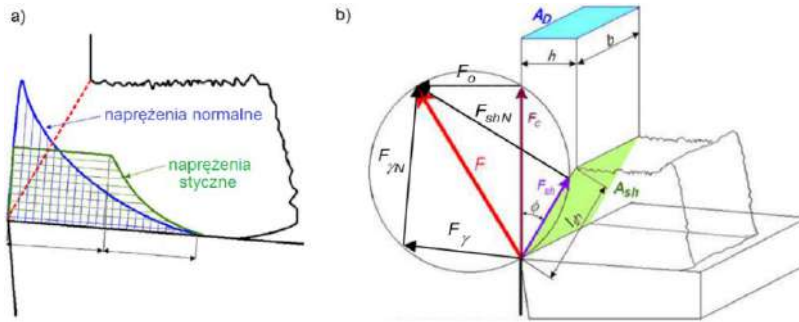


Rys. 5.9. Zależność kąta ścinania od wartości posuwu na ostrze [160]

### Siły w strefie skrawania

Wypadkowa siła skrawania  $F$  działająca na ostrze wiertła może być rozłożona na dwie składowe: składową  $F_c$  i prostopadłą do krawędzi skrawającej w płaszczyźnie ortogonalnej  $F_o$  (rys. 5.10b).

Na rys. 5.10a przedstawiono schematycznie rozkład naprężeń normalnych i stycznych na powierzchni natarcia przy skrawaniu swobodnym (w płaszczyźnie ortogonalnej).



Rys. 5.10. Rozkład sił w strefie skrawania; a, b – objaśnienia w tekście [160]

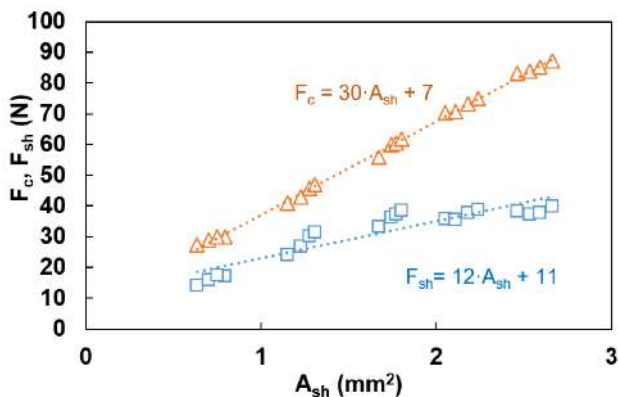
Naprężenia normalne, najwyższe w pobliżu krawędzi skrawającej, opadają wykładniczo wraz z oddalaniem się od tej krawędzi. Naprężenia styczne są w przybliżeniu jednakowe wzdłuż strefy wtórnego ścinania, a następnie opadają wzdłuż strefy poślizgu. Można je umownie zastąpić siłami skupionymi na krawędzi skrawającej: styczną do powierzchni natarcia  $F_{\gamma}$ , i normalną do powierzchni natarcia  $F_{\gamma N}$ . W sumie składają się one na wypadkową siłę skrawania  $F$ . Oddziaływanie narzędzia na wiór przenosi się na jego nasadę, czyli na powierzchnię ścinania, w której występują naprężenia ścinające i normalne. Te z kolei można umownie zastąpić skupioną siłą ścinania (styczną do powierzchni ścinania)  $F_{sh}$  i normalną do tej powierzchni  $F_{shN}$ . Oczywiście te siły również w sumie dają wypadkową siłę skrawania  $F$ .

Obserwując oddziaływanie narzędzia na przedmiot obrabiany „z zewnątrz” czyli w układzie narzędzia, wygodnie jest rozłożyć wypadkową siłę skrawania  $F$  na siłę główną  $F_c$  działającą w kierunku prędkości skrawania i prostopadłą do niej oraz do płaszczyzny stycznej siłę ortogonalną  $F_o$ . Kreśląc okrąg (Model Merchanta), którego średnicą jest wektor wypadkowej siły skrawania, łatwo można narysować wszystkie trzy omówione rozkłady tej siły na prostopadłe do siebie składowe (rys. 5.10b).

Szczególnie interesujące jest przeanalizowanie zależności siły ścinania  $F_{sh}$  od pola powierzchni ścinania. Siła ta jest związana z siłami działającymi w układzie narzędzia zależnością (5.7):

$$F_{sh} = F_c \cos \phi - F_o \sin \phi \quad (5.7)$$

Obserwując wyniki pomiarów siły ścinania  $F_{sh}$  w funkcji pola powierzchni ścinania  $A_{sh}$ , można zauważyć, że układają się one wzdłuż prostej (rys. 5.11).



Rys. 5.11. Zależność głównej siły skrawania i siły ścinania od pola powierzchni ścinania [160]

Współczynnik nachylenia tej prostej określa się jako tzw. opór ścinania  $k_{sh}$ , który w tym przypadku wynosi  $12 \text{ N/mm}^2$ . Zmienia się on bardzo nieznacznie w badanym zakresie parametrów skrawania. Można go zatem w pewnym przybliżeniu uznać za stałą materiałową. Omawiana prosta (rys. 5.11) nie wychodzi jednak z początku układu współrzędnych. Oznacza to występowanie składowej niezależnej od pola powierzchni ścinania. Jest to tzw. siła „rozcinająca” przyłożona do krawędzi skrawającej oraz zależna od właściwości materiału obrabianego. Siłę ścinania można zatem opisać zależnością (5.8):

$$F_{sh} = F_{shk} + k_{sh}A_{sh} \quad (5.8)$$

gdzie:  $F_{shk}$  – siła działająca na czynną część krawędzi skrawającej w kierunku równoległym do płaszczyzny ścinania  $N$ .

Analogiczne równanie można przedstawić dla głównej składowej siły skrawania  $F_c$  (5.9):

$$F_c = F_{ck} + k_{shc}A_{sh} \quad (5.9)$$

gdzie:  $F_{ck}$  – siła działająca na czynną część krawędzi skrawającej w kierunku prędkości skrawania  $N$ ,  $k_{shc}$  – główny opór ścinania (współczynnik kierunkowy prostej  $F_c$ - $A_{sh}$ )  $N/\text{mm}^2$ .

Można zaobserwować że, główny opór ścinania ( $k_{shc}$ ), który w analizowanym przypadku wynosi  $30 \text{ N/mm}^2$ , jest podobnie jak opór ścinania ( $k_{sh}$ ) w przybliżeniu stałą materiałową. Stosunek  $k_{shc}/k_{sh}$  jest więc również stały dla danego materiału obrabianego i można go przyjąć jako indeks skrawalności.

Pole powierzchni ścinania będąc iloczynem szerokości warstwy skrawanej  $b$  i długości strefy ścinania  $l_{sh}$ , zależy od pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej  $A_D$  (grubości i szerokości tej warstwy) oraz kąta ścinania  $\phi$  (rys. 5.10b).

Można je zatem opisać zależnością (5.10):

$$A_{sh} = bl_{sh} = b \frac{h}{\sin\phi} \quad (5.10)$$

Podstawiając (5.10) do (5.9) otrzymuje się (5.11):

$$F_c = F_{ck} + \frac{A_D k_{shc}}{\sin\phi} \quad (5.11)$$

Tak więc siła skrawania zależy od wymiarów warstwy skrawanej i właściwości materiału obrabianego (co dość oczywiste) oraz od kąta ścinania.

O ile wartości  $k_{shc}$  zmieniają się wraz z materiałem obrabianym w stosunkowo niewielkim stopniu (podobnie jak  $k_{sh}$ ), o tyle kąt ścinania bardzo mocno zależy od warunków skrawania i w znacznie większym stopniu niż opory ścinania wpływa na siłę skrawania.

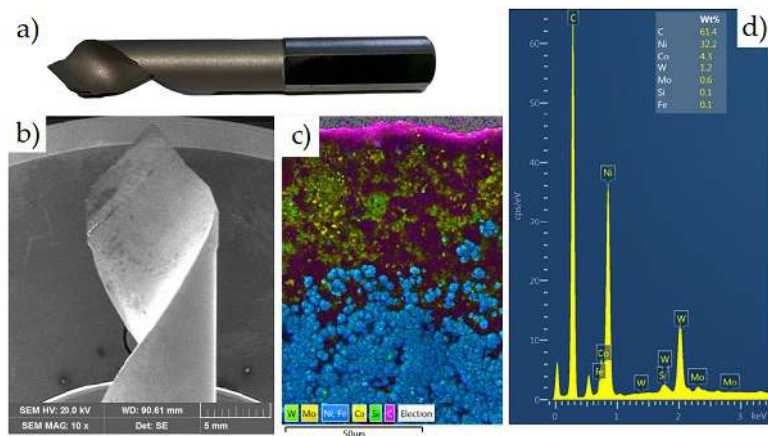
### 5.3. Opór właściwy skrawania

Jednym ze wskaźników skrawalności jest jednostkowy opór skrawania  $k_{c1.1}$ . Zaproponowano tutaj sposoby identyfikacji materiału w procesie wiercenia, celem automatycznego dostosowywania parametrów skrawania, w trakcie trwania obróbki na podstawie sygnałów siły, momentu skrawania oraz sygnałów przyspieszenia. Zaproponowano nowatorską metodę wyznaczania wartości jednostkowego oporu skrawania  $k_{c1.1}$ . Uzyskane wyniki posłużyły do wyznaczenia indeksu skrawalności. Wyniki uzyskane podczas badań wykazały, że zarówno wybrane miary sygnałów w dziedzinie czasu i częstotliwości oraz jednostkowy opór skrawania jest stały dla danego przedmiotu obrabianego i nie zależy od parametrów skrawania.

#### 5.3.1. Metodyka badań

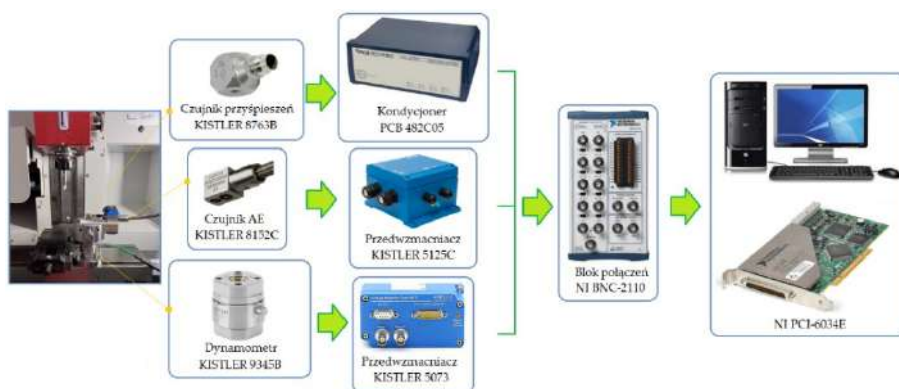
W badaniach zastosowano typowe narzędzie skrawające przeznaczone do materiałów drewnopochodnych wiertło jednoostrzowe o średnicy 10 mm z ostrzami z Polycrystalline Diamond (PCD) firmy Leit Diamaster PRO. Oznaczenie wiertła to: DP/D10/NL30/S10x27/GL70/RL. Wiertło to znajduje swoje zastosowanie w obróbce materiałów takich jak: drewno, płyty wiórowe, płyty żywiczne, tworzywa sztuczne, tworzywa sztuczne wzmocnione.

Podobnie jak w przypadku materiału obrabianego, za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego TESCAN przeprowadzono analizę spektralną pierwiastków wchodzących w skład materiału narzędzia skrawającego (rys. 5.12). Po wykonanej analizie EDS można zauważyć, że dominującymi pierwiastkami są: węgiel, nikiel, kobalt i wolfram.



Rys. 5.12. Narzędzie skrawające: a) wiertło, b) wiertło w powiększeniu x10, c) mapa pierwiastków, d) analiza spektralna pierwiastków [159]

Proces wiercenia przeprowadzono na frezarce pionowej CNC firmy EMCO. Schematyczny diagram konfiguracji toru pomiarowego i systemu archiwizacji danych pomiarowych przedstawiono na rys. 5.13. W trakcie procesu wiercenia rejestrowano pochodzące ze strefy skrawania sygnały przyspieszeń na kierunkach:  $a_x$ ,  $a_y$  i  $a_z$ , sygnał siły osiowej  $F_t$  i momentu skrawania  $M_c$  oraz dodatkowo sygnał emisji akustycznej  $AE_{RMS}$  o stałej całkującej  $\tau = 0,12$  ms.



Rys. 5.13. Konfiguracja eksperymentalna i schemat systemu akwizycji danych [159]

W ramach przeprowadzonych badań w próbkach (płyta MDF laminowana, płyta wiórowa laminowana, sklejka) o wymiarach 130×30×18 (10 HPL) mm wyciętych z materiałów obrabianych (rys. 3.28) wiercono otwory na frezarce CNC. Wartość sygnału przyspieszenia na trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach mierzono za pomocą piezoelektrycznego czujnika przyspieszeń KISTLER 8763B, który zamocowano na przedmiocie obrabianym (rys. 5.13). Sygnały siły osiowej

$F_t$  i momentu skrawania  $M_c$  mierzono za pomocą czujnika KISTLER 9345B. Natomiast sygnał emisji akustycznej mierzono za pomocą czujnika KISTLER 8152C. Sygnały pochodzące z czujników rejestrowane były na dysku twardym komputera osobistego (PC) w postaci cyfrowej za pośrednictwem karty analogowo-cyfrowej National Instruments 6034E. Częstotliwość próbkowania sygnałów podczas prowadzonych eksperymentów wynosiła 50 kHz., a rozdzielczość pomiarowa karty 16 bitów.

W tabelach 5.3 i 5.4 zestawiono parametry skrawania stosowane podczas przeprowadzonych eksperymentów wiercenia. Dla każdego z zestawów parametrów skrawania wykonano trzy powtórzenia. Badania podzielono na dwie grupy. W pierwszej grupie wiercono otwory w pełnym materiale z parametrami przedstawionymi w tab. 5.3, rejestrując wszystkie sygnały (rys. 5.13) mierzone w trakcie procesu skrawania.

Tabela 5.3. Parametry skrawania dla wiercenia

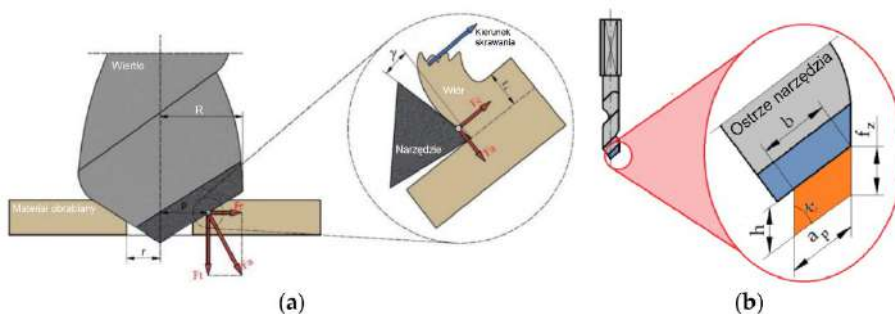
Prędkość skrawania m/min	Posuw na ostrze mm/ostrze	Prędkość posuwu mm/min	Prędkość obrotowa wiertła obr/min
	0,15	375	
78	0,20	450	2500
	0,25	525	
	0,15	500	
94	0,20	600	3000
	0,25	700	
	0,15	625	
109	0,20	750	3500
	0,25	875	

Natomiast w grupie drugiej badań (tab. 5.4) prowadzono powiercanie wiertłem o średnicy 10 mm, po wcześniejszym wywierceniu otworu w materiale wiertłem o średnicy 3 mm. W tym przypadku rejestrowano tylko sygnały siły osiowej  $F_t$  i momentu skrawania  $M_c$ . Wyżej opisana metodyka badań była powtarzana dla wszystkich czterech rodzajów materiałów obrabianych w obu grupach przyjętych parametrów skrawania. Pozwoliło to, na doświadczalne wyznaczenie oporów skrawania.

Tabela 5.4. Parametry skrawania dla powiercania

Grubość warstwy skrawanej mm	Posuw na ostrze mm/ostrze	Prędkość posuwu mm/min
0,05	0,07	177
0,10	0,14	354
0,15	0,21	530
0,20	0,28	707
0,25	0,35	884
0,30	0,42	1061
0,35	0,49	1237

Na rysunku 5.14 przedstawiono rozkład sił i momentu skrawania podczas powiercania.



Rys. 5.14. Powiercanie – rozkład sił; a, b – objaśnienia w tekście [159]

### 5.3.2. Analiza wyników

Siły działające w strefie ścinania nie zależą bezpośrednio od narzędzia, a jedynie od materiału obrabianego, więc warto spróbować określić tę zależność. Obserwując wyniki pomiarów siły równoległej do płaszczyzny ścinania  $F_s$ , oraz siły skrawania  $F_c$ , przypadających na jeden milimetr szerokości warstwy skrawanej, w funkcji długości powierzchni ścinania  $l_s$ , Das i Tobias [259] zauważyli, że układają się one wzdłuż prostej w szerokim zakresie parametrów skrawania, geometrii i materiału ostrza oraz innych warunków skrawania, zależąc

jedynie od materiału obrabianego. Równania prostych można przedstawić w postaci (5.12) i (5.13) [160]:

$$F_s = F_{sw} + F_{sk} = k_{sw}A_s + K_{sk}b \quad (5.12)$$

$$F_c = F_{cw} + F_{ck} = k_{cw}A_s + K_{ck}b \quad (5.13)$$

gdzie:  $A_s = bl_s$  – pole płaszczyzny ścinania,  $K_{sk}$  – jednostkowa (przypadająca na 1 mm długości krawędzi skrawającej) siła rozcinająca, zrzutowana na kierunek płaszczyzny ścinania,  $k_{sw}$  – jednostkowa (przypadająca na 1 mm<sup>2</sup> pola powierzchni ścinania) siła ścinania – opór właściwy ścinania,  $K_{ck}$  – jednostkowa (przypadająca na 1 mm długości krawędzi skrawającej) siła rozcinająca, zrzutowana na kierunek prędkości skrawania,  $k_{cw}$  – jednostkowa (przypadająca na 1 mm<sup>2</sup> pola powierzchni ścinania) siła skrawania – główny opór ścinania.

Jak można było się spodziewać, siły rozcinające są proporcjonalne do długości krawędzi skrawającej (równej szerokości warstwy skrawanej  $b$ ) zaś siły pochodzące od procesu zamiany warstwy skrawanej w wiór są proporcjonalne do pola powierzchni ścinania – tak jak przy wytrzymałości na zginanie, ścinanie itd. Opór właściwy ścinania  $k_{sw}$  można zatem w pewnym przybliżeniu uznać za stałą materiałową [118].

Główny opór ścinania  $k_{cw}$  jest, podobnie jak opór ścinania  $k_{sw}$ , w przybliżeniu stałą materiałową. Stosunek  $k_{cw}/k_{sw}$  jest więc również stały dla danego materiału obrabianego, a stały stosunek współczynników nachylenia został nazwany uniwersalnym wskaźnikiem skrawalności (ang. Universal Machinability Index) zgodnie z równaniem (5.14) [160]:

$$D = \frac{k_{cw}}{k_{sw}} = \text{const} \quad (5.14)$$

Pole płaszczyzny ścinania zależy od pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej (grubości i szerokości tej warstwy) oraz kąta ścinania  $\phi$  (5.10) [160]. Podstawiając (5.10) do (5.13), otrzymujemy wzór fizyczny na siłę skrawania (5.15):

$$F_c = F_{cw} + F_{ck} = bh \frac{k_{cw}}{\sin\phi} + bK_{ck} \quad (5.15)$$

Siła ortogonalna jest zgodnie z modelem Dasa i Tobiasa opisana zależnością (5.16) [160]:

$$F_o = \frac{D \cos\phi - 1}{D \sin\phi} \quad (5.16)$$

Opór właściwy skrawania definiowany jest jako stosunek głównej składowej siły  $F_c$  skrawania do pola powierzchni przekroju poprzecznego warstwy skrawanej  $A_D$ , zgodnie z zależnością (5.17):

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad (5.17)$$

Aby zrozumieć zależność oporu właściwego skrawania od grubości warstwy skrawanej należy podstawić wzór fizyczny na siłę skrawania (5.15). Jak widać, opór właściwy skrawania składał się będzie z dwóch składowych (5.18):

$$k_c = \frac{K_{ck}}{h} + \frac{k_{cw}}{\sin\emptyset} = k_{c1} + k_{c2} \quad (5.18)$$

Pierwsza z nich, będąc ilorazem stosunkowo niewielkiej wartości ( $K_{ck}$  siła przypadająca na jeden milimetr czynnej długości krawędzi skrawającej) do grubości warstwy skrawanej ( $h$ ) odgrywa istotną rolę jedynie przy małych grubościach. Dla większych grubości warstwy skrawanej, składowa ta jest nieznaczna, a główną rolę odgrywa druga składowa zależna od kąta ścinania. Jak wiadomo, kąt ścinania rośnie wraz z grubością warstwy skrawanej, co pociąga za sobą nieznaczny spadek oporu ścinania. Oczywiście oporu właściwego skrawania nie wyznacza się z zależności (5.18), lecz doświadczalnie, bezpośrednio z zależności (5.17), wraz z aproksymacjami funkcją potęgową. Funkcja potęgowa, jaką zastosowano do aproksymacji zależności  $k_c(h)$  ma ogólnie postać (5.19):

$$k_c = k_{c1.1} h^{-m_c} \quad (5.19)$$

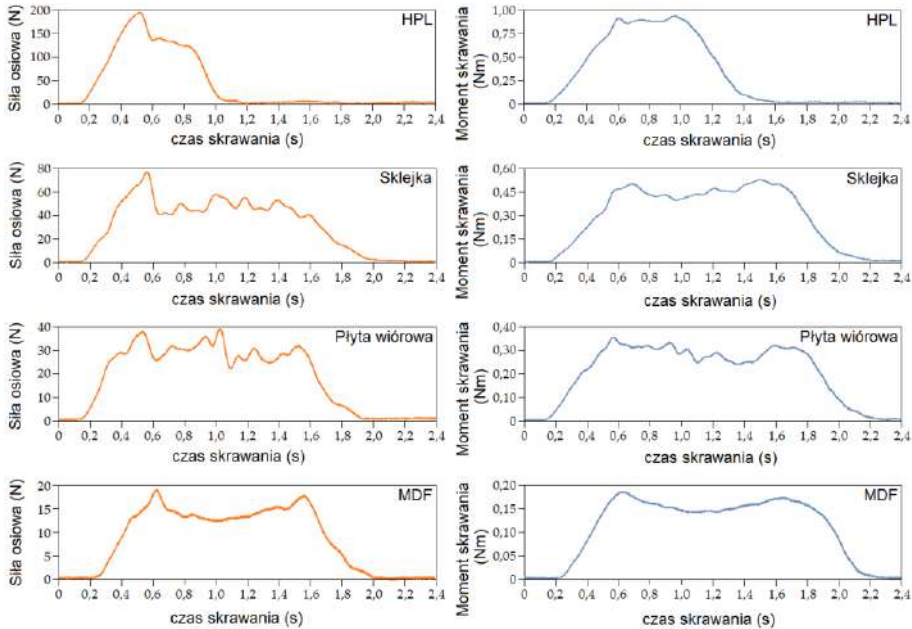
gdzie:  $k_{c1.1}$  – siła skrawania potrzebna do usunięcia warstwy skrawanej o grubości  $h = 1$  mm i szerokości  $b = 1$  mm (jednostkowa siła skrawania),  $m_c$  – wykładnik określany doświadczalnie metodą najmniejszych kwadratów na podstawie wyników pomiarów siły w funkcji grubości warstwy skrawanej.

Podstawiając wzór (5.19) do (5.17) otrzymuje się inżynierską zależność na siłę skrawania, tzw. równanie Kienzle (5.20) [260]:

$$F_c = k_{c1.1} b h^{1-m_c} = k_{c1.1} b h^{y_c} \quad (5.20)$$

Z tej właśnie zależności korzysta inżynier przy wyznaczaniu np. mocy skrawania przy doborze obrabiarki, stałe do wzoru biorąc z dostępnych katalogów, poradników czy kalkulatorów internetowych, oferowanych przez producentów narzędzi. Wzór ten może być stosowany niezależnie od rodzaju obróbki i geometrii ostrza, co stanowi o jego uniwersalności i przydatności.

Analizując przebieg siły osiowej  $F_t$  i momentu skrawania  $M_c$  zarejestrowane w trakcie przeprowadzonych badań (rys. 5.15), można zauważyć, że w sygnałach występują charakterystyczne fragmenty, a więc wejścia i wyjścia narzędzia z materiału, w których wartość sygnału siły osiowej i momentu skrawania charakterystycznie odpowiednio wzrasta lub maleje.



Rys. 5.15. Przykładowe przebiegi sygnałów siły osiowej i momentu skrawania dla czterech obrabianych materiałów [159]

Można wyróżnić w sygnale fluktuacje siły, związane z przejściem ostrza skrawającego przez warstwy materiału obrabianego o różnej gęstości. Zauważono, że podczas wiercenia można wyodrębnić charakterystyczne fragmenty sygnału wartości siły osiowej  $F_t$ . Fragment pierwszy to obszar, w którym wiertło wchodzi w materiał obrabiany, następuje przyrost wartości siły osiowej. Ma miejsce przypadek w którym ostrze wiertła dociska materiał obrabiany (tuż przed rozpoczęciem skrawania). Następnie wiertło zaczyna skrawać warstwę zewnętrzną materiału o największej gęstości. W przypadku płyty HPL nie występuje taka sytuacja, gdyż gęstość materiału jest zbliżona w całym przekroju poprzecznym płyty. Gdy wiertło opuszcza obszar materiału o podwyższonej gęstości, następuje spadek wartości siły z uwagi, że wiertło skrawa w warstwie środkowej o mniejszej gęstości. Następnie występuje fragment sygnału, w którym wiertło zagłębia się na głębokość równą wysokości ostrzy skrawających. To skrawanie ze stałym przekrojem warstwy skrawanej w warstwie środkowej płyty. Występuje tu stabilizacja wartości siły osiowej. Na początku kolejnego fragmentu sygnału, wartość siły osiowej zaczyna rosnąć z uwagi, że wiertło zaczyna wchodzić w zewnętrzną warstwę materiału o większej gęstości. Wartość siły osiowej spada do zera na końcu ostatniego fragmentu sygnału, gdy wiertło już wychodzi z materiału obrabianego.

W przypadku momentu skrawania  $M_c$ , można wyróżnić fragment sygnału, w którym nie występuje skrawanie, a jedynie ostrze wciskane jest w materiał obrabiany. W tym fragmencie sygnału wartość momentu skrawania jest bliska zera.

Następnie występuje zagłębienie wiertła w materiał obrabiany co skutkuje wzrostem wartości momentu skrawania. Okres tego wzrostu trwa do chwili osiągnięcia przez wiertło maksymalnego przekroju warstwy skrawanej. Kolejny fragment sygnału to skrawanie ze stałym przekrojem warstwy skrawanej w warstwie środkowej płyty. Występuje tu stabilizacja wartości momentu skrawania. W kolejnym fragmencie sygnału, podobnie jak w przypadku siły osiowej, wartość momentu skrawania zaczyna wzrastać. Jest to podyktowane tym, że wiertło zaczyna wchodzić w zewnętrzną warstwę materiału o zwiększonej gęstości. Kiedy wiertło zaczyna wychodzić z materiału obrabianego, wartość momentu skrawania zaczyna maleć. Wartość momentu skrawania spada do zera na końcu sygnału, gdy wiertło wychodzi z materiału obrabianego.

W przypadku wyznaczania oporów skrawania, należy wziąć pod uwagę wartości momentu skrawania  $M_c$  w przebiegu procesu wiercenia (rys. 5.15). W tym celu, opracowano aplikację (w programie LabVIEW) pozwalającą, z określonych miejsc sygnału, automatycznie wyznaczać wartość momentu skrawania.

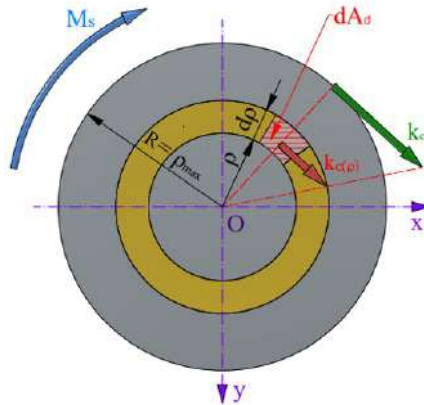
Stosując parametry skrawania przedstawione w tab. 5.4, przeprowadzono testy w procesie wiercenia dla czterech materiałów obrabianych. Na rysunku 1.6 przedstawiono przyjęty w badaniach rozkład sił występujący w procesie wiercenia. W analizowanym przypadku będzie występować wyłącznie jeden wektor siły  $F_c$  wynikający z geometrii wiertła przedstawionego na rys. 5.12a (jedno ostrze skrawające).

Jak już wcześniej wspomiano, opór właściwy skrawania definiowany jest jako iloraz siły skrawania do pola poprzecznego przekroju warstwy skrawanej (5.17) i z tej zależności jest on doświadczalnie wyprowadzany. Do określenia parametrów oporu skrawania  $k_c$  dla badanych materiałów konieczne było określenie chwilowej wartości momentu skrawania  $M_c$  występującego w procesie wiercenia.

Pole przekroju warstwy skrawanej, w zależności od zastosowanych wartości prędkości posuwu było zmienne. Stała pozostawała cały czas szerokość skrawania  $b$ , natomiast grubość warstwy skrawanej zmieniała się w zależności od parametrów wiercenia, dlatego też przed wyznaczeniem oporu właściwego, należało wyliczyć pola powierzchni warstwy skrawanej dla wszystkich prób wiercenia z równania (5.21):

$$A_D = hb \quad (5.21)$$

Znając wartości siły skrawania  $F_c$  i pola przekroju warstwy skrawanej  $A_D$  wyznaczono wartości oporu właściwego skrawania przy danych parametrach wiercenia dla wszystkich badanych materiałów. W tym celu opisano rozkład wartości oporu skrawania w zależności od rozpatrywanego punktu na krawędzi skrawającej (rys. 5.16).



Rys. 5.16. Rozkład oporu skrawania wzdłuż krawędzi skrawającej wiertła [159]

Jak wynika z rys. 5.16, opór skrawania  $k_{c(\rho)}$  działający na nieskończenie małym elemencie  $dA_d$  przekroju poprzecznego krawędzi skrawającej wiertła daje elementarny moment  $dM_s$  względem osi wiertła (5.22):

$$dM_s = k_{c(\rho)} \rho dA_d \quad (5.22)$$

gdzie:  $k_{c(\rho)}$  – pór skrawania na promieniu  $\rho$ ,  $\rho$  – rozpatrywany promień,  $dA_d$  – elementarne pole warstwy skrawanej.

Z warunków równowagi wynika, że suma tych elementarnych momentów zebrana z całej długości krawędzi skrawającej wiertła musi być równa momentowi  $M_c$  działającemu na wiertło (5.23):

$$M_s = \int_{A_d} dM_s = \int_{A_d} k_{c(\rho)} \rho dA_d \quad (5.23)$$

Uwzględniając rozkład oporu skrawania wzdłuż krawędzi skrawającej wiertła (5.24):

$$\frac{k_{c(\rho)}}{k_c} = \frac{\rho}{\rho_{\max}} \quad (5.24)$$

wyznacza się  $k_{c(\rho)}$  i po podstawieniu do wzoru (5.23) otrzymuje się (5.25):

$$M_s = \int_{A_d} k_c \frac{\rho}{\rho_{\max}} \rho dA \quad (5.25)$$

Promień  $R$  jako stały dla całego obszaru całkowania oraz maksymalny opór skrawania  $k_c$  można wynieść przed znak całki, a wówczas (5.26):

$$M_s = \frac{k_c}{\rho_{\max}} \int_{A_d} \rho^2 \cdot dA \quad (5.26)$$

Elementarne pole powierzchni  $dA_d$  można wyrazić jako (5.27):

$$dA_d = d\rho \cdot h \quad (5.27)$$

Podstawiając zależność (5.27) do wyrażenia (5.26), otrzymuje się (5.28):

$$M_s = \frac{k_c \cdot h}{\rho_{\max}} \int_r^R \rho^2 \cdot d\rho \quad (5.28)$$

Promień  $\rho_{\max}$  równy jest w analizowanym przypadku promieniowi wiertła, a wówczas (5.29):

$$M_s = \frac{k_c \cdot h}{R} \int_r^R \rho^2 \cdot d\rho \quad (5.29)$$

Całkując wyrażenie (5.29), otrzymuje się (5.30):

$$M_s = \frac{k_c \cdot h}{3 \cdot R} (R^3 - r^3) \quad (5.30)$$

Po przekształceniu wyrażenia (5.30), otrzymuje się zależność określającą opór skrawania (5.31):

$$k_c = \frac{3 \cdot M_s \cdot R}{h \cdot (R^3 - r^3)} \quad (5.31)$$

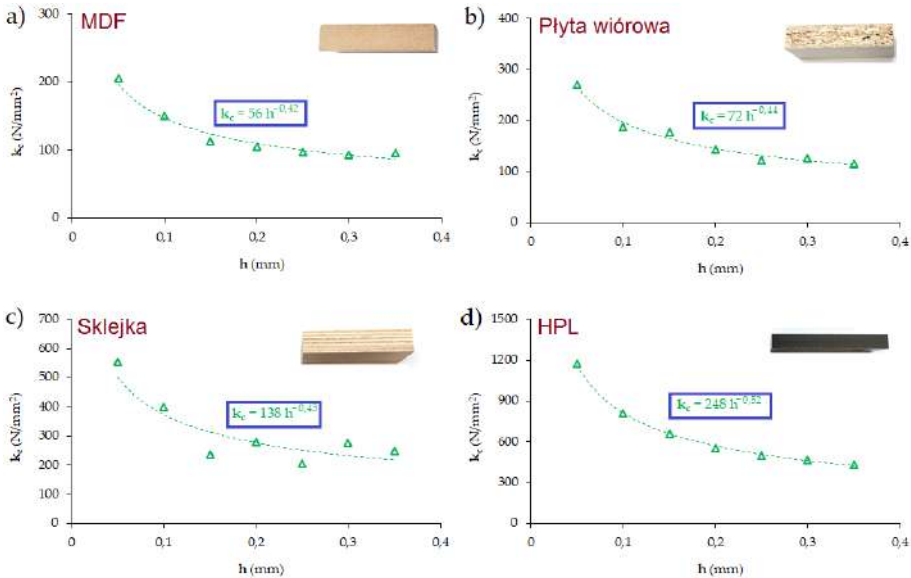
Procedura wyznaczania oporu skrawania z równania (5.31) została powtórzona dla wszystkich badanych materiałów. W takim wypadku możliwe, było uzyskanie dla każdego badanego materiału, wartości jednostkowego oporu skrawania  $k_{c1.1}$  oraz wykładnika  $m_c$  (5.19).

Tabela 5.5. Wartość jednostkowego oporu skrawania  $k_{c1.1}$  oraz wykładnika  $m_c$

Material obrabiany	$k_{c1.1}$ N/mm <sup>2</sup>	$m_c$
MDF	56	-0,42
Płyta wiórowa	72	-0,44
Sklejka	138	-0,43
HPL	248	-0,52

W tabeli 5.5 przedstawiono uzyskane wartości jednostkowego oporu skrawania wyznaczone w przeprowadzonych badaniach. Jak można zaobserwować, wartość jednostkowego oporu skrawania jest silnie zależna od materiału obrabianego.

Poniżej przedstawiono wykresy wraz z uzyskanymi wynikami (rys. 5.17).



Rys. 5.17. Jednostkowy opór skrawania w procesie wiercenia wyznaczony dla: a) MDF, b) płyta wiórowa, c) sklejka, d) HPL [159]

Znajomość wartości jednostkowego oporu skrawania pozwala na wyznaczenie wartości siły  $F_c$  na podstawie równanie Kienzle (5.20).

## 5.4. Podsumowanie

W badaniach dotyczących skrawalności zaobserwowano, że prędkość posuwu ma istotny wpływ na wartość siły osiowej  $F_t$  i momentu skrawania  $M_c$ . Wartość siły skrawania  $F_c$  w procesie wiercenia MDF zależy od wymiarów warstwy skrawającej, właściwości materiału obrabianego i kąta ścinania. Zarówno posuw, jak i prędkość skrawania mają wyraźny wpływ na kąt ścinania podczas procesu wiercenia. Wzrost wartości posuwu na ostrze powoduje wzrost kąta ścinania, a wzrost prędkości skrawania zmniejsza kąt ścinania. Kąt ścinania w dużym stopniu zależy od siły stycznej do powierzchni natarcia. Z kolei siła ta jest funkcją warunków przepływu wióra na powierzchni natarcia, takich jak chropowatość powierzchni natarcia narzędzia i długość kontaktu narzędzia z wiórem.

## 6. ZASTOSOWANIE POWŁOK NA OSTRZA NARZĘDZI SKRAWAJĄCYCH

### 6.1. Wiadomości ogólne

W celu utrzymania stosunkowo długiego okresu trwałości ostrzy narzędzi skrawających używanych do obróbki płyt drewnopochodnych, niezbędne jest stosowanie narzędzi o dużej odporności na zużycie krawędzi ostrzy skrawających. Najbardziej powszechnie stosowane w obróbce materiałów drewnopochodnych są ostrza wykonane z węglika spiekanego lub ostrza diamentowe.

W literaturze można napotkać opis badań mających na celu zwiększenie trwałości ostrzy narzędzi skrawających w obróbce kompozytów drzewnych. Liczne eksperymenty koncentrują się na zwiększeniu trwałości ostrzy narzędzi skrawających poprzez nakładanie na powierzchni ostrzy różnych powłok zmniejszających ich zużycie [14, 157, 261, 262, 263, 264, 265]. Ta dziedzina badań rozwija się dynamicznie od niedawna. Zastosowanie narzędzi skrawających z nowymi powłokami wymaga jednak przeprowadzenia szeregu badań, w ramach których będzie oceniana między innymi jakość uzyskanej powierzchni obrobionej, temperatura skrawania oraz opory skrawania. Proces wiercenia metali jest szeroko przebadany, a wyniki tych badań są opisane w literaturze, natomiast procesowi wiercenia płyt drewnopochodnych nie poświęcono zbyt wiele uwagi [142, 160, 266, 267].

Gordon [268] przedstawił krótki przegląd prac dotyczących prognozowania sił skrawania w procesie skrawania płyt MDF. Prace te opisywały ogólną mechanikę procesu i model skrawania oparty na założeniach występujących w obróbce metali. W pracy [157] autorzy badali zastosowanie narzędzi z ostrzami z PCD (diament polikrystaliczny) w obróbce płyt MDF. Według nich główną korzyścią wynikającą z zastosowania PCD jest wydłużona trwałość ostrza, wynikająca z lepszych właściwości zastosowanego materiału w porównaniu z tradycyjnymi materiałami narzędziowymi. Davim [244] badał wpływ różnych parametrów skrawania na chropowatość powierzchni płyty MDF w procesie frezowania stosując narzędzia skrawające z ostrzami z węglika spiekanego bez pokryć. Podobne badania przeprowadził Sedlecký [266].

Szwajka i in. [142] prowadzili badania z zastosowaniem wiertła z węglika HW. Opracowali analityczny model do przewidywania wpływu parametrów wiercenia na siłę i stwierdzili, że wzrost prędkości posuwu zwiększa delaminację w płycie wiórowej.

Jakość obrabianej powierzchni MDF jest ważnym czynnikiem wpływającym na ostateczny wygląd produktu lub następujących po nim procesów technologicznych, takich jak klejenie (adhezja i kohezja), powlekanie, lakierowanie itp. [266, 269]. Chropowatość obrobionej powierzchni zależy od różnych czynników i wa-

runków [244, 267, 270], które można podzielić w następujący sposób: sposób obróbki (cięcie, frezowania, wiercenie, itp.) [37, 271, 272] parametry obróbki (prędkość skrawania, prędkość posuwu) [38, 131, 256, 273], narzędzie skrawające (geometria ostrza, zastosowane powłoki na ostrze skrawające), a także właściwości obrabianego materiału [269].

Nawet jeśli parametry obróbki są takie same, każdy sposób obróbki pozostawia charakterystyczne nierówności na powierzchni, na przykład powierzchnie cięte piłą różnią się od powierzchni frezowanych [274, 275]. Wymagania dotyczące chropowatości powierzchni określa się zgodnie z funkcjonalnym zastosowaniem przyszłego produktu [158, 276]. Chropowatość powierzchni jest określana przez podanie wartości liczbowej parametru lub kilku parametrów oraz wartości długości odcinka pomiarowego, dla którego określono ten parametr [266].

Lin i in. [158] opisali skrawalność płyt MDF. Używali kamery cyfrowej do nagrywania deformacji wiórów występującą przed krawędzią narzędzia skrawającego oraz mikroskopu elektronowego (SEM) w celu dodatkowej analizy powierzchni obrobionej. Badania wykazały, że różnice występujące w gęstości płyt mają ścisły związek z charakterystyką skrawalności.

Generowanie ciepła w procesie wiercenia ma bezpośredni wpływ na chropowatość powierzchni obrobionej, jakość otworu i morfologię wióra [277, 278]. Temperatura w obszarze kontaktu ostrza z materiałem skrawanym (drewnem lub materiałem drewnopochodnym) zależy od energii wydzielanej w tym obszarze oraz od skuteczności, z jaką wydzielane ciepło jest odprowadzane z tego obszaru. Obok promieniowania, przewodnictwo jest głównym mechanizmem odpowiedzialnym za odprowadzenie ciepła. Zważywszy na fakt, że przewodnictwo cieplne drewna oraz materiałów drewnopochodnych jest bardzo niskie, a stosowanie cieczy chłodzących jest wykluczone, elementem odpowiedzialnym za odprowadzenie ciepła jest narzędzie. Prowadzi to do niepożądanego wzrostu temperatury jego ostrza. Podczas procesu wiercenia najważniejszym czynnikiem wpływającym na wydajność narzędzia skrawającego jest temperatura powstająca pomiędzy ostrzem, a materiałem obrabianym.

W ramach badań określono wpływ rodzaju zastosowanych powłok ostrzy skrawających wiertła na wartość siły osiowej  $F_t$ , momentu skrawania  $M_c$ , temperatury narzędzia skrawającego  $T$  i chropowatość powierzchni otworu w procesie wiercenia płyty MDF. W badaniach zastosowano wiertła z węglika spiekane (HW): niepokrywane, z powłoką TiAlN oraz z powłoką ZrN. Pomiar wartości siły osiowej i momentu skrawania prowadzono z zastosowaniem przemysłowego czujnika piezoelektrycznego. Temperaturę ostrza narzędzia skrawającego w procesie wiercenia mierzono za pomocą przemysłowego układu do pomiaru temperatury z zastosowaniem termopary typu K.

Zaobserwowano, że wartość maksymalnej temperatury narzędzia w procesie wiercenia zależy nie tylko od prędkości skrawania i posuwu, ale także od rodzaju zastosowanego pokrycia ostrzy narzędzia skrawającego. Na wartość siły osiowej

i momentu skrawania istotnie wpływa wartość posuwu i rodzaj zastosowanego pokrycia narzędzia. Omówiono również wpływ zmiennej gęstości płyty na uzyskaną chropowatość powierzchni otworu i wynikający z tej zmienności przebieg wartości siły osiowej w czasie operacji. Analizę statystyczną otrzymanych wyników badań przeprowadzono z zastosowaniem wieloczynnikowej analizy wariancji ANOVA.

## 6.2. Metodyka badań

W badaniach dotyczących powłok stosowanych na narzędzia jako materiał obrabiany zastosowano komercyjną płytę MDF o grubości 18 mm. Wykonano pomiary własności mechanicznych i fizycznych obrabianego materiału. Wyniki uzyskanych badań przedstawiono w tab. 6.1. Płyta MDF charakteryzuje się wyraźnym zróżnicowaniem gęstości materiału na przekroju poprzecznym, co wynika z jej wielowarstwowej struktury.

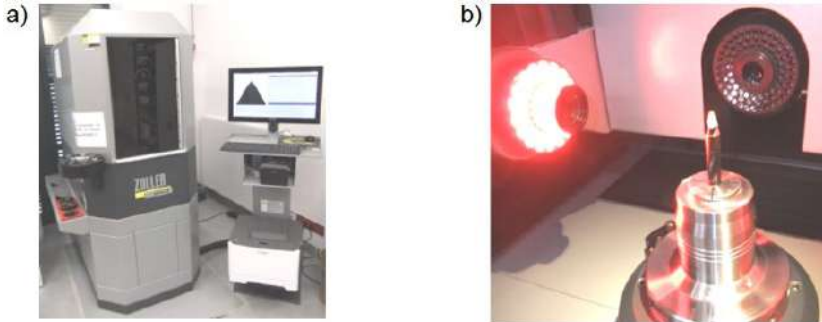
Tabela 6.1. Wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne płyt MDF

Gęstość kg/m <sup>3</sup>	Wilgotność %	Wytrzymałość na zginanie MPa	Moduł sprężystości MPa	Przewodność cieplna W/m K	Rozszerzalność cieplna μm/m K
742	7,2	38	2530	0,3	12

W badaniach postanowiono zastosować narzędzia skrawające z węgla spiekanego HW z różnymi rodzajami powłok ostrzy skrawających. Jako rodzaj powłoki ostrzy skrawających przyjęto: TiAlN oraz ZrN. Dobór powłok był podyktowany faktem, że należą one do najczęściej stosowanych w obróbce skrawaniem materiałów kompozytowych [279]. W przypadku skrawania materiałów drewnopochodnych występuje ogólny brak narzędzi skrawających dostępnych handlowo (zwłaszcza wiertła) z dodatkowymi powłokami ochronnymi. Chcąc dokonać pomiaru temperatury pomiędzy ostrzem skrawającym, a materiałem obrabianym z zastosowaniem termopar, konieczne było, aby narzędzie posiadało kanały na chłodziwo. Jak wiadomo, w obróbce MDF nie stosuje się cieczy chłodzących. Powyższe fakty wymusiły wykonanie dedykowanych narzędzi skrawających, które zastosowano w przeprowadzonych badaniach. W realizacji narzędzi wzorowano się na geometrii wiertła Leitz HW/D10/NL35/S10x24/GL70 mającego powszechne zastosowanie w procesie wiercenia płyt MDF do otworów przelotowych.

Na urządzeniu pomiarowym dokonano pomiaru wymiarów geometrycznych narzędzia wzorcowego, tak aby wykonać narzędzia identycznie ze wzorcowym lecz wykonanym z monolitu węgla spiekanego z kanałami na chłodziwo, które

następnie miały zostać pokryte dwoma różnymi powłokami. Do pomiaru zastosowano profesjonalną współrzędnościową maszynę pomiarową firmy Zoller model Genius 3 (rys. 6.1) służącą do pomiaru i kontroli geometrii narzędzi skrawających.

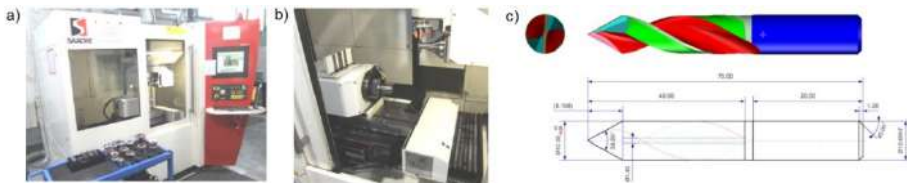


Rys. 6.1. Pomiar narzędzia skrawającego: a) współrzędnościowa maszyna pomiarowa Zoller Genius 3, b) układ optyczny i mocowanie w maszynie Zoller Genius 3 [156]

Komputerowo wspomagany projekt narzędzia został opracowany w programie Numroto Plus. Oprogramowanie Numroto Plus służy do projektowania obrotowych narzędzi skrawających generując gotowy model 3D (rys. 6.2c) po wcześniejszym zdefiniowaniu wszystkich wartości geometrycznych narzędzia skrawającego, dobraniu ściernic oraz rozmiaru półfabrykatu i ustawieniu parametrów procesu obróbki na szlifierce sterowanej numerycznie.

Do produkcji wiertel zastosowano ściernice diamentowe firmy Toolgal. Użyto 2 ściernice typu 1A1 oraz po jednej typu 11V9 i 12V9.

Gotowy projekt wykonany w programie Numroto Plus został wyeksportowany do obrabiarki. Maszyna na której zostały wykonane narzędzia według projektu jest to szlifierka 5-cio osiowa firmy Saacke model UW IF przedstawiona na (Rys. 6.2a, b).

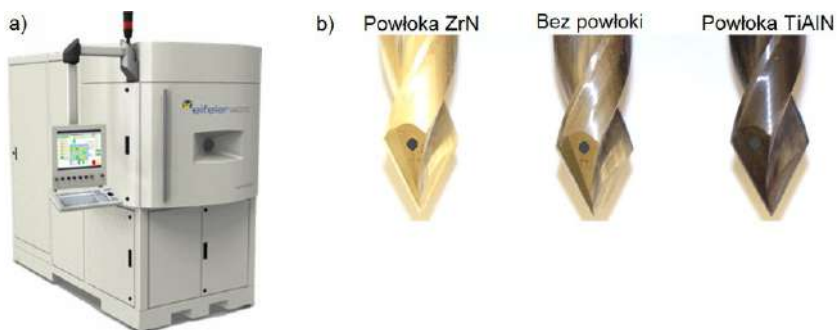


Rys. 6.2. Szlifierka z projektem wiertła: a) centrum szlifierskie CNC firmy SAACKE Model UW IF, b) przestrzeń robocza szlifierki, c) projekt wiertła w programie Numroto Plus [156]

Efektywnym sposobem zwiększania trwałości ostrzy narzędzi skrawających jest nanoszenie na nie powłok. Najczęściej stosowana jest w tym celu metoda PVD (Physical Vapour Deposition), polegająca na fizycznym osadzaniu cienkich warstw z fazy gazowej. Naniesiona warstwa o grubości zwykle rzędu 3-5  $\mu\text{m}$

posiada bardzo dużą twardość, najczęściej w granicach 2000-3000 HV, co znacznie zwiększa odporność ostrzy narzędzi na zużycie ściernie.

Na wykonane narzędzia skrawające zostały naniesione, metodą PVD, powłoki z azotku cyrkonu (ZrN) oraz azotku tytanu aluminium (TiAlN). W tym celu zastosowano reaktor próżniowy EIFELER VACOTEC PVD Alpha 400 (rys. 6.3a).



Rys. 6.3. Stanowisko do nakładania powłok: a) reaktor próżniowy EIFELER VACOTEC PVD Alpha 400, b) stosowane w badaniach wiertła z naniesionymi powłokami [156]

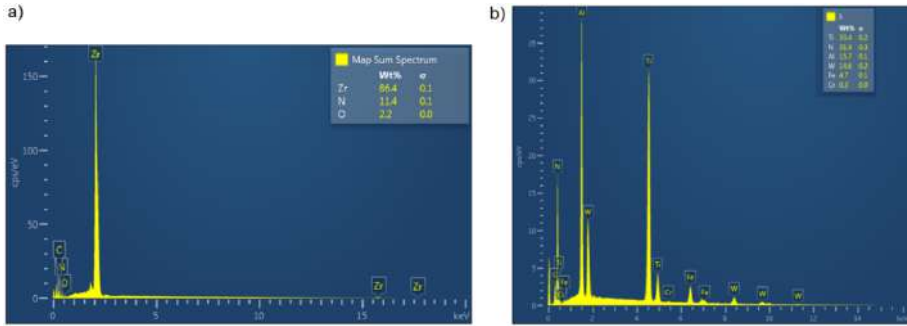
Powłoki te wykonywano na podłożu poddanym uprzednio rozpylaniu wysokoenergetycznymi jonami, wolnym od tlenków i wzbogaconym w pierwiastki tworzące mocne wiązanie adhezyjno – dyfuzyjne. W tabeli 6.2 zestawiono właściwości zastosowanych powłok.

Tabela 6.2. Wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne powłok

Rodzaj powłoki	Temperatura pokrywania °C	Twardość HV	Grubość μm	Współczynnik tarcia	Przewodność cieplna W/m K
ZrN	350-500	2200	2-3	0,4	0,28
TiAlN	400-500	3000	2-3	0,6	2,48

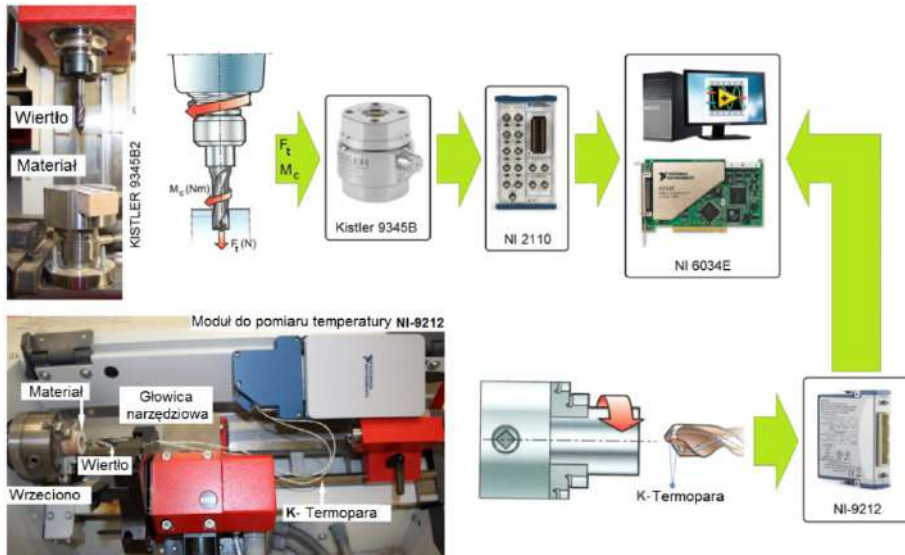
W efekcie, ze względu na rodzaj naniesionych powłok, uzyskano trzy rodzaje wiertel z kanałami na chłodziwo: wiertło z węgliku HW z powłoką ZrN, wiertło z węgliku HW bez powłoki i wiertło z węgliku HW z powłoką TiAlN (rys. 6.3b).

Za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego TESCAN przeprowadzono analizę spektralną pierwiastków wchodzących w skład zastosowanej powłoki (rys. 6.4).



Rys. 6.4. Wyniki analizy widmowej wiertel: a) powłoka wiertła ZrN, b) powłoka wiertła TiAlN [156]

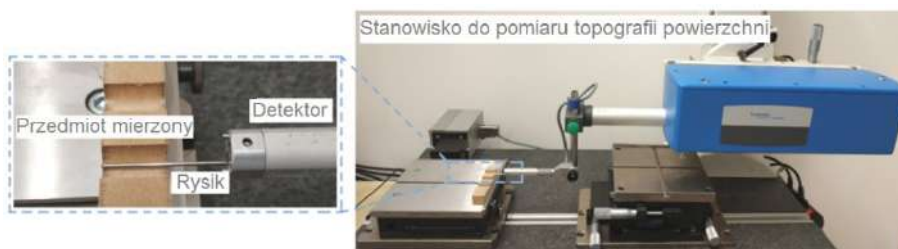
Proces wiercenia przeprowadzono dwuetapowo: na frezarce pionowej CNC oraz tokarce CNC firmy EMCO. Schematyczny diagram konfiguracji toru pomiarowego i systemu archiwizacji danych przedstawiono na rys. 6.5. W pierwszym etapie badań na frezarce CNC rejestrowano sygnały siły osiowej  $F_t$  i momentu skrawania  $M_c$  pochodzące ze strefy skrawania podczas obróbki płyty MDF.



Rys. 6.5. Konfiguracja toru pomiarowego i schemat systemu akwizycji danych [156]

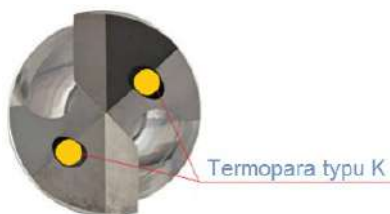
W ramach tego etapu wiercono po trzy otwory (z takim samym zestawem parametrów skrawania) w elementach MDF o wymiarach  $130 \times 30 \times 18$  mm. Wartość siły osiowej i momentu skrawania mierzono za pomocą piezoelektrycznego czujnika przemysłowego Kistler 9345B2. Sygnały pochodzące z czujnika rejestro-

wane były na dysku komputera osobistego (PC) w postaci cyfrowej za pośrednictwem karty analogowo-cyfrowej National Instruments 6034E. Częstotliwość próbkowania sygnałów podczas prowadzonych eksperymentów wynosiła 50 kHz, a rozdzielczość pomiarowa karty 16 bitów. Dla każdego wykonanego otworu, przeprowadzano pomiar uzyskanej topografii powierzchni z wykorzystaniem profilometru CNC Hommel-Etamic T8000RC. Pomiaru chropowatości dokonywano w dwóch miejscach (co  $180^\circ$ ) na powierzchni każdego z wywierconych otworów. W celu dokonania pomiaru chropowatości, przecinano badaną próbkę wzdłuż osi otworu na dwie części. Dla każdej części z osobna wykonywano jeden pomiar (rys. 6.6). W pomiarze chropowatości nie analizowano wpływu nacisku rysika na uzyskane wyniki, co może być istotne w takim miękkim materiale.



Rys. 6.6. Pomiar topografii powierzchni [156]

W ramach drugiego etapu wiercono otwory na tokarce CNC (z takim samym zestawem parametrów skrawania) w elementach MDF o średnicy 30 mm i grubości 18 mm. Na tym stanowisku badawczym, mierzono wartości temperatury podczas obróbki pomiędzy ostrzem skrawającym a materiałem obrabianym za pomocą przemysłowego układu National Instruments 9212. Do pomiaru temperatury zastosowano przewody termoparowe typu K o średnicy  $2 \times 0,2$  mm. Przewody termoparowe zamocowano w kanałach więtła na ciecz chłodzącą (rys. 6.7). Sygnały pochodzące z układu pomiarowego rejestrowane były na dysku komputera osobistego (PC) w postaci cyfrowej. Częstotliwość próbkowania sygnałów podczas prowadzonych eksperymentów wynosiła 5 Hz, a rozdzielczość pomiarowa karty 24 bity.



Rys. 6.7. Wiertło z zainstalowanymi termoparami

W tabeli 6.3 zestawiono parametry skrawania stosowane podczas przeprowadzonych eksperymentów wiercenia. Dla każdego z zestawów parametrów skrawania wykonano trzy powtórzenia. Taką metodykę badań stosowano dla wiertła bez powłoki, z powłoką ZrN i TiAlN.

Tabela 6.3. Parametry obróbki

Prędkość skrawania m/min	Posuw mm/obrót	Prędkość posuwu mm/min	Prędkość obrotowa wrzeciona obr/min
	0,10	111	
35	0,15	167	1114
	0,20	222	
	0,10	222	
70	0,15	334	2229
	0,20	445	
	0,10	334	
105	0,15	501	3344
	0,20	668	

## 6.3. Analiza wyników

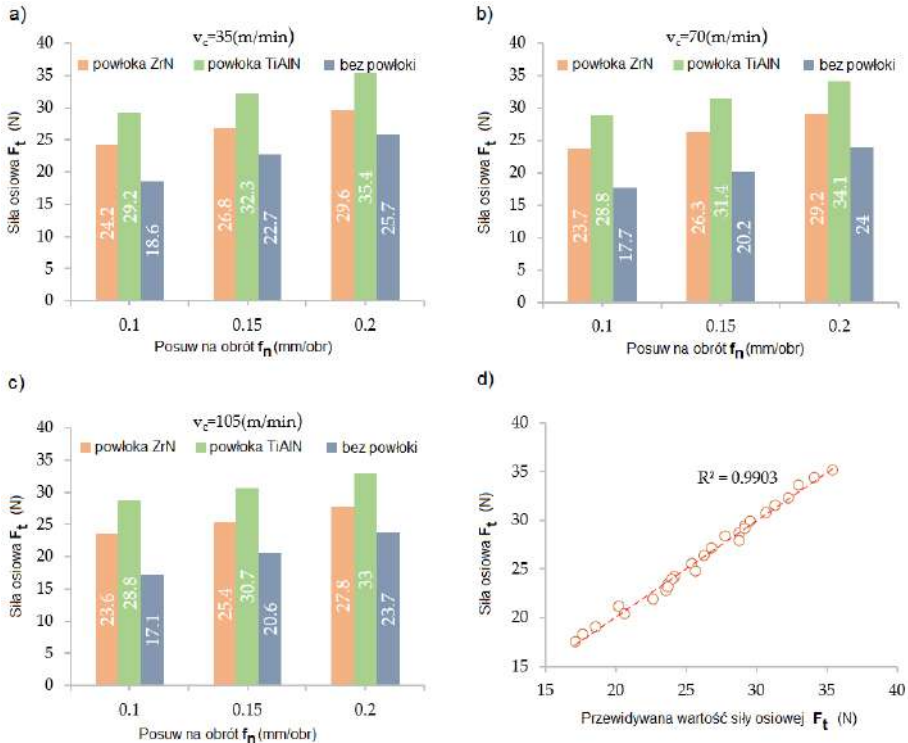
### 6.3.1. Siła osiowa i moment skrawania

Zauważono, że podczas wiercenia można wyodrębnić pięć głównych regionów zmienności wartości siły osiowej  $F_t$ . Region I to okres, w którym ścin wiertła wnika w materiał, następuje gwałtowny przyrost wartości siły, zamiast skrawania ostrze wiertła dociska materiał. Następnie wiertło rozpoczyna skrawać warstwę zewnętrzną materiału o największej gęstości i twardości. Gdy ścin wiertła opuszcza obszar materiału o największej gęstości (głębokość ok. 2,2 mm) następuje spadek wartości siły ponieważ ścin wiertła zagłębia się już w warstwie środkowej o mniejszej gęstości i twardości. Następnie występuje Region II, w którym wiertło zagłębia się na głębokość  $h = 8,1$  mm, która jest równa wysokości ostrzy skrawających wiertła (rys. 6.2c). W tym czasie występuje przyrost przekroju warstwy skrawanej, czego efektem jest proporcjonalny przyrost siły. Region III to skrawanie ze stałym przekrojem warstwy skrawanej w warstwie środkowej płyty. Występuje tu stabilizacja wartości siły osiowej. Na początku Regionu IV wartość siły

zaczyna rosnąć gwałtownie z uwagi, na to, że ścin wiertła zaczyna wchodzić w zewnętrzną warstwę materiału (większa gęstość i twardość). Siła osiąga wartość maksymalną. Gdy tylko ścin wiertła opuści materiał obrabiany (droga skrawania ok. 18 mm) wartość siły zaczyna maleć (Region V). Wartość siły osiowej spada do zera na końcu Regionu V, gdy krawędzie skrawające wiertła opuściły materiał obrabiany.

W przypadku momentu skrawania  $M_c$ , widoczny jest wyraźnie Region I, w którym nie występuje skrawanie, a jedynie ścin wciskany jest w materiał obrabiany. W tym Regionie wartość momentu skrawania bliska jest zeru. Następnie ostrza zagłębiają się w materiał obrabiany (Region II) co powoduje proporcjonalny wzrost wartości momentu skrawania. Okres tego wzrostu trwa do chwili osiągnięcia przez wiertło maksymalnego przekroju warstwy skrawanej tzn. wiertło zagłębia się na głębokość  $h = 8,1$  mm. Region III to skrawanie ze stałym przekrojem warstwy skrawanej w warstwie środkowej płyty. Występuje tu stabilizacja wartości momentu skrawania. Na początku Regionu IV wartość momentu skrawania zaczyna rosnąć z uwagi, że wiertło zaczyna wchodzić w zewnętrzną warstwę materiału (większa gęstość i twardość) jednocześnie występuje największy przekrój warstwy skrawanej. Moment skrawania osiąga wartość maksymalną. Gdy tylko wiertło zaczyna wychodzić z materiału obrabianego (droga skrawania ok. 18 mm) wartość momentu skrawania zaczyna maleć (Region V). W połowie regionu V można zaobserwować pewną stabilizację wartości momentu skrawania. Jest to wynikiem, tego, że wiertło wychodząc z materiału skrawa już jedynie warstwę zewnętrzną materiału o większej gęstości i twardości. Wartość momentu skrawania spada do zera na końcu Regionu V, gdy krawędzie skrawające wiertła opuściły element obrabiany.

Do analizy zarejestrowanych sygnałów  $F_t$  i  $M_c$  przygotowano własny program komputerowy (w środowisku LabVIEW) umożliwiający w wybranych odcinakach czasu wyznaczenie średnich wartości rejestrowanych sygnałów siły osiowej i momentu skrawania. Działanie programu polegało na automatycznym wyznaczaniu wartości rejestrowanych sygnałów w ściśle określonych odcinkach czasowych. Metodyka wyznaczania wartości średnich rejestrowanych sygnałów została szczegółowo opisana w [160] oraz w rozdziale 4.2.1. Na rysunku 6.8 przedstawiono zależności siły osiowej  $F_t$  od wartości posuwu dla trzech wartości prędkości skrawania i rodzaju zastosowanych powłok na ostrza narzędzia skrawającego. Wartości siły osiowej przedstawione na wykresach uzyskano jako wynik średni z trzech powtórzeń.



Rys. 6.8. Wpływ wartości posuwu na wartość siły osiowej: a) dla prędkości skrawania 35 m/min, b) dla prędkości skrawania 70 m/min, c) dla prędkości skrawania 105 m/min, d) korelacja pomiędzy rzeczywistymi i przewidywanymi wartościami siły osiowej [156]

Na rysunku 6.8d przedstawiono porównanie wyników pomiędzy wartościami siły osiowej otrzymanymi w trakcie przeprowadzonego eksperymentu z wartościami otrzymanymi na podstawie modelu analitycznego (5.1). Uzyskano współczynnik korelacji  $R^2 = 0,99$ .

Analizę statystyczną wyników przeprowadzono za pomocą wielowymiarowej analizy wariancji ANOVA przy użyciu programu STATISTICA. Biorąc pod uwagę przyjęty poziom istotności  $p = 0,05$ , określa się istotność statystyczną poszczególnych grup zmiennych i poszczególnych zmiennych.

Wyniki przeprowadzonej analizy (tab. 6.4) pozwalają odrzucić, na poziomie istotności  $p < 0,001$ , hipotezę o braku wpływu parametrów: powłoka,  $f$  i  $v_c$  na wartość siły osiowej  $F_t$ . Nie zaobserwowano statystycznie istotnego wpływu między analizowanymi czynnikami.

Tabela 6.4. Poziom istotności wpływu parametrów skrawania na wartość średnią siły osiowej  $F_t$ 

Parametry	Poziom istotności ( $p \leq 0,05$ )
Prędkość skrawania ( $v_c$ )	0,001
Posuw ( $f$ )	0,001
Powłoka	0,001
Powłoka · prędkość skrawania	0,997
Powłoka · posuw	0,564

Najmniejszą wartość siły  $F_t$  uzyskano w procesie wiercenia wiertłem bez powłoki. Natomiast największą wartość uzyskano dla wiertła z powłoką TiAlN. Przyrost wartości siły osiowej w porównaniu do wiertła bez powłoki wyniósł średnio ok. 39%. W przypadku wiertła z powłoką ZrN wartość uzyskanej siły osiowej uległa zmniejszeniu w porównaniu do wiertła z powłoką TiAlN ale nadal była większa średnio o ok. 17% w stosunku do wartości uzyskanej za pomocą wiertła bez powłoki.

Dla przykładu: dla prędkości skrawania  $v_c = 105$  m/min i wartości posuwu  $f = 0,2$  mm/obr wartość siły osiowej dla narzędzia z ostrzami z powłoką TiAlN wyniosła 33 N, dla narzędzia z ostrzami z powłoką ZrN wyniosła 27,8 N, a dla narzędzia z ostrzami bez powłoki wyniosła 23,7 N. Dla wszystkich zastosowanych powłok, wartość siły osiowej wzrasta wraz ze wzrostem wartości posuwu. Wartość siły osiowej można więc opisać zależnościami wg zastosowanej powłoki. Dla ostrza z powłoką z ZrN wyprowadzono zależność (6.1), dla ostrza z powłoką TiAlN zależność (6.2), ostrze bez powłoki zależność (6.3).

$$F_t = 25,139 + 52,333f - 0,021v_c \quad (6.1)$$

$$F_t = 25,005 + 50,333f - 0,018v_c \quad (6.2)$$

$$F_t = 13,011 + 66,667f - 0,026v_c \quad (6.3)$$

Do określenia stopnia powiązania między zmiennymi ( $F_t$ ,  $f$ ,  $v_c$ ) przy pomocy współczynnika korelacji w zasadzie potrzebne jest założenie o postaci funkcji korelacyjnej. Przyjmując (6.4):

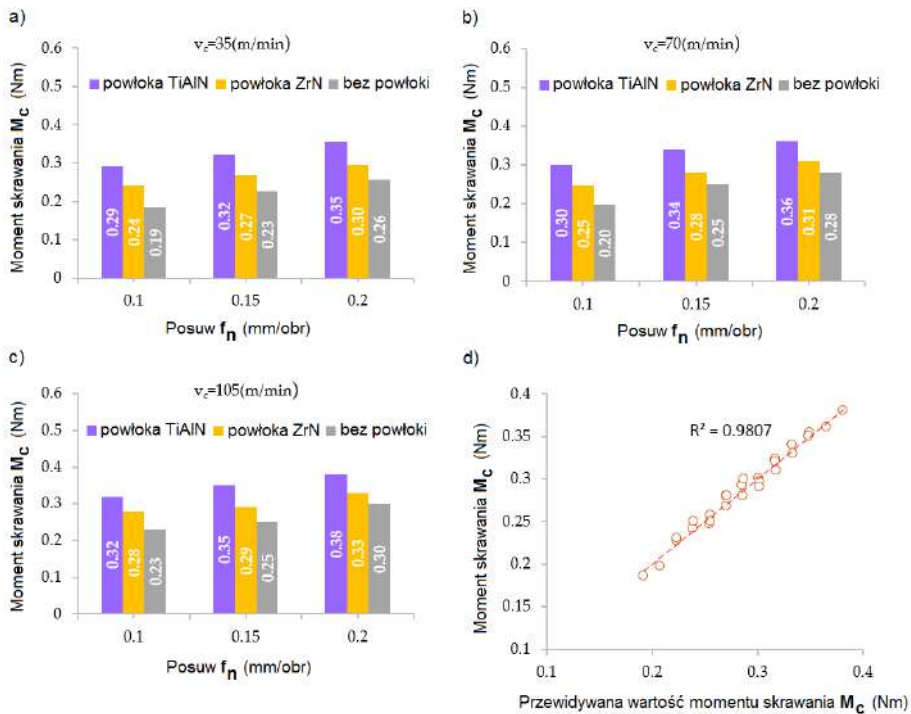
$$F_t = A_i + B_i \cdot f + C_i \cdot v_c \quad (6.4)$$

Określono ten wpływ dla wyników badań otrzymanych wg zastosowanej powłoki ostrza. Przykładowo, dla powłoki ZrN otrzymano (6.5):

$$A_1 = 25,139; B_1 = 52,333; C_1 = 0,021 \quad (6.5)$$

Przedział ufności określono na poziomie 95%. Na podstawie przeprowadzonych obliczeń można stwierdzić, że wpływ posuwu  $f$  ma znaczący wpływ na wartość sygnału siły  $F_t$ . Natomiast wpływ prędkości skrawania  $v_c$  na wartość sygnału siły  $F_t$  jest nieistotny. Z uwagi, że oszacowana wartość współczynnika  $C_1 = 0,021$  jest bliska zero.

Na rysunku 6.9 przedstawiono zależności momentu skrawania  $M_c$  od wartości posuwu dla trzech prędkości skrawania i rodzaju zastosowanych powłok na ostrza narzędzia skrawającego. Wpływ prędkości skrawania na wartość momentu skrawania jest zauważalny w mniejszym stopniu.



Rys. 6.9. Wpływ wartości posuwu na wartość momentu skrawania: a) dla prędkości skrawania 35 m/min, b) dla prędkości skrawania 70 m/min, c) dla prędkości skrawania 105 m/min, d) korelacja pomiędzy rzeczywistymi i przewidywanymi wartościami momentu skrawania [156]

Wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej (tab. 6.5) pozwalają odrzucić, na poziomie istotności  $p < 0,001$ , hipotezę o braku wpływu parametrów: powłoka,

$f$ ,  $v_c$  na wartość momentu skrawania  $M_c$ . Nie zaobserwowano interakcji statystycznie istotnych pomiędzy analizowanymi czynnikami.

Tabela 6.5. Poziom istotności wpływu parametrów skrawania na wartość średnią momentu skrawania  $M_c$

Parametry	Poziom istotności ( $p \leq 0,05$ )
Prędkość skrawania ( $v_c$ )	0,001
Posuw ( $f$ )	0,001
Powłoka	0,001
Powłoka · prędkość skrawania	0,853
Powłoka · posuw	0,734

Jak można zauważyć (rys. 6.9), najmniejszą wartość momentu uzyskano w procesie wiercenia wiertłem bez powłoki. Największe wartości momentu skrawania  $M_c$  w przeprowadzonych eksperymentach uzyskano dla wiertła z powłoką TiAlN. Fakt ten można wyjaśnić różnymi wartościami współczynnika tarcia występującym pomiędzy narzędziem skrawającym a przedmiotem obrabianym wynikającymi z rodzaju zastosowanej powłoki na wiertła. Powlekanie powierzchni wiertel charakteryzują się stosunkowo wyższymi współczynnikami tarcia niż powierzchnia niepowlekanego narzędzia z węgla spiekane. Współczynnik tarcia dla ZrN wynosi 0,4 natomiast dla TiAlN 0,6. Powłoka powoduje wzrost wartości siły tarcia między narzędziem a przedmiotem obrabianym, zgodnie z diagramem koła Marchanta. Wzrost siły tarcia pociąga za sobą wzrost oporu skrawania, a tym samym wzrost momentu skrawania. Przyrost wartości momentu skrawania w porównaniu do wiertła bez powłoki wyniósł ok. 35%. W przypadku wiertła z powłoką ZrN wartość uzyskanego momentu skrawania uległa zmniejszeniu w porównaniu do wiertła z powłoką TiAlN ale nadal była większa o ok. 15% w stosunku do wartości uzyskanej za pomocą wiertła bez powłoki.

Dla przykładu: dla prędkości skrawania  $v_c = 35$  m/min i wartości posuwu  $f = 0,2$  mm/obr wartość momentu skrawania dla narzędzia z powłoką TiAlN wyniosła 0,35 Nm, dla narzędzia z powłoką ZrN wyniosła 0,3 Nm, a dla narzędzia bez powłoki wyniosła 0,26 Nm.

Wartość momentu skrawania można więc opisać zależnościami wg zastosowanej powłoki. Dla ostrza z powłoką z ZrN wyprowadzono zależność (6.6), dla ostrza z powłoką TiAlN zależność (6.7), ostrze bez powłoki zależność (6.8).

$$M_c = 0,218 + 0,607f - 0,001v_c \quad (6.6)$$

$$M_c = 0,167 + 0,557f - 0,001v_c \quad (6.7)$$

$$M_c = 0,093 + 0,747f - 0,001v_c \quad (6.8)$$

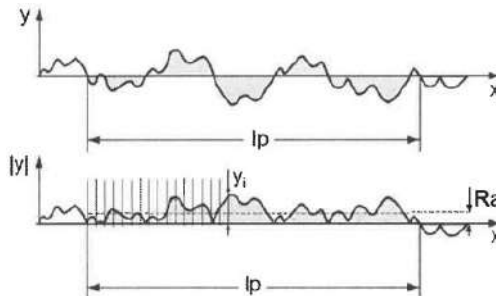
Na rysunku 6.9d przedstawiono porównanie wyników pomiędzy wartościami momentu skrawania otrzymanymi w trakcie przeprowadzonego eksperymentu z wartościami otrzymanymi na podstawie modelu analitycznego (6.6). Uzyskano współczynnik korelacji  $R^2 = 0,98$ . Dla wszystkich zastosowanych pokryć, wartość momentu skrawania wzrasta wraz ze wzrostem wartości posuwu.

### 6.3.2. Analiza topografii powierzchni

Topografia powierzchni jest jedną z głównych cech branych pod uwagę w celu oceny jakości powierzchni obrabianej w procesach obróbki skrawaniem. W trakcie prowadzonych badań mierzono wartość wybranego wskaźnika chropowatości powierzchni otworu na kierunku wzdłużnym. Na rysunku 6.11 przedstawiono przykładową topografię powierzchni otworu uzyskaną w procesie wiercenia wiertłem z powłoką TiAlN przy prędkości skrawania 105 m/min i trzech wartości posuwu. Na podstawie mapy topografii, w wybranych odcinkach pomiarowych, określano wskaźnik chropowatości  $R_a$   $\mu\text{m}$ .

Płyty MDF mają budowę trójwarstwową. Są to górna i dolna warstwa powierzchniowa oraz warstwa środkowa. Warstwy powierzchniowe mają większą gęstość niż warstwa środkowa. Ponadto twardość warstwy powierzchniowej jest większa niż twardość warstwy środkowej. W wyniku tych różnic chropowatość powierzchni płyt MDF zmniejsza się wraz ze wzrostem głębokości skrawania, zwłaszcza w środkowej części płyty.

Matematycznie  $R_a$  to średnie arytmetyczne odchylenie profilu od linii środkowej w zakresie długości bazowej  $l_p$ , obliczone zgodnie z zasadą przedstawioną na rys. 6.10.



Rys. 6.10. Wyznaczenie średniego arytmetycznego odchylenia profilu od linii środkowej

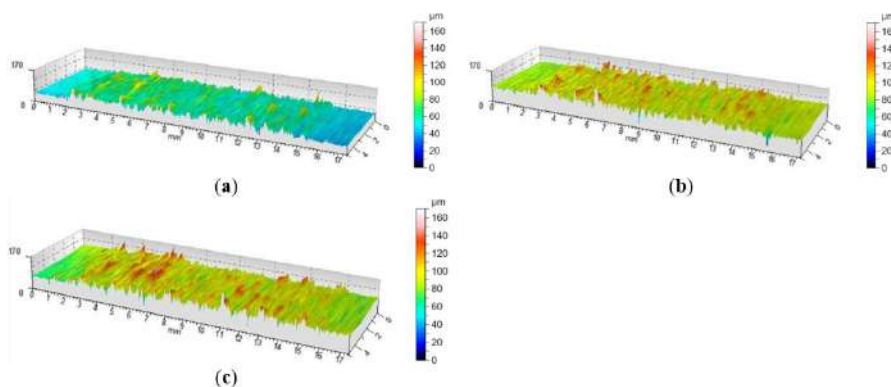
Wadą wskaźnika  $R_a$  jest jego mała wrażliwość na uszkodzenia powierzchni oraz nierozróżnianie między wgłębieniami a wzniesieniami. Dlatego też, do oceny

chropowości w procesie obróbki płyt wiórowych,  $R_a$  zastępowane jest przez  $R_z$  – najwyższą wysokość profilu, który jest bardziej czuły na rzadkie duże wierzchołki i wgłębienia. Wskaźnik ten jest także wygodny przy statystycznej analizie struktury geometrycznej powierzchni, jako że jest równy odchyleniu standardowemu.

Jednak parametr  $R_a$  jest najczęściej stosowanym wskaźnikiem do oceny chropowości powierzchni w skrawaniu płyt pilśniowych. Deus i in. [280], Koç i in. [281], Bal i Akçakaya [282] oraz İşleyen i Karamanoğlu [283] badali wpływ prędkości skrawania, posuwu i głębokości skrawania na chropowość płyt MDF z zastosowaniem wskaźnika  $R_a$  do oceny chropowości. Podobne badania prowadzili Lin i in. [158], Pinkowski i in. [284] oraz Sedlecký i in. [285]. Inne wyniki badań z zastosowaniem parametru  $R_a$  do oceny chropowości powierzchni można znaleźć w pracach [276, 286, 287].

Wybór tego wskaźnika do oceny chropowości powierzchni podyktowany był jego najczęstszym zastosowaniem w warunkach produkcyjnych [266].

Na przedstawionej mapie topografii powierzchni (rys. 6.11), można wyraźnie zaobserwować trzy obszary zróżnicowanej topografii powierzchni. Pierwszy i drugi obszar występuje w warstwach zewnętrznych płyty MDF a trzeci obszar w warstwie środkowej płyty. To zróżnicowanie można wytłumaczyć budową wielowarstwową płyty MDF.



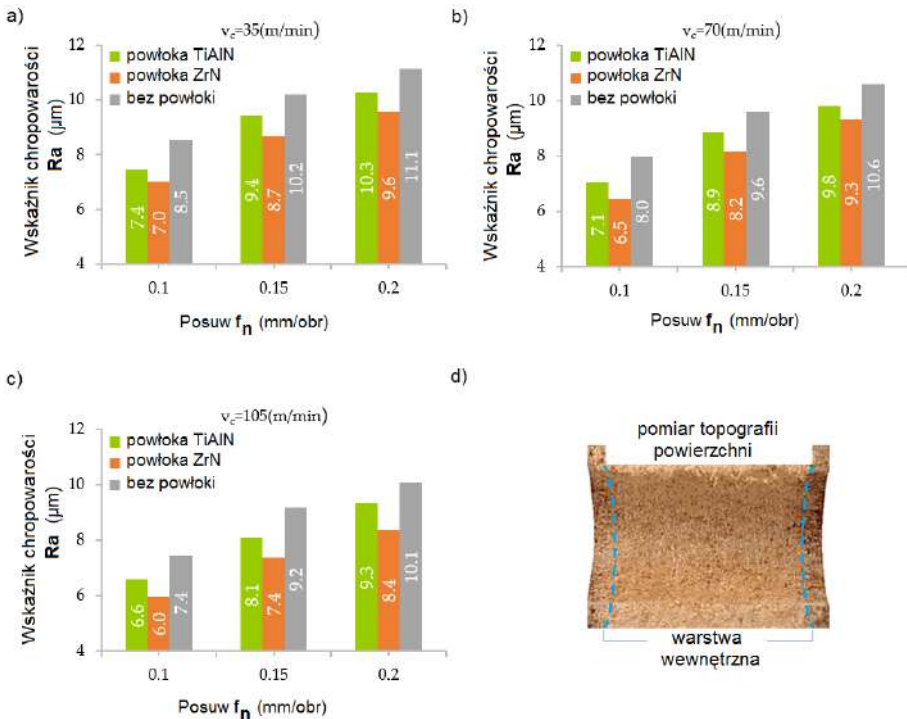
Rys. 6.11. Topografia powierzchni po obróbce narzędziem z powłoką TiAlN: a) prędkość skrawania 105 m/min i posuw 0,1 mm/obr, b) prędkość skrawania 105 m/min i posuw 0,15 mm/obr, c) prędkość skrawania 105 m/min i posuw 0,2 mm/obr [156]

Pomiar wskaźnika chropowości  $R_a$  realizowano zgodnie z zaleceniami zawartymi w normie ISO-4288: 1998. Wartość wskaźnik  $RS_m$  w przeprowadzonych pomiarach zawierała się:  $0,13 < RS_m \leq 0,4$ .

W przeprowadzonej analizie chropowości powierzchni, pomiar wskaźnika chropowości  $R_a$  wykonywano dla dwóch obszarów powierzchni otworu z osobna. Dla warstwy zewnętrznej i warstwy środkowej płyty MDF. Miało to na

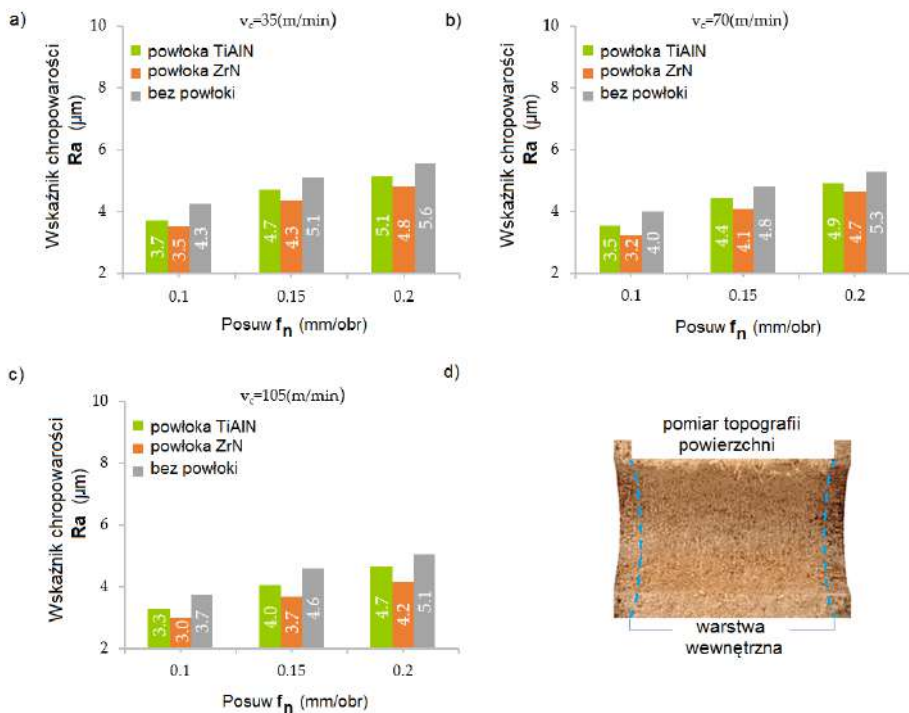
celu określenie dodatkowego wpływu zarówno gęstości jak i twardości materiału obrabianego na analizowany wskaźnik.

Na rysunkach 6.12 i 6.13 przedstawiono zależności wskaźnika chropowatości Ra od wartości posuwu dla trzech prędkości skrawania i rodzaju zastosowanych powłok na ostrza narzędzia skrawającego. Przedstawione na wykresach wartości wskaźnika Ra są średnią z sześciu pomiarów. Jak wcześniej wspomniano, dla każdego otworu wykonywano dwa pomiary, a wykonanie każdego otworu powtarzano trzykrotnie. Zaprezentowane wyniki na rys. 6.12 odnoszą się do pomiaru chropowatości powierzchni w warstwie środkowej materiału obrabianego.



Rys. 6.12. Wpływ wartości posuwu na chropowatość powierzchni w warstwie wewnętrznej: a) dla prędkości skrawania 35 m/min, b) dla prędkości skrawania 70 m/min, c) dla prędkości skrawania 105 m/min, d) powierzchnia pomiarowa [156]

Natomiast na rys. 6.13 zaprezentowano wyniki dotyczące pomiaru chropowatości powierzchni w warstwie zewnętrznej materiału obrabianego.



Rys. 6.13. Wpływ posuwu na wartość chropowatości powierzchni w warstwie zewnętrznej: a) dla prędkości skrawania 35 m/min, b) dla prędkości skrawania 70 m/min, c) dla prędkości skrawania 105 m/min, d) powierzchnia pomiarowa [156]

Jak można zauważyć, w obu przypadkach, w miarę zwiększania wartości prędkości skrawania przy jednoczesnym zmniejszeniu wartości posuwu zaobserwowano poprawę chropowatości powierzchni. Dla warstwy wewnętrznej przy prędkości skrawania 35 m/min i wartości posuwu 0,2 mm średnia chropowatość powierzchni wynosiła  $R_a = 10,3 \mu\text{m}$  dla wiertła z powłoką TiAlN, dla prędkości skrawania 105 m/min i posuwu 0,1 mm średnia chropowatość powierzchni wynosiła  $R_a = 6,6 \mu\text{m}$ . Natomiast dla warstwy zewnętrznej przy prędkości skrawania 35 m/min i wartości posuwu 0,2 mm średnia chropowatość powierzchni wynosiła  $R_a = 5,1 \mu\text{m}$ , dla prędkości skrawania 105 m/min i wartości posuwu 0,1 mm średnia chropowatość powierzchni wynosiła  $R_a = 3,3 \mu\text{m}$  dla wiertła z powłoką TiAlN. Można to wytłumaczyć faktem, że nagromadzenie wióra w rowkach wiórowych malało wraz ze wzrostem prędkości skrawania. Ponadto, odnotowano bardzo wyraźny wpływ zastosowanego rodzaju pokrycia narzędzia skrawającego na wartość chropowatości powierzchni. Stwierdzono, że obróbka narzędziem z powłoką ZrN pozwala uzyskać najmniejszą wartość chropowatości powierzchni w porównaniu do narzędzia z powłoką TiAlN i bez powłoki. Spowodowane może to być zróżnicowanym co do wartości współczynnikiem tarcia jak i współczynnikiem przewod-

ności cieplnej w zależności od zastosowanej powłoki (tab. 6.2). Większy współczynnik tarcia i mniejszy współczynnik przewodności cieplnej powoduje wzrost wartości temperatury w kontakcie ostrze-materiał obrabiany. Wzrost ciepła w obszarze kontaktu ostrza narzędzia skrawającego z materiałem obrabianym, w przypadku MDF, istotnie wpływa na poprawę połączenia włókien drewna z klejem formaldehydowym. Co powoduje zagęszczenie wiązań pomiędzy włóknami.

Wyniki przeprowadzonej analizy (tab. 6.6) pozwalają odrzucić, na poziomie istotności  $p < 0,001$ , hipotezę o braku wpływu parametrów: powłoka i  $f$  na wartość wskaźnika chropowatości  $R_a$ . Nie zaobserwowano statystycznie istotnego wpływu prędkości skrawania na wartość wskaźnika chropowatości  $R_a$ . Podobnie też, w przypadku interakcji między analizowanymi czynnikami nie zaobserwowano statystycznie istotnego wpływu.

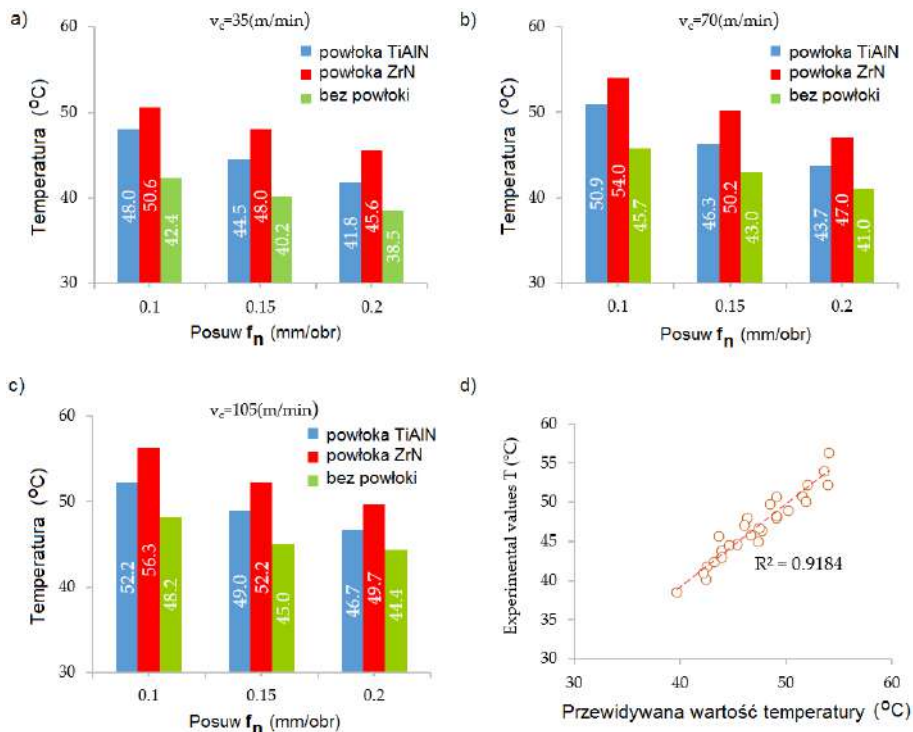
Tabela 6.6. Poziom istotności wpływu parametrów skrawania na średnią chropowatość  $R_a$

Parametry	Poziom istotności ( $p \leq 0,05$ )
Prędkość skrawania ( $v_c$ )	0,252
Posuw ( $f$ )	0,001
Powłoka	0,001
Powłoka · prędkość skrawania	0,999
Powłoka · posuw	0,998

Przeprowadzone eksperymenty wykazały, że wartości posuwu, prędkości skrawania i rodzaj zastosowanego pokrycia narzędzia wpływa w znaczący sposób na chropowatość powierzchni  $R_a$ . Jednak wartości chropowatości powierzchni  $R_a$  zmierzonej w warstwach zewnętrznych jest znacznie niższa niż ta zmierzona w warstwie wewnętrznej.

### 6.3.3. Temperatura ostrza narzędzia skrawającego

Na rysunku 6.14 przedstawiono graficznie wyniki pomiaru maksymalnej temperatury uzyskane w ramach przeprowadzonego eksperymentu. Jak można zauważyć, największe wartości temperatury narzędzia zaobserwowano w przypadku obróbki wiertłem z powłoką  $ZrN$ , a najmniejsze w przypadku narzędzia bez powłoki. Przyrost wartości temperatury dla wiertła z powłoką  $ZrN$  w porównaniu do wiertła bez powłoki wyniósł ok. 20%. W przypadku wiertła z powłoką  $TiAlN$  wartość uzyskanego momentu skrawania uległa zmniejszeniu w porównaniu do wiertła z powłoką  $ZrN$  ale nadal była większa o ok. 13% w stosunku do wartości uzyskanej za pomocą wiertła bez powłoki.



Rys. 6.14. Wpływ posuwu na wartość temperatury: a) dla prędkości skrawania 35 m/min, b) dla prędkości skrawania 70 m/min, c) dla prędkości skrawania 105 m/min, d) korelacja pomiędzy wartościami doświadczalnymi i przewidywanymi temperatury [156]

W przypadku wiertła z powłoką ZrN wartość maksymalnej temperatury wynosiła 56,3°C. Najmniejszą wartość temperatury uzyskano w procesie wiercenia wiertłem bez powłoki i wynosiła ona 38,5°C. Wy tłumaczyć ten fakt można zróżnicowaniem zarówno wartości współczynnika tarcia pomiędzy ostrzem a materiałem obrabianym jak i wartością współczynnika przewodzenia ciepła uzależnionego od rodzaju zastosowanego pokrycia ostrza narzędzia skrawającego. Powłoka ZrN charakteryzuje się dużo mniejszym wskaźnikiem przewodzenia ciepła w stosunku do powłoki TiAlN. Powoduje to, że jest ona barierą w odprowadzaniu ciepła ze strefy skrawania. A jak wiadomo, w obróbce materiałów drewnopochodnych nie stosuje się chłodziwa, które by dodatkowo odprowadzało ciepło. Ponadto, płyta MDF ma stosunkowo też niską przewodność cieplną.

Wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej (tab. 6.7) pozwalają odrzucić, na poziomie istotności  $p < 0,001$ , hipotezę o braku wpływu parametrów: powłoka,  $f$  oraz na poziomie  $p = 0,006$  hipotezę o braku wpływu  $v_c$  na wartość temperatury ostrza narzędzia. Nie zaobserwowano statystycznie istotnych interakcji między analizowanymi czynnikami.

Tabela 6.7. Poziom istotności wpływu parametrów skrawania na temperaturę (T)

Parametry	Poziom istotności ( $p \leq 0,05$ )
Prędkość skrawania ( $v_c$ )	0,006
Posuw (f)	0,001
Powłoka	0,001
Powłoka · prędkość skrawania	0,998
Powłoka · posuw	0,943

Wartość temperatury ostrza skrawającego w zależności od zastosowanej powłoki wyrażono w postaci równań. Dla ostrza z powłoką z ZrN wyprowadzono zależność (6.9), dla ostrza z powłoką TiAlN zależność (6.10), ostrze bez powłoki zależność (6.11).

$$T = 53,791 - 62,601f - 0,065v_c \quad (6.9)$$

$$T = 55,978 - 65,241f - 0,062v_c \quad (6.10)$$

$$T = 43,991 - 41,801f - 0,078v_c \quad (6.11)$$

Porównanie wyników pomiędzy wartościami siły osiowej otrzymanymi w trakcie przeprowadzonego eksperymentu z wartościami otrzymanymi na podstawie modeli analitycznych przedstawiono na rys. 6.14 (6.9)-(6.11). Uzyskano współczynnik korelacji około  $R^2 = 0,92$ .

## 6.4. Podsumowanie

W badaniach dotyczących rodzaju powłok zastosowanych na ostrzach wiertel określono ich wpływ na wartość siły osiowej  $F_t$ , moment skrawania  $M_c$ , temperaturę narzędzia skrawającego T oraz chropowatości powierzchni otworu w procesie wiercenia płyt MDF. W testach zastosowano trzy rodzaje wiertel z węglików spiekanych (HW): niepowlekane, powlekane TiAlN i powlekane ZrN. Stwierdzono, że wartość maksymalnej temperatury narzędzia w procesie wiercenia zależy nie tylko od prędkości skrawania i posuwu, ale również od rodzaju powłoki narzędzia skrawającego. Zarówno wartość momentu skrawania, jak i siły osiowa są istotnie zależne od wartości posuwu i rodzaju powłoki wiertła. Wyjaśniono również wpływ zmiennej gęstości płyty na chropowatość powierzchni otworu oraz zmienność wartości siły osiowej. Wyniki badań poddano analizie statystycznej z wykorzystaniem wieloczynnikowej analizy wariancji (ANOVA). Na podstawie

uzyskanych wyników można stwierdzić, że: w analizie wartości siły osiowej  $F_t$ , momentu skrawania  $M_c$  i parametru chropowatości powierzchni  $R_a$  trzeba uwzględnić warstwową strukturę płyty MDF, która składa się z warstw o różnej gęstości i twardości. Występuje dominujący wpływ zarówno posuwu na obrót  $f$ , jak i rodzaju powłoki narzędzia na siłę osiową  $F_t$ , moment skrawania  $M_c$  i temperaturę narzędzia skrawającego w procesie wiercenia płyty MDF. Najwyższe wartości momentu skrawania  $M_c$  i siły osiowej  $F_t$  zarejestrowane w eksperymentach uzyskano przy użyciu wiertła z powłoką TiAlN. Z kolei najniższe wartości  $M_c$  i  $F_t$  uzyskano przy użyciu wiertła niepowlekanego. Fakt ten można wyjaśnić różnymi wartościami współczynnika tarcia między narzędziem a przedmiotem obrabianym wynikającymi z rodzaju powłoki wiertła. Powlekane powierzchnie wiertel charakteryzują się stosunkowo wyższymi współczynnikami tarcia niż powierzchnia niepowlekanego narzędzia z węglika spiekane. Dlatego powłoka zwiększa siłę tarcia między narzędziem a przedmiotem obrabianym, zgodnie z diagramem koła Marchanta. Wzrost siły tarcia powoduje wzrost oporu skrawania.

Uzyskane wyniki badań wskazują, że temperatura w procesie wiercenia rośnie wraz ze wzrostem prędkości skrawania  $v_c$ , ale maleje wraz ze wzrostem wartości posuwu na obrót  $f$ . Zmiany temperatury, w zależności od rodzaju powłoki, różnią się średnio o około 20%. Najwyższe wartości temperatury narzędzia zaobserwowano w przypadku wiertła pokrytego ZrN, a najniższe w przypadku wiertła niepokrytego. Fakt ten można wyjaśnić następująco: powłoka ZrN ma znacznie niższy współczynnik przewodzenia ciepła w porównaniu z powłoką TiAlN i narzędziem niepokrytym. Powoduje to, że powłoka ZrN stanowi barierę dla odprowadzania ciepła ze strefy skrawania.

Posuw na obrót  $f$  i rodzaj powłoki wiertła miały istotny wpływ na wartość parametru średniej chropowatości  $R_a$ . Zaobserwowano, że w zewnętrznych warstwach płyty wartość parametru  $R_a$  ma niższą wartość w porównaniu do zmierzonej w warstwie środkowej. Najniższą wartość średniego parametru chropowatości  $R_a$  zaobserwowano w przypadku wiertła pokrytego ZrN, a najwyższą w przypadku wiertła niepokrytego. Fakt ten można wyjaśnić niższą wartością współczynnika tarcia i niższą wartością współczynnika przewodności cieplnej powłoki ZrN w porównaniu z narzędziem niepokrytym. Niższa wartość zarówno współczynnika przewodności cieplnej, jak i współczynnika tarcia powoduje wzrost ciepła generowanego w obszarze styku narzędzia skrawającego z przedmiotem obrabianym. W przypadku płyty MDF znacznie poprawia to połączenie włókien drewna z klejem formaldehydowym. Powoduje to zagęszczenie wiązań między włóknami.

Podsumowując, posuw na obrót  $f$  oraz rodzaj powłoki narzędzia są dominującymi parametrami mającymi istotny wpływ na jakość przy wierceniu płyty MDF.



## 7. MONITOROWANIE PROCESU OBRÓBK

### 7.1. Zastosowanie sieci neuronowej RBF i FL i modelowania rozmytego w ocenie chropowatości powierzchni

Inteligentna obróbka to obszar badań, w którym naukowcy eksplorują różne metody wykrywania i przetwarzania danych w celu monitorowania procesów obróbki online. Na procesy obróbki wpływają różne czynniki związane z przedmiotem obrabianym, narzędziem i parametrami skrawania. Ponieważ trudno jest ocenić złożone zależności między czynnikami wejściowymi i wyjściowymi przy użyciu konwencjonalnej kontroli jakości, opracowanie systemu online wykorzystującego zaawansowane technologie wykrywania wydaje się być głównym celem inteligentnej obróbki.

Jarosz i in. [288] przeanalizowali wpływ zmiennej głębokości skrawania na wartości siły skrawania w procesach frezowania czołowego stopu aluminium AW-6061-T6. Dzięki zaproponowanej strategii optymalizacji skrócono czas obróbki dla analizowanej operacji frezowania czołowego o około 37% bez przekroczenia narzuconych ograniczeń parametrów procesu.

W ostatnich latach nastąpił silny rozwój badań związanych z wykorzystaniem systemów rozmytych i sztucznej inteligencji w procesach podejmowania decyzji. Jednym z możliwych zastosowań systemów rozmytych do wspierania podejmowania decyzji jest wykorzystanie w procesie sterowania produkcją. Metody sztucznej inteligencji, czyli logika rozmyta [289], modelowanie oparte na sieciach rozmytych [290], sztuczne sieci neuronowe (ANN) [291], są coraz częściej stosowane, a inteligentne monitorowanie obróbki rozwija się obecnie dynamicznie.

Systemy rozmyte charakteryzują się metodą reprezentacji wiedzy, która jest prezentowana w sposób symboliczny za pomocą reguł i przetwarzania rozmytego. Takagi i Sugeno [292] oraz Sugeno i Kang [293] zaproponowali alternatywny system wnioskowania oparty na regułach specjalnego formatu, który charakteryzuje się następnikami typu funkcji. W konkluzjach reguł, następniki typu funkcyjnego pojawiają się nie jako zbiory rozmyte, lecz jako funkcje zmiennych wejściowych, a te są zazwyczaj funkcjami liniowymi, zatem każda reguła modelu opisuje jeden płaski (liniowy) segment powierzchni modelu. W bazie reguł, we wnioskach, wykorzystano zależność funkcyjną. Oznacza to, że w modelu Takagiego–Sugeno nie ma jawnych wyjściowych funkcji przynależności ani funkcji wyostrzających.

Optymalne określenie parametrów obróbki CNC płyt drewnopochodnych jest niezwykle istotne, zwłaszcza w procesach wykończeniowych, takich jak malowanie, lakierowanie czy oklejanie, gdzie wymagana jest określona chropowatość powierzchni [294]. Wiele braków powstających w końcowym etapie obróbki wykończeniowej płyt drewnopochodnych ma swoje przyczyny już na początkowym etapie ich obróbki (cięcie, frezowanie, wiercenie). Wynika to głównie z niewłaściwie

dobrych parametrów skrawania. Prawidłowo dobrane parametry są najważniejszymi czynnikami podnoszącymi jakość obrabianej powierzchni [281]. Określenie optymalnych wartości parametrów CNC, które przyczyniają się do poprawy jakości obrabianej powierzchni, jest niezbędne do prawidłowego przeprowadzenia procesu frezowania materiałów dla przemysłu meblarskiego.

Wiele prac naukowych koncentruje się na określeniu wpływu parametrów skrawania na chropowatość powierzchni płyt MDF w procesie obróbki. Jednak optymalne parametry w tych badaniach zostały na ogół znalezione za pomocą metody Taguchiego i metod statystycznych [283]. Sztuczne sieci neuronowe znalazły szerokie zastosowanie w nauce o drewnie, np. w rozpoznawaniu gatunków drewna [295], procesie suszenia drewna [296], przewidywaniu niektórych właściwości mechanicznych drewna [297], optymalizacji parametrów procesu w procesie produkcji wyrobów z drewna [298], klasyfikacji wad drewna i forniru [299], obliczaniu przewodnictwa cieplnego drewna [300], analizie wilgotności drewna [301] i przewidywaniu odporności drewna na pęknięcie [302]. Chociaż istnieje wiele badań dotyczących wpływu parametrów obróbki na chropowatość powierzchni drewna, brakuje badań nad modelowaniem wpływu tych parametrów.

Zaawansowane techniki przetwarzania sygnałów i sztuczna inteligencja odgrywają kluczową rolę w rozwoju nowoczesnych systemów monitorowania stanu narzędzi. Najczęściej wybieranymi metodami są sieci neuronowe [303], logika rozmyta Mamdaniego [304], połączenie sieci neuronowej z logiką rozmytą Mamdaniego [305] lub algorytm genetyczny [306]. Logika rozmyta [307] zapewnia prosty sposób na dotarcie do ostatecznego wniosku w oparciu o niejasne, niejednoznaczne, niedokładne lub brakujące informacje wejściowe. Jednak większość opublikowanych prac badawczych na ten temat dotyczy tylko obróbki metali. W dziedzinie obróbki materiałów drzewnych nie ma takich prac lub jest ich bardzo niewiele i dotyczą one wykorzystania sieci neuronowych.

Celem przeprowadzonych badań było zaproponowanie podejścia opartego na logice rozmytej do modelowania chropowatości powierzchni na podstawie sygnału przyspieszenia w procesie frezowania materiałów drewnopochodnych. W tym celu do procesu uczenia zastosowano dodatkowo klastrowanie subtraktywne. Do podziału przestrzeni wejściowej i wyodrębnienia zbioru reguł rozmytych zastosowano klastrowanie subtraktywne. Do określenia optymalnych funkcji przynależności wraz z wynikami parametrów bazy reguł wykorzystano algorytm najmniejszych kwadratów. Uzyskane wyniki porównano z wynikami uzyskanymi za pomocą radialnych sieci neuronowych.

Prognozę parametru chropowatości powierzchni  $S_q$  przeprowadzono z wykorzystaniem sieci neuronowej z radialną funkcją bazową (RBF) oraz modelu rozmytego Takagi–Sugeno–Kanga (TSK) z klasteryzacją subtraktywną. Jako parametry wejściowe wybrano parametry kinematyczne procesu skrawania oraz wybrane miary sygnału przyspieszenia. Na wyjściu prognozowano wartość parametru chropowatości powierzchni  $S_q$ .

### 7.1.1. Metodyka badań

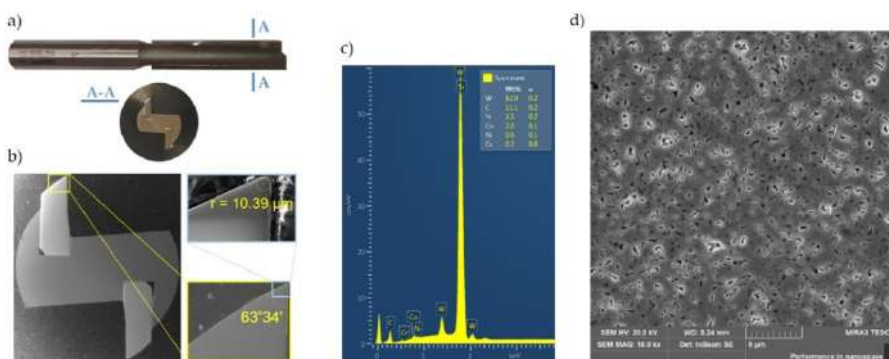
#### Material i narzędzie skrawające

W badaniach jako materiał obrabiany zastosowano laminowaną płytę MDF o grubości 18 mm. Wykonano pomiary własności mechanicznych i fizycznych obrabianego materiału. Wyniki uzyskanych badań przedstawiono w tab. 7.1.

Tabela 7.1. Wybrane właściwości mechaniczne i fizyczne płyt MDF

	Gęstość kg/m <sup>3</sup>	Wilgot- ność %	Wytrzyma- łość na zgina- nie MPa	Moduł sprężystości MPa	Przewodność cieplna W / m K	Rozszerzal- ność cieplna μm/m K
MDF	742	7,2	38	2530	0,3	12

W badaniach zastosowano komercyjne narzędzie skrawające przeznaczone do obróbki płyt MDF, frez trzpieniowy dwuostrzowy o średnicy 12 mm z ostrzami z węgla spiekanego firmy Dimar. Przed przystąpieniem do badań przecięto frez (taki jak zastosowany w badaniach) na wycinarce elektroerozyjnej, a następnie przygotowano zgląd metalograficzny, który posłużył do analizy spektralnej oraz do pomiaru podstawowej geometrii ostrza narzędzia skrawającego. Za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego TESCAN przeprowadzono analizę spektralną pierwiastków wchodzących w skład zastosowanego węgla oraz pomiar kąta ostrza i promienia zaokrąglenia krawędzi skrawającej ostrza (rys. 7.1).

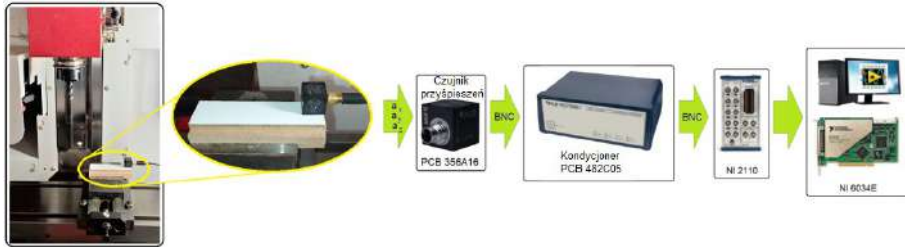


Rys. 7.1. Narzędzie skrawające: a) pomiar narzędzia, b) analiza spektralna, c) struktura ostrza skrawającego [226]

#### Urządzenia i parametry skrawania

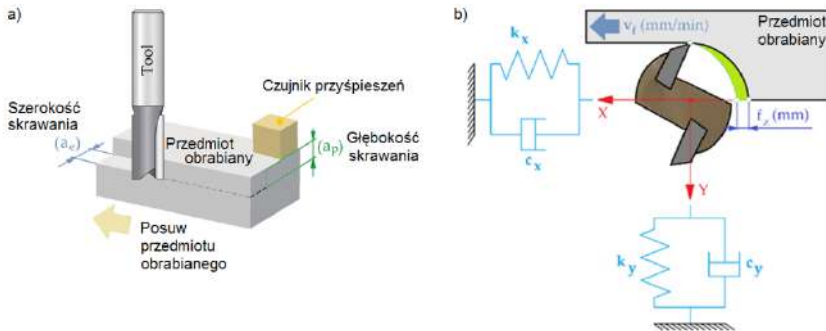
Proces frezowania przeprowadzono na frezarce pionowej CNC firmy EMCO®. Schematyczny diagram konfiguracji toru pomiarowego i systemu archi-

wizacji danych pomiarowych przedstawiono na rys. 7.2. W ramach badań na frezarce CNC rejestrowano sygnały przyspieszeń na kierunkach:  $a_x$ ,  $a_y$  i  $a_z$  pochodzące ze strefy skrawania w trakcie obróbki płyty MDF.



Rys. 7.2. Konfiguracja eksperymentalna i schemat systemu akwizycji danych [226]

W ramach przeprowadzonych badań frezowano powierzchnię frezem walcowo-czołowym na frezarce CNC w elementach wykonanych z płyty MDF o wymiarach  $130 \times 30 \times 18$  mm. Wartość sygnału przyspieszenia na trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach mierzono za pomocą piezoelektrycznego czujnika przyspieszeń PCB 356A16, który zamocowano na przedmiocie obrabianym (rys. 7.3).



Rys. 7.3. Parametry geometryczne procesu frezowania (a), dynamika procesu frezowania (b) [226]

Sygnały pochodzące z czujnika rejestrowane były na dysku komputera osobistego (PC) w postaci cyfrowej za pośrednictwem karty analogowo-cyfrowej National Instruments 6034E. Częstotliwość próbkowania sygnałów podczas prowadzonych eksperymentów wynosiła 50 kHz, a rozdzielczość pomiarowa karty 16 bitów. Dla każdego wykonanego przejścia, przeprowadzano pomiar uzyskanej topografii powierzchni z wykorzystaniem profilometru CNC Hommel-Etamic T8000RC. Pomiaru topografii powierzchni dokonywano w trzech miejscach na odcinkach o długości 15 mm i szerokości 5 mm powierzchni obrobionej (na głębokości frezowania  $a_p$ ) (rys. 7.4). Metodykę pomiaru topografii powierzchni szczegółowo opisano w pracy [156].

W tabeli 7.2 przedstawiono parametry skrawania stosowane podczas przeprowadzonych eksperymentów frezowania. Dla każdego z zestawów parametrów

skrawania wykonano trzy powtórzenia. Każda operacja składała się z osiemnastu zabiegów.



Rys. 7.4. Pomiar topografii powierzchni [226]

Tabela 7.2. Parametry skrawania

Prędkość skrawania m/min	Posuw na ostrze mm/ostrze	Prędkość posuwu mm/min	Prędkość obrotowa freza obr/min	Głębokość skrawania mm	Szerokość frezowania mm
38	0,30	100	1000	6	5
	0,25	200			
	0,20	300			
	0,15	400			
	0,10	500			
	0,05	600			
76	0,30	200	2000	6	5
	0,25	400			
	0,20	600			
	0,15	800			
	0,10	1000			
	0,05	1200			
114	0,30	300	3000	6	5
	0,25	600			
	0,20	900			
	0,15	1200			
	0,10	1500			
	0,05	1800			

Badania prowadzono równolegle przy użyciu dwóch identycznych narzędzi skrawających (frezów). Operacje przeprowadzone pierwszym narzędziem w badaniach oznaczono jako Net\_1, drugim jako Net\_2.

### 7.1.2. Analiza wyników badań

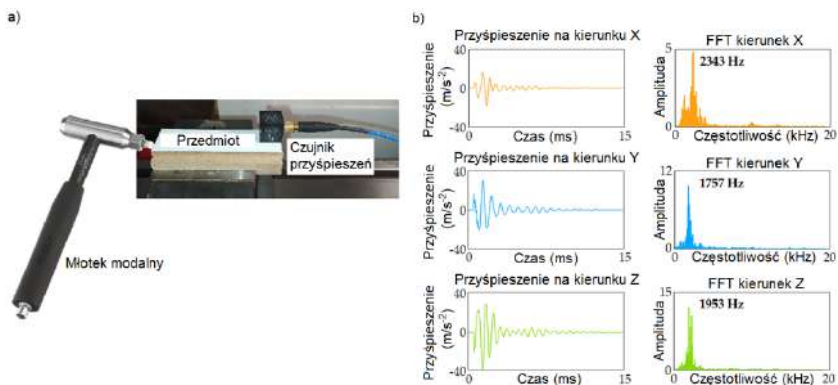
Ważnym zagadnieniem w analizie sygnału przyśpieszenia (drgań) w dziedzinie częstotliwości jest określenie charakterystyki dynamicznej układu masowo-dyssypacyjno-sprężystego (MDS) (rys. 7.3b). Można ją uzyskać za pomocą modelowania matematycznego lub doświadczalnie. Rzeczywisty układ MDS ma wiele stopni swobody (postaci, mod drgań) w wielu kierunkach. Do większości zagadnień wystarcza przyjęcie dwóch prostopadłych do siebie kierunków podatności układu MDS (rys. 7.3b). W celu wyznaczenia charakterystyki dynamicznej układu MDS na wejściu układu podano wymuszenie sygnałem. Takim sygnałem jest impuls Diraca (7.1):

$$(t) = \begin{cases} 0 & t \neq 0 \\ +\infty & t = 0 \end{cases} \quad (7.1)$$

Technicznie impuls Diraca zastępowany jest tu krótkotrwałym wymuszeniem, uderzeniem młotkiem wyposażonym w czujnik siły. W badaniach zastosowano młotek modalny KISTLER 9724A. Widmo takiego impulsu jest mniej więcej płaskie do częstotliwości będącej odwrotnością czasu jego trwania. A ramach analizy, ze zmierzonego sygnału, zawierającego sygnały siły wymuszającej oraz przyspieszenia obiektu dokonano analizy modalnej umożliwiającej wyznaczenie charakterystyki dynamicznej układu MDS. Istotną zaletą wymuszenia impulsowego jest to, że rozkład energii uderzenia widoczny jest w widmie ciągłym do częstotliwości będącej w przybliżeniu odwrotnością czasu trwania impulsu.

Do analizy charakterystyki dynamicznej układu opracowano program własny w środowisku LabVIEW. Pozwala on na prowadzenie automatycznej analizy zarejestrowanych sygnałów pod kątem ich przydatności do określenia charakterystyki dynamicznej układu MDS. Ręczne przeglądanie całego sygnału, ocena każdego uderzenia i każdej odpowiedzi układu oraz odrzucenia niepoprawnych wymaga dużego nakładu pracy i czasu oraz doświadczenia i uwagi. Automatyczna fragmentacja, zastosowana w programie, opiera się na wykryciu początku pojedynczego uderzenia. Jest on rozpoznany na sygnale siły, jako przekroczenie progu będącego pięciokrotnością maksymalnej wartości z pierwszych 100 próbek sygnału. Następnie wyodrębniane zostaje 750 próbek (rys. 7.5).

Dla zastosowanej częstotliwości próbkowania 50 kHz okno pojedynczego uderzenia wynosi 15 ms. Dłuższe okno może spowodować nałożenie na siebie następujących po sobie uderzeń, co program rozpoznałby jako uderzenie niepoprawne. Rysunek 7.5 przedstawia przykład przebiegów czasowych oraz ich widm wyodrębnionych z całego sygnału z wykorzystaniem powyższych kryteriów.



Rys. 7.5. Wymuszenie impulsowe (a), przebiegi czasowe oraz ich widma wyodrębnione z całego sygnału (b) [226]

Przeprowadzona analiza pozwoliła, w efekcie końcowym, na wyznaczenie częstości własnych układu MDS na trzech analizowanych kierunkach:  $\omega_{ox} = 2343$  Hz;  $\omega_{oy} = 1757$  Hz i  $\omega_{oz} = 1953$  Hz. Wiadomo, że częstość przechodzenia kolejnych ostrzy freza wynosi (7.2) [308]:

$$\omega_{fz} = \frac{n \cdot z}{60} \quad (7.2)$$

gdzie:  $n$  – prędkość obrotowa freza obr/min,  $z$  – liczba ostrzy freza.

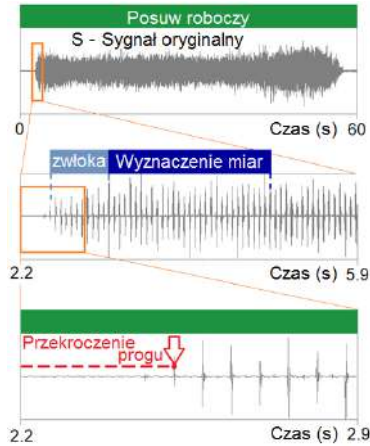
Oznacza to, że wielokrotność częstości przechodzenia ostrzy powinna być różna od częstości drgań własnych w celu uniknięcia częstości rezonansowej. Ponieważ, prowadzi to wprost do wymuszenia drgań w częstości rezonansowej (7.3), która jest bardzo bliska częstości drgań własnych:

$$\omega_{rez} = \omega_o \sqrt{1 - 2d^2} \quad (7.3)$$

Dla większości obrabiarek współczynnik tłumienia  $d$  jest bardzo mały (0,001-0,050), więc (7.4):

$$\sqrt{1 - 2d^2} \approx 1 \quad (7.4)$$

Do analizy zarejestrowanych sygnałów przyspieszenia przygotowano własny program komputerowy (w środowisku LabVIEW) umożliwiający w wybranych odcinkach czasu wyznaczenie wybranych wartości miar rejestrowanych sygnałów w dziedzinie czasu jak i częstości (rys. 7.6). Działanie programu polegało na automatycznym wyznaczaniu wartości rejestrowanych sygnałów w ściśle określonych odcinkach czasowych.



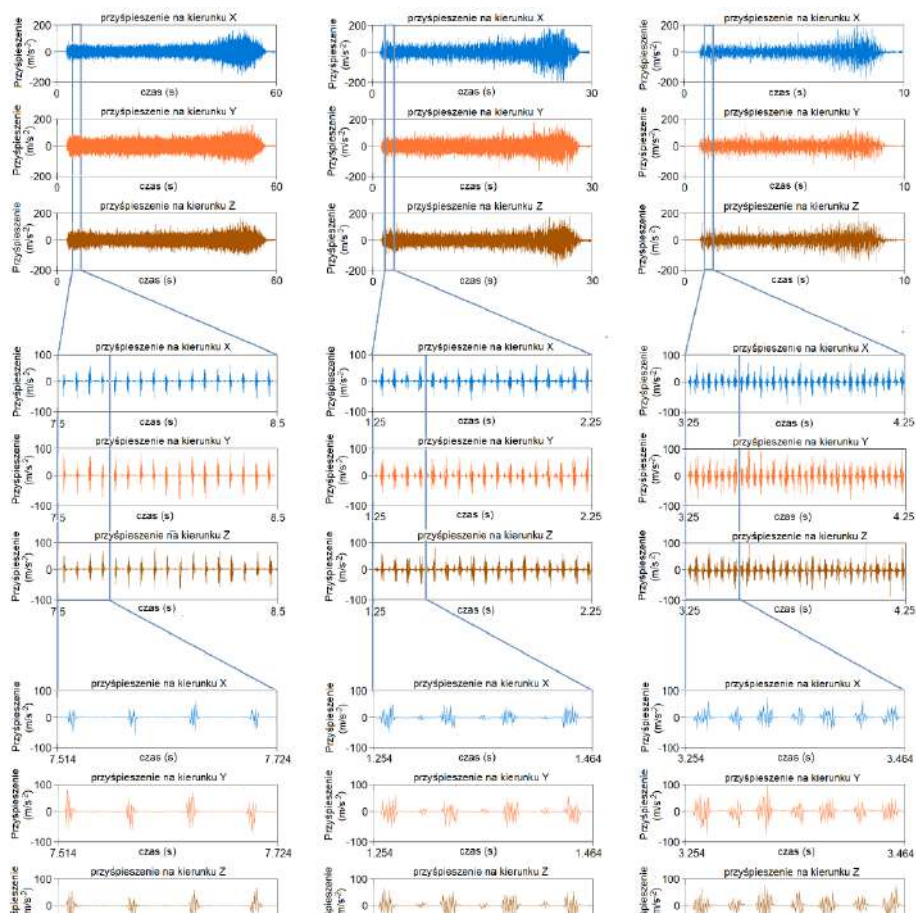
Rys. 7.6. Metodyka wyznaczania miar sygnałów [226]

Do wyznaczania miar zarejestrowanych sygnałów przyspieszeń na kierunkach:  $a_x$ ,  $a_y$  i  $a_z$  w dziedzinie czasu oraz częstotliwości postanowiono przyjąć powszechnie znane i stosowane miary w analizie oceny chropowatości powierzchni (tab. 7.3).

Tabela 7.3. Wyodrębnione cechy z sygnału przyspieszenia

Funkcja sygnału	Wyrażenie matematyczne	Funkcja sygnału	Wyrażenie matematyczne
Maksimum	$\max(x_i) i = 1, \dots, n$	Energia	$\sum_{i=1}^n x_i^2$
Odchylenie standardowe	$\sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$	Entropia Shannona	$-\sum_{i=1}^n x_i^2 \log(x_i^2)$
Średnia kwadratowa	$\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i^2}$	logarytm entropii energetycznej	$\sum_{i=1}^n \log(x_i^2)$
Skośność	$\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)^{3/2}}$	4. moment	$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4$
Kurtoza	$\frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^4}{(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2)^2} - 3$	Impuls	$\frac{\max(x_i) i = 1, \dots, n}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n  x_i }$

Szczegółowy opis programu został przedstawiony w pracy [160]. Na rysunku 7.7 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe sygnałów przyspieszeń na kierunkach:  $a_x$ ,  $a_y$  i  $a_z$  w zależności od wartości prędkości posuwu ( $v_f$ ) i prędkości skrawania ( $v_c$ ).



Rys. 7.7. Zależność sygnału akcelerometru w procesie frezowania [226]

W dzisiejszych czasach trójwymiarowa topograficzna analiza powierzchni (3D), stopniowo, zdobywa coraz większą popularność w przemyśle i wydaje się, że jej rola w projektowaniu i produkcji w przyszłości będzie coraz bardziej istotna. Topografia powierzchni potocznie pojmowana jest, jako zbiór szczegółowych cech trójwymiarowych pewnego ograniczonego obszaru geometrii powierzchni.

Pomiary chropowatości 3D wykorzystywane są, aby lepiej zrozumieć naturę powierzchni. Wszelkie zagadnienia współpracy dwóch powierzchni to zjawiska trójwymiarowe, dlatego też ich opis nie może ograniczać się do analizy profilu.

Pomiary 3D odnoszą się do powierzchni i określa się je pomiarami topografii, pomiarami stereometrii lub stereometrycznymi, natomiast pomiary 2D odnoszą się do profilu i określa się je pomiarami nierówności profilu. Zarówno pomiary 2D i 3D określa się pomiarami chropowatości, co jest pewnym uproszczeniem, ponieważ chropowatość dalej określa się, jako zbiór najmniejszych nierówności powierzchni o stosunkowo małym odstępnie, zazwyczaj zawierający nierówności, które są wynikiem specyfiki procesu produkcyjnego z wyłączeniem falistości i błędów kształtu.

Parametr  $S_q$  to średnia kwadratowa wysokość powierzchni. Definiowany jest jako średnia kwadratowa wartości odchyłek powierzchni  $z(x,y)$  w obszarze próbkowania (7.5):

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint_A z^2(x,y) dx dy} \quad (7.5)$$

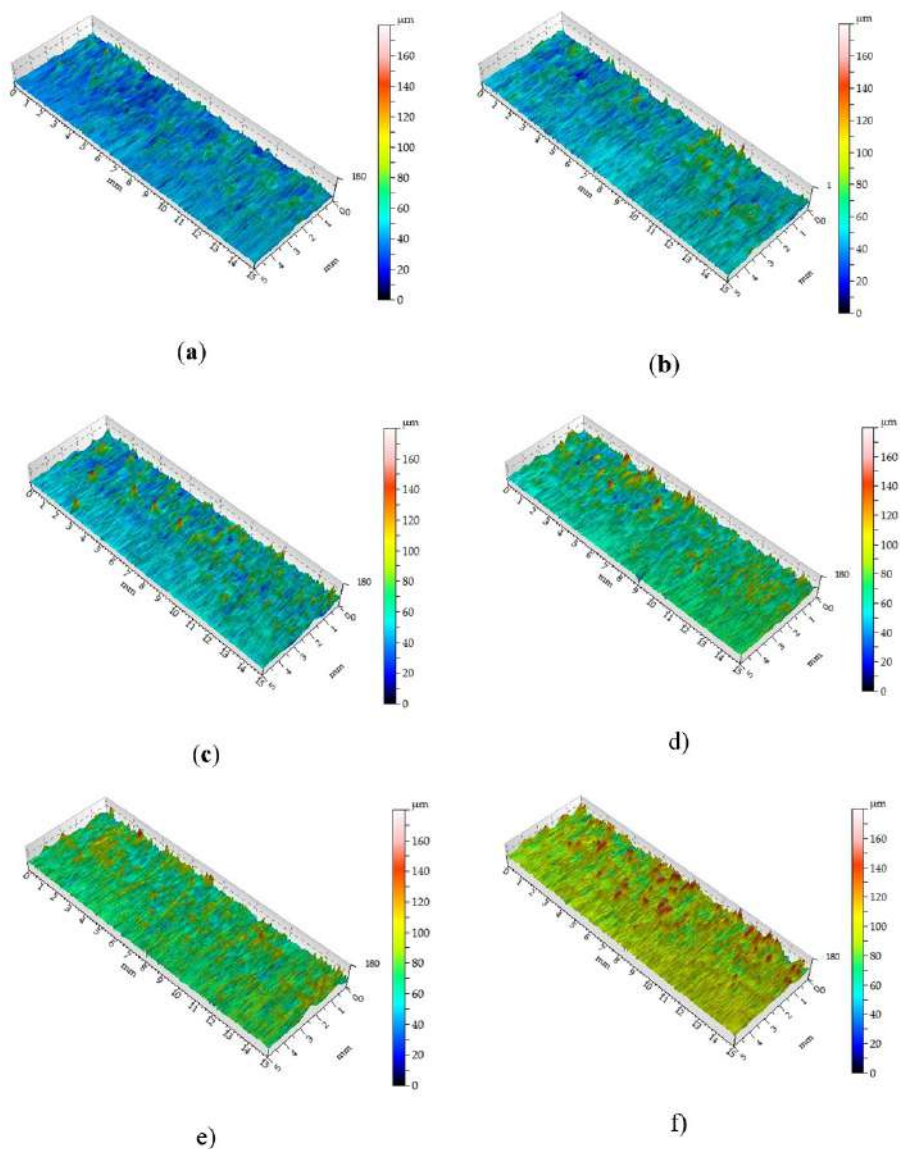
gdzie:  $A$  – pole powierzchni,  $z$  – pozycja wysokości powierzchni  $x, y$ ,  $x, y$  – długości w kierunkach prostopadłych.

$S_q$  jest parametrem statystycznym o stosunkowo małej wrażliwości na błędy pomiaru. Jest często stosowany w pomiarach powierzchni.

Na rysunku 7.8 przedstawiono przykładową topografię powierzchni uzyskaną w procesie frezowania przy prędkości skrawania 76 m/min i sześciu wartości prędkości posuwu. Na podstawie mapy topografii, w wybranych odcinkach pomiarowych (rys. 7.4), określano wskaźnik chropowatości  $S_q$ .

Na przedstawionych mapach topografii powierzchni wyraźnie widoczne są dwa obszary o różnej topografii powierzchni. Pierwszy obszar występuje w zewnętrznych warstwach płyty MDF, na głębokości około 3 mm. To zróżnicowanie można wyjaśnić wielowarstwową budową płyty MDF. Szvajka i in. [160] przedstawili rozkład gęstości i twardości na przekroju poprzecznym płyty MDF. Uzyskana topografia powierzchni dokładnie odzwierciedla zmiany zarówno twardości, jak i gęstości materiału płyty [309].

W przeprowadzonych badaniach chropowatości powierzchni obrabianej potwierdzono powszechnie znane z literatury [244, 310] oraz wcześniejszych badań autorów zależności dotyczące wpływu zarówno prędkości skrawania, jak i prędkości posuwu na chropowatość powierzchni obrabianej. Zaobserwowano tendencję malejącą parametru  $S_q$  wraz ze wzrostem prędkości skrawania i/lub zmniejszeniem prędkości posuwu.

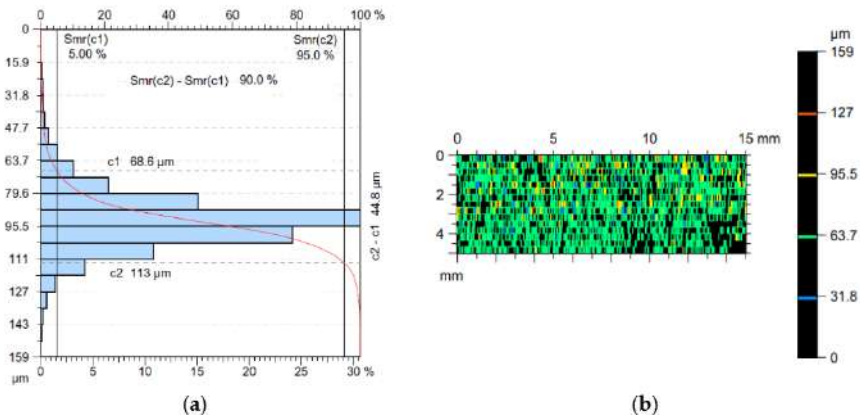


Rys. 7.8. Topografia powierzchni: a) prędkość skrawania 76 m/min i prędkość posuwu 200 mm/min, b) prędkość skrawania 76 m/min i prędkość posuwu 400 mm/min, c) prędkość skrawania 76 m/min i prędkość posuwu 600 mm/min, d) prędkość skrawania 76 m/min i prędkość posuwu 800 mm/min, e) prędkość skrawania 76 m/min i prędkość posuwu 1000 mm/min, f) prędkość skrawania 76 m/min i prędkość posuwu 1200 mm/min [226]

Kolejną analizowaną cechą topografii była krzywa Abbotta–Firestone’a, opisująca rozkład materiału w profilu [311]. Należy ją traktować jako procentowy

wzrost udziału poszczególnych punktów topografii dla całego analizowanego obszaru. Z matematycznego punktu widzenia wykres ten można traktować jako rozkład prawdopodobieństwa znalezienia punktu na danym obszarze o wysokości mniejszej niż dla danych współrzędnych. Na tej podstawie możliwe jest znalezienie właściwości danego profilu w kategoriach funkcji użyteczności struktury geometrycznej powierzchni. Oś pozioma krzywej Abbotta–Firestone’a przedstawia współczynnik nośności w ujęciu procentowym, natomiast oś pionowa przedstawia głębokość określoną w jednostkach miary [312].

Rysunek 7.9 przedstawia krzywą udziału materiału powierzchni uzyskanej w procesie frezowania dla następujących parametrów skrawania:  $v_c = 76$  m/min,  $v_f = 1200$  mm/min. Powierzchnia próbki wykonanej z parametrami skrawania opisanymi powyżej charakteryzuje się mniej skoncentrowanym rozkładem gęstości rzędnych w porównaniu z powierzchnią próbki wyciętej przy niższych posuwach, ale tej samej prędkości skrawania. W przypadku powierzchni pokazanej na rys. 7.8f, 90% materiału jest skoncentrowane w zakresie  $44,8 \mu\text{m}$  (rys. 7.9a). Najbardziej skoncentrowany rozkład (dla prędkości skrawania  $v_c = 76$  m/min) charakteryzuje powierzchnię, dla której wartość posuwu wynosiła  $v_f = 200$  mm/min, przy czym 90% materiału jest skoncentrowane w wysokości profilu  $28,2 \mu\text{m}$ . W przypadku powierzchni obrabianych z prędkością posuwu  $v_c = 76$  m/min i  $v_f = 1200$  mm/min, ponad 28% materiału ulega koncentracji na wysokości profilu wynoszącej około  $90 \mu\text{m}$ , natomiast w przypadku powierzchni obrabianej z prędkością posuwu  $v_f = 200$  mm/min, ponad 31% materiału ulega koncentracji na wysokości profilu wynoszącej około  $73 \mu\text{m}$ .



Rys. 7.9. Krzywa Abbotta–Firestone’a (a) i wykres konturowy powierzchni uzyskanej dla parametrów skrawania  $v_c = 76$  m/min i  $v_f = 1200$  mm/min (b) [226]

Wyniki pokazują, że prędkość obrotowa narzędzia i prędkość posuwu mogą wpływać na chropowatość powierzchni i wynikową wartość parametru  $S_q$  w procesie frezowania płyt MDF. Znalezienie optymalnej kombinacji  $v_c$  i  $v_f$  może po-

móc w osiągnięciu pożądanej chropowatości powierzchni [243, 284]. Wykres konturowy (rys. 7.9b) jest podstawowym narzędziem w analizie chropowatości i topografii powierzchni zgodnie z normą ISO 25178.

Przy niższych wartościach  $v_c$  i wyższych  $v_f$  można uzyskać bardziej chropowatą teksturę powierzchni z większą liczbą wzniesień i dolin. Z drugiej strony, wyższe  $v_c$  i wyższe  $v_f$  mogą prowadzić do szybszego usuwania materiału, co skutkuje gładszą teksturą powierzchni. Jednak wyższe  $v_c$  i niższe  $v_f$  mogą prowadzić do wyższych temperatur skrawania, co ma niekorzystny wpływ na płytę MDF i może skutkować bardziej chropowatą teksturą powierzchni.

Do realizacji odwzorowania danych wejściowych na wskaźnik chropowatości powierzchni  $S_q$  użyto sieci radialnych (RBF) dostępnych w pakiecie oprogramowania MATLAB Neural Network TOOLBOX. W trakcie licznych eksperymentów z sieciami typu RBF odkryto ich ograniczoną przydatność do oceny niektórych przypadków szczególnych. Funkcja propagacji neuronów wejściowych tej sieci ma charakter radialny, w środowisku MATLAB jest to funkcja Gaussa, a sieć dzieli podprzestrzeń danych wejściowych na obszary będące w „sferze wpływów” kolejnych neuronów. Sieć ta źle aproksymuje dane wykraczające poza zakres, na którym była uczona. Łączy się to z podstawową niedogodnością, czyli wymogiem planowania i przeprowadzania obszerniejszych badań z większą liczbą pomiarów. Należy bowiem pokryć cały zakres zmienności parametrów skrawania. Jest to dość kłopotliwe i stanowi poważną wadę w stosunku do sieci FFBP.

Przeprowadzono kilkadziesiąt doświadczeń z sieciami radialnymi. Na początek sprawdzono, jak sieć RBF odpowiada na różne zestawy danych wejściowych. Jediną możliwością wpływania na wynik predykcji sieci RBF jest ustalanie sparametryzowanego kształtu funkcji radialnej każdego neuronu wejściowego. Im wyższa wartość parametru „spread”, w skrócie  $sp$ , tym „bardziej spłaszczona” jest funkcja radialna licząc miarą normy euklidedowej w przestrzeni zmiennych wejściowych. Wymagało to dodatkowych prób zoptymalizowania tego parametru.

Chcąc wyznaczyć optymalną wartość wspomnianego parametru  $sp$  metodą empiryczną powinno przeprowadzić się liczne testy sieci na danych ze wszystkich prób. Można ją wyliczyć metodą analityczną zaprzęgając skomplikowany aparat matematyczny. Nie jest to jednak celem niniejszych badań. Opierając się własnych doświadczeniach, można przyjąć  $sp = 30000$ . Uderzające jest to, że odpowiedź sieci RBF dla niskich wartości tego parametru (500) pokrywa się z rzeczywistym przebiegiem wartości parametru  $S_q$ . Jest to zgodne z algorytmem tworzenia sieci, który opiera się na przyjęciu liczby neuronów radialnych równej liczbie wektorów uczących.

Ponieważ obszary o mniejszym promieniu w przestrzeni danych wejściowych obejmowane przez neurony o niższym  $sp$  pokrywają się tylko w najbliższym sąsiedztwie, nie wpływają w istotnym stopniu na neurony „leżące” dalej. Dzięki temu możliwa jest dokładna aproksymacja danych uczących sklejanymi funkcjami radialnymi o mniejszym  $sp$ . Dla dużego  $sp$  otrzymuje się błędy aproksymacji, komunikowane przez program MATLAB, będące efektem nakładania się większej

liczby powierzchni Gaussowskich. Podobnie jak w przypadku sieci FFBP celem nie jest uzyskanie idealnego wyniku dla danych trenujących, lecz wyrównanie błędów dla wszystkich zestawów danych. Optymalną wartość współczynnika  $\sigma_p$  otrzymuje się w wyniku kompromisu, między błędami na pliku uczącym, a zdolnością uogólnienia dla plików testujących. W dalszych próbach z tym typem sieci przyjęto wartość  $\sigma_p = 30000$ .

Dokonano porównania jakości odpowiedzi sieci uczonych na różnych kombinacjach danych wejściowych, w celu analizy przydatności miar i parametrów skrawania pod kątem ich zastosowania w wartości chropowatości powierzchni przy użyciu sieci RBF. Wzięto pod uwagę szereg zestawów z różnymi kombinacjami zmiennych (tab. 7.4). Zweryfikowano tu także brak przydatności niektórych miar sygnałów przyspieszenia do oceny chropowatości powierzchni obrobionej. Wynik przedstawiono w tab. 7.4 (najkorzystniejszy rezultat, wyróżniona kolumna).

Tabela 7.4. Porównanie błędów predykcji sieci w zależności od przyjętej miary sygnału

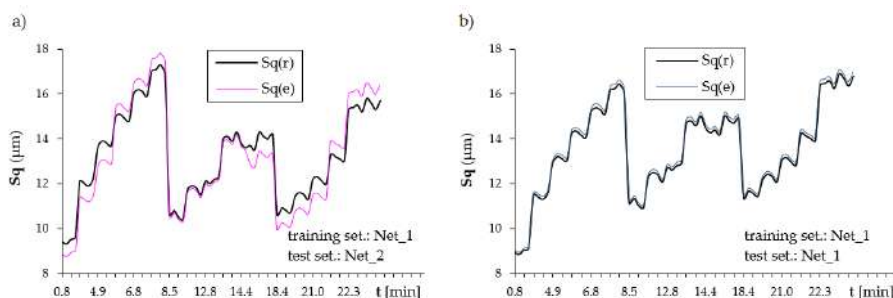
Funkcja sygnału	RMS $\mu\text{m}$									
	0,377	0,347	0,242	0,287	0,248	0,334	0,223	0,231	0,289	0,209
Maksimum	X									
Odchylenie standardowe	X	X	X							
Średnia kwadratowa	X	X	X	X	X	X	X	X		X
Skośność	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Kurtoza	X	X	X	X	X	X	X			
Energia	X	X	X	X	X					
Entropia Shannona	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Logarytmiczna entropia energetyczna	X	X	X	X	X	X				
4. moment	X	X	X	X						
Impuls	X	X								
Prędkość skrawania	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Prędkość posuwu	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X

Dokładność oszacowania wskaźnika chropowatości powierzchni ( $S_q$ ) jest oceniana na podstawie błędu średniokwadratowego (RMS) (równanie (7.6)):

$$RMSE = \sqrt{\sum (S_{q(r)} - S_{q(e)})^2 / N} \quad (7.6)$$

gdzie:  $S_{q(r)}$  i  $S_{q(e)}$  – są mierzone i szacowane parametry chropowatości powierzchni,  $N$  – liczba uzyskanych pomiarów.

Połączenie danych do uczenia sieci radialnej było głęboko uzasadnione i prze-myślane. Ucząc sieć perceptronową FFBP poszukuje się równowagi między błędami uczenia i testowania wpływając na proces treningu poprzez zakłócenia wag i pruning neuronów. Polegając na informacji tylko o błędach uczenia trudno byłoby przyjąć kryterium nauczania sieci. W przypadku sieci radialnych uczenie na połączonych danych ma podobne znaczenie. Ponadto, jak wspomniano wcześniej, sieci radialne posiadają słabszą zdolność ekstrapolacji i interpolacji wyników niż sieci FFBP. Oznacza to, i potwierdza się w badaniach, że próba ucząca musi pokrywać cały zakres zmienności danych wejściowych.



Rys. 7.10. Odpowiedzi sieci RBF testowanych na różnych zestawach danych; a, b – objaśnienia w tekście [226]

Wykres (rys. 7.10a) przedstawia odpowiedzi sieci uczonych na zbiorze Net\_1 w oparciu o prędkość skrawania  $v_c$ , prędkość posuwu  $v_f$  i wybrane miary sygnałów przyspieszeń przedstawione w tab. 7.4, testowanych na zbiorze Net\_2. Po prawej stronie (rys. 7.10b) znajdują się wyniki sieci uczonych i testowanych na zbiorze Net\_1.

Przedstawione wykresy (rys. 7.10a) wydają się potwierdzać wcześniejsze wnioski wyciągnięte z analizy uczenia i testowania sieci. W próbie Net\_1 początkowa wartość wskaźnika  $S_q$  były na wyższym poziomie niż w próbie Net\_2. Ma to odzwierciedlenie w ocenie wskaźnika przez sieć RBF. Charakterystyczny spadek lub wzrost wartości wskaźnika  $S_q$  na wyjściu sieci RBF świadczy o przekroczeniu, przez zmienne wejściowe, zakresu treningowego i jest poważną wadą tego

typu sieci. Całe przebiegi pokazane zostały celowo, aby uwidocznic duże fluktuacje odpowiedzi sieci i nienajlepszej aproksymacji danych odpowiadających wartości wskaźnika  $S_q$ .

Jednym ze sposobów optymalizacji parametrów modelu rozmytego są metody klasteryzacyjne. Wykorzystywany jest w nich fakt automatycznego wykrywania pewnych grup punktów pomiarowych i charakterystycznych wzorców zachowania się układu, które mogą być reprezentowane przez jedną regułę lub ich spójny zbiór. Opracowana przez Yaegra i Fileva metoda potencjału (mountain clustering) [313] jest jednym z najlepszych sposobów służących do dzielenia zadanego zbioru na pewną liczbę klastrów/podzbiorów. Aby jednak stworzyć określone podzbiory konieczne jest ustalenie tak zwanych środków klastrów. Generalnie środkiem takiego klastra może być dowolny punkt mierzonej przestrzeni. Takie podejście prowadzi jednak do kosztownych obliczeniowo algorytmów o złożoności wykładniczej.

W odrobinę inną stronę idzie stworzona przez Chiu i opisywana w tym artykule subtraktywna metoda potencjału [314]. Zakłada ona bowiem, że środkiem klastra może być jedynie element zbioru punktów pomiarowych. Metoda Chiu wyznacza zatem zaczątki klastrów złożone z pojedynczego punktu, który stanowi startowy element poszukiwanego podzbioru. W przypadku subtraktywnej metody potencjału przeszukiwana przestrzeń ogranicza się zatem do dzielonego zbioru punktów.

Wyznaczone za pomocą subtraktywnej metody potencjału środki klastrów mogą posłużyć do budowy reguł wnioskowania rozmytego na potrzeby różnych algorytmów sztucznej inteligencji [315, 316]. W szczególności można je wykorzystywać do budowy modeli przewidujących zachowanie różnego rodzaju złożonych systemów w czasie – innymi słowy do tworzenia algorytmów uczenia maszynowego.

Identyfikacja systemu z wykorzystaniem klastrowania obejmuje tworzenie klastrów w przestrzeni danych i translację tych klastrów na reguły TSK tak, aby uzyskany model był zbliżony do identyfikowanego systemu. Celem algorytmu identyfikacji grupowania subtraktywnego jest oszacowanie zarówno liczby, jak i początkowej lokalizacji centrów skupień oraz wyodrębnienie reguł rozmytych TSK z danych wejściowych/wyjściowych. Grupowanie subtraktywne działa poprzez znalezienie optymalnego punktu danych w celu zdefiniowania centrum klastra na podstawie gęstości otaczających punktów danych. Ta metoda jest szybką metodą grupowania przeznaczoną do rozwiązywania problemów o dużych wymiarach z umiarkowaną liczbą punktów danych. Dzieje się tak, ponieważ jego obliczenia rosną liniowo wraz z wymiarem danych i kwadratem liczby punktów danych.

Klasyczna logika nie zapewnia odpowiednich narzędzi do analizy złożonych systemów, w których cele oraz zależności wejścia/wyjścia są często nieprecyzyjnie określone, a co za tym idzie, trudne do ilościowego ujęcia. Stąd też nastąpił znaczny postęp w zakresie zastosowań metod opartych na logice rozmytej. Jej

techniki bazują bowiem na wnioskowaniu zbliżonym do rozumowania ludzkiego, w związku z czym mają szerokie spectrum praktycznych zastosowań, zwłaszcza w zagadnieniach modelowania i sterowania.

Idea subtraktywnej metody potencjału (mountain clustering) polega na wyznaczeniu dla każdego punktu  $x_i$  funkcji  $P$  reprezentującej potencjał tego punktu. Rozważono zbiór  $N$  punktów danych  $\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$  określony przez  $m$ -wymiarowe  $x_j$ . Aby nie utracić wartości danych należy przyjęto tę funkcję jako przestrzeń znormalizowaną, więc wszystkie dane są znormalizowane do przedziału  $[0,1]$ . Przyjmuje się zatem, że potencjał w  $i$ -tym punkcie zbioru wyraża się następującym wzorem (7.7):

$$P(i) = \sum_{j=1}^N e_i^{-\alpha \|x_i - x_j\|^2} \quad (7.7)$$

dla  $i = 1, \dots, N$ , oraz  $\alpha = 4/(r_a)^2$  dla pewnej stałej  $r_a > 0$ . Z postaci funkcji potencjału widać wyraźnie, że potencjał punktu zbioru jest tym wyższy im więcej innych punktów znajduje się w jego bezpośrednim otoczeniu. Własność ta sprawia, że subtraktywna metoda potencjału jest dużo bardziej odporna na zakłócenia spowodowane pojawieniem się przypadkowych punktów niż takie algorytmy klasteryzacji, jak C-means.

Po przypisaniu potencjału  $P(i)$  każdemu punktowi zbioru następuje wybór pierwszego środka klastra, którym zawsze jest punkt o największym potencjale. W związku z tym  $c_1 = x_u$ , gdzie  $u = \arg \max_i P(i)$ , a  $P(u)$  oznaczany jest przez  $P^*$  i uznaje się za potencjał odniesienia dla procedury wyborów pozostałych środków klastrów. Ponadto za każdym razem gdy dokonuje się wyboru kolejnego środka kolejnego klastra  $c_k = x_u$  (dla właściwego  $u$ ) modyfikowana jest wartość funkcji potencjału przypisanej do poszczególnych punktów zbioru w sposób następujący (7.8):

$$P(i) = P(i) - P(u)e^{-\beta \|x_i - x_j\|^2} \quad (7.8)$$

gdzie:  $\beta = 4/(r_b)^2$  dla pewnego  $r_b > 0$  jest pewną stałą definiującą zasięg działania funkcji potencjału.

Ze względów praktycznych przyjmuje się, że  $r_b > r_a$  i najczęściej wartość ta wynosi  $r_b = 1,25r_a$ . Wyboru kolejnych środków klastrów dokonuje się dopóki potencjał wszystkich punktów przekracza pewną ustaloną wartość  $\varepsilon_d P^*$  dla  $\varepsilon_d$  wybranego z przedziału  $(0, 1)$ . Działanie subtraktywnej metody potencjału opisuje poniższy algorytm:

1. Wybierz  $r_a$ ,  $r_b$ ,  $\varepsilon_u$  i  $\varepsilon_d$ .
2. Wyznacz wartości funkcji potencjału  $P(i)$  dla wszystkich punktów zbioru ( $i = 1, \dots, N$ ).
3. Wybierz punkt  $x_u$  o największym potencjale  $P_u = P^*$  i przyjmij, że jest pierwszym środkiem klastra  $c_1$ .
4. Przyjmij  $k = 2$ .

5. W pętli wykonuj następujące kroki:

- a) Wybierz punkt  $x_u$  o największym potencjale  $P_u$ ,
- b) Jeśli  $P_u > \varepsilon_u P^*$  to  $x_u$  staje się środkiem  $k$ -tego klastra. Jeśli  $\varepsilon_u P^* > P_u > \varepsilon_d P^*$  to  $x_u$  staje się środkiem  $c_k$   $k$ -tego klastra jeżeli spełnia dodatkowe warunki (zależne od sposobu implementacji algorytmu),
- c) Przyjmij  $k = k+1$ ,
- d) Jeśli  $P_u > \varepsilon_d P^*$  zakończ działanie pętli – nie ma więcej środków klastrów.

Centrum klastra znalezione w danych uczących to punkty w przestrzeni cech, których sąsiedztwo mapuje do danej klasy. Każde centrum klastra można przetłumaczyć na rozmytą regułę identyfikacji klasy. Uogólniony model TSK typu 1 można opisać za pomocą rozmytych reguł IF-THEN, które reprezentują relacje wejścia/wyjścia systemu. W przypadku modelu TSK typu 1 z wieloma wejściami i jednym wyjściem (MISO) pierwszego rzędu, jego  $k$ -ta reguła może być wyrażona jako (7.9):

$$\begin{aligned} & \text{IF } x_1 \text{ is } Q_{1k} \text{ and } x_2 \text{ is } Q_{2k} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } Q_{nk}, \\ & \text{THEN } Z \text{ is } w^k = p_0^k + p_1^k x_1 + p_2^k x_2 + \dots + p_n^k x_n \end{aligned} \quad (7.9)$$

gdzie:  $x_1, x_2, \dots, x_n$  i  $Z$  – zmienne lingwistyczne,  $Q_{1k}, Q_{2k}, \dots, Q_{nk}$  – zbiory rozmyte  $X_1, X_2, \dots, X_n, y, p_0^k, p_1^k, p_2^k, \dots, p_n^k$  – parametry regresji.

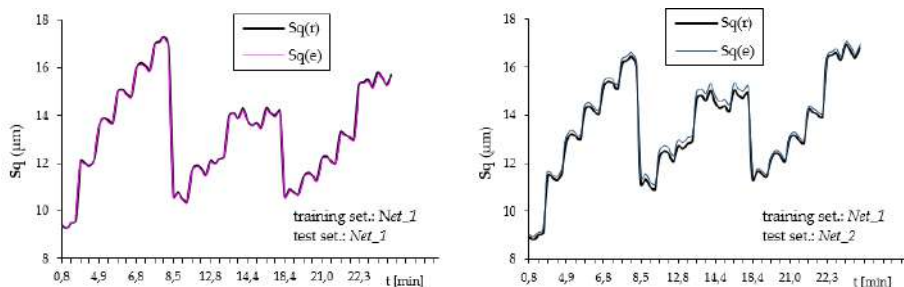
W metodzie grupowania subtraktywnego  $x_j$  jest  $j$ -tą cechą wejściową  $x_j$  ( $j \in [1, n]$ ), a  $Q_{jk}$  jest MF w  $k$ -tej regule związanej z  $j$ -tą wejściową cechą. MF  $Q_{jk}$  można uzyskać jako (7.10):

$$Q_{jk} = \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x_j - x_{jk}^*}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (7.10)$$

gdzie:  $x_{jk}^*$  –  $j$ -ta cecha wejściowa  $x_k^*$ ,  $\sigma$  – odchylenie standardowe Gaussa MF podane jako (7.11):

$$\sigma = \sqrt{1/2\alpha} \quad (7.11)$$

Stosując podejście rozmyte TSK, można uzyskać model rozmyty TSK z regułami opisującymi  $S_q$  a wybrane miary sygnałów przyśpieszenia i parametry kinematyczne jako zmienne wejściowe. Identyfikacja systemu z wykorzystaniem klastrowania obejmuje tworzenie klastrów w przestrzeni danych i translację tych klastrów na reguły TSK tak, aby uzyskany model był zbliżony do zidentyfikowanego systemu. Promień klastra jest ograniczony do zakresu  $[0,15; 1,0]$  z krokiem o wielkości 0,15. Rysunek 7.11 podsumowuje wyniki prognozowania wskaźnika  $S_q$  z Net\_1 (uczenie) i Net\_2 (testowanie). Wyniki przedstawionej metody lepiej pasują do danych eksperymentalnych niż wyniki otrzymane przy pomocy radialnej sieci neuronowej.



Rys. 7.11. Ocena chropowatości powierzchni przy użyciu różnych systemu rozmytego opartego na TSK: a) wynik uczenia się z Net\_1 oraz testowanie na Net\_1, b) uczenie na Net\_1 testowanie na Net\_2 [226]

W tabeli 7.5 zestawiono porównanie błędu szacowania wartości wskaźnik  $Sq$  uzyskanego za pomocą sieci RBF oraz logiki rozmytej. TSK ma najniższy błąd średniej kwadratowej.

Tabela 7.5. Podsumowanie błędu średniokwadratowego (RMSE) z wyników eksperymentalnych z różnymi metodami sztucznej inteligencji

Metody sztucznej inteligencji	Zestaw treningowy: Net_1	Zestaw treningowy: Net_2
	RMSE $\mu\text{m}$	RMSE $\mu\text{m}$
Sieć neuronowa RBF	0,273	0,379
TSK	<b>0,066</b>	<b>0,198</b>

## 7.2. Inteligentna identyfikacja materiału obrabianego

Kompozyty o osnowie polimerowej wzmocnione włóknami węglowymi, zaliczane do grupy CFRP (Carbon Fiber Reinforcement Plastics), są interesującą grupą materiałów inżynierskich [226, 317, 318]. W przypadku wyrobów z CFRP proces wiercenia stanowi niezbędny etap produkcji mechanicznej podczas procesu montażu [159, 319]. kompozyty CFRP mają tendencję do generowania pewnych defektów (w tym zadziorów i delaminacji) ze względu na naturę włókna węglowego i laminowanej struktury [320, 321]. Wiele eksperymentów wykazało, że defekty te znacznie zmniejszają wytrzymałość i odporność na zmęczenie materiałów CFRP, co nie tylko negatywnie wpływa na użyteczność produktów CFRP, ale także wpływa niekorzystnie na proces dalszego montażu [322, 323]. Stąd też niniejsze badania kładą nacisk na rozpoznawanie zadziorów i rozwarstwień CFRP powstałych w procesie wiercenia.

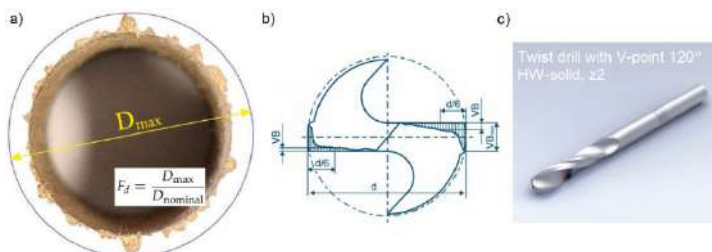
Chociaż dostępnych jest wiele metod pomiaru defektów wywołanych wierceniem, wciąż trudno je odtworzyć ze względu na małą skuteczność opracowanych do tego celu algorytmów. Dlatego głównym celem tego badania jest przedstawienie nowej metody rozpoznawania zadziorów i rozwarstwień powstałych w procesie wiercenia w oparciu o metody segmentacji progowej i przy użyciu rozmytego układu Takagi–Sugeno–Kang (TSK) z klasteryzacją subtraktywną. Proponowana metoda została zweryfikowana poprzez eksperymentalne próby wierceń.

W ostatnich latach hybrydowe struktury wykonane z tworzyw sztucznych wzmocnianych włóknem węglowym (CFRP) przyciągnęły wiele uwagi w wielu gałęziach przemysłu. W przeciwieństwie do hybrydowych kompozytów metal/włókno węglowe, brakuje badań nad laminatami składającymi się z CFRP i materiałów drewnopochodnych. Zadziory i rozwarstwienia powstające podczas wiercenia są głównymi wadami CFRP i kompozytów drewnopochodnych. Ta ostatnia kombinacja materiałów jest szeroko stosowana w obszarach, które korzystają z uzyskanych właściwości tych materiałów, tj. wytrzymałości i lekkości, w szczególności jako materiał konstrukcyjny do produkcji elementów wykończeniowych kamperów i jachtów. Opracowano metodę wizyjną do rozpoznawania i oceny zadziorów i rozwarstwień powstających podczas wiercenia w oparciu o metody segmentacji progowej i przy użyciu rozmytego układu Takagi–Sugeno–Kang (TSK) z klasteryzacją subtraktywną.

W przedstawionych poniżej badaniach obrazy cyfrowe i wybrane miary sygnału siły osiowej, momentu skrawania w dziedzinie czasu zostały przyjęte jako dane wejściowe do modelu rozmytego. Proponowaną metodę zweryfikowano za pomocą pełnych eksperymentów wiercenia w elementach kompozytowych CFRP/na bazie drewna i porównano z pomiarem ręcznym obsługiwanym przez konwencjonalną metodę przetwarzania obrazu. Wyniki porównania wskazują, że istnieje duża zgodność między proponowaną metodą a ręczną metodą pomiaru.

### 7.2.1. Metodyka badań

W badaniach zastosowano sklejkę o grubości 9 mm oraz płytę CFRP o grubości 3 mm. Płyta CFRP została przyklejona jednostronnie do zewnętrznej powierzchni sklejki. Do testów użyto typowe narzędzie skrawające, wiertło dwuostrzowe o średnicy 5 mm z węglika HW firmy Leitz (rys. 7.12).



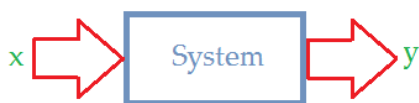
Rys. 7.12. Wskaźnik delaminacji (a), wskaźnik zużycia narzędzia (b), wiertło (c)

W testach wiercenia rejestrowano wartości siły posuwowej  $F_t$  i momentu skrawania  $M_c$  podczas obróbki. Ponadto, dokonywano pomiaru wskaźnika rozwarstwienia laminatu  $F_d$  oraz pomiaru wskaźnika zużycia ostrza  $VB$ . Pomiar obu wskaźników przeprowadzano każdorazowo po serii wykonania trzydziestu otworów. Ponieważ w badaniach zastosowano zmienne parametry skrawania jako wskaźnik zużycia brano pod uwagę starcie ostrza na powierzchni przyłożenia w strefie naroża –  $VB_c$ . Do określania wartości tego wskaźnika użyty został mikroskop optyczny. Niepewność pomiaru można przyjąć równą 0,01. Otwory wiercono w płycie CFRP/sklejka. W badaniach stosowano stałą wartość prędkości obrotowej 3000 obr/min i trzy wartości posuwu narzędzia: 0,10; 0,15 i 0,20 mm/obr. Próby trwałościowe narzędzia oznaczono jako: T1, T2, T3 i T4. Wartość siły posuwowej i momentu skrawania mierzono za pomocą piezoelektrycznego czujnika przemysłowego Kistler 9345B2. Sygnały z czujnika rejestrowano na dysku komputera osobistego (PC) za pomocą 16-bitowej karty analogowo-cyfrowej National Instruments 6034E o częstotliwości próbkowania 50 Hz (rys. 6.5). Powierzchnię wokół każdego otworu rejestrowano za pomocą kamery.

### 7.2.2. Analiza wyników badań

#### Charakterystyka dynamiczna układu

Ważnym etapem w analizie sygnału przyspieszenia w dziedzinie częstotliwości jest określenie charakterystyki częstotliwościowej analizowanego układu. Czyli pod wpływem pobudzenia układu wymuszeniem  $x$  otrzymuje się odpowiedź układu  $y$  na zaistniałe wymuszenie (rys. 7.13).

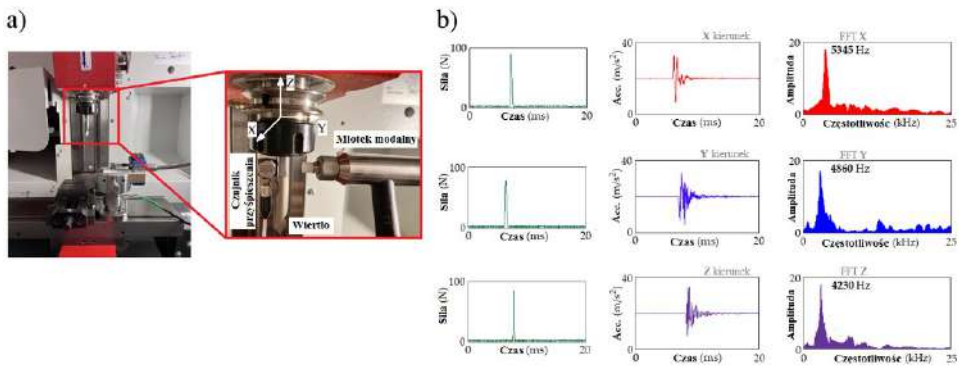


Rys. 7.13. Struktura systemu [226]

Impuls Diraca (zwany deltą Diraca) posłużył do wyznaczenia odpowiedzi impulsowej układu (rys. 7.14). Przybliżono go impulsem prostokątnym o jednostkowym iloczynie czas trwania razy amplituda, lecz może on mieć dowolny kształt, pod warunkiem zachowania jednostkowej wartości całki  $\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t)dt = 1$  przy czasie trwania dążącym do zera.

Transformata Fouriera jest podstawowym narzędziem analizy widmowej, czyli wyszukiwania w sygnale składowych o różnych częstotliwościach. Transformatę Fouriera można interpretować jako korelację analizowanego sygnału  $x(t)$  z zespoloną funkcją  $e^{-j2\pi ft}$ , zawierającą sygnały harmoniczne (cosinus i sinus) o częstotliwości  $f$ :  $e^{-j2\pi ft} = \cos(2\pi ft) - j\sin(2\pi ft)$ .

Przeprowadzono analizę dynamiczną układu obrabiarka-uchwyt-narzędzie skrawające (OUN). W tym celu, pobudzo układ wymuszeniem w postaci impulsu Diraca (młotek modalny). Znając sygnał siły wymuszającej oraz odpowiedź układu w postaci przyspieszenia, dokonano analizy modalnej umożliwiającej wyznaczenie częstotliwości drgań własnych układu (rys. 7.14). Następnie wyznaczono początek pojedynczego uderzenia. Jest on rozpoznany na sygnale siły, jako przekroczenie progu będącego pięciokrotnością maksymalnej wartości z pierwszych 100 próbek sygnału. Następnie wyodrębnionych zostało 750 próbek [226]. Dla zastosowanej częstotliwości próbkowania 50 kHz okno pojedynczego uderzenia wynosiło 15 ms. Dłuższe okno może spowodować nałożenie na siebie następujących po sobie uderzeń, co program rozpoznałby jako uderzenie niepoprawne. Rysunek 7.14 przedstawia przykład przebiegów czasowych oraz ich widm wyodrębnionych z całego sygnału z wykorzystaniem powyższych kryteriów.

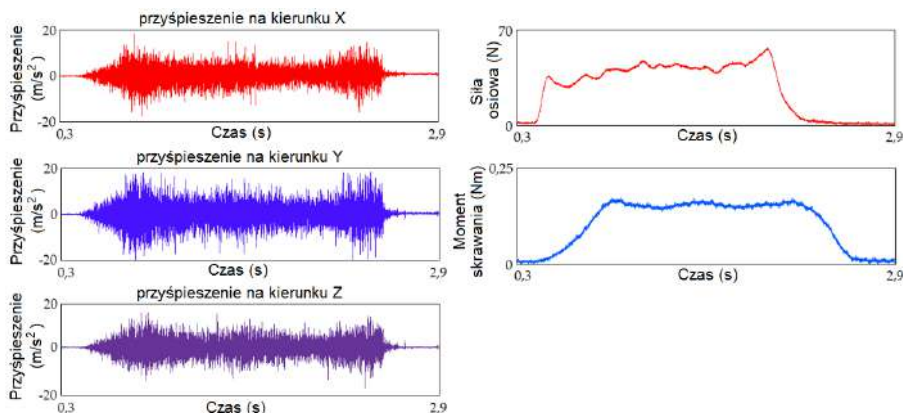


Rys. 7.14. Analiza dynamiczna układu OUN [226]

Sygnał przyspieszeń mierzono zarówno w kierunku poprzecznym (X), (Y) jak i osiowym (Z). Sygnały przyspieszeń na analizowanych kierunkach zawierają informacje wskazujące, że:

- Drgająca długość wiertła na kierunku poprzecznym i osiowym nie zmienia się podczas wiercenia, utrzymując w ten sposób raczej stałą częstotliwość.
- Naturalne częstotliwości na kierunkach poprzecznym i osiowym układu OUN przy wierceniu są w zasadzie niewrażliwe na średnicę wiertła, co upraszcza monitorowanie dla szerokiego zakresu rozmiarów wiertel.
- Na drgania w kierunkach X, Y i Z ma wpływ moment obrotowy i siła osiowa, które są głównymi źródłami wzbudzenia podczas wiercenia.

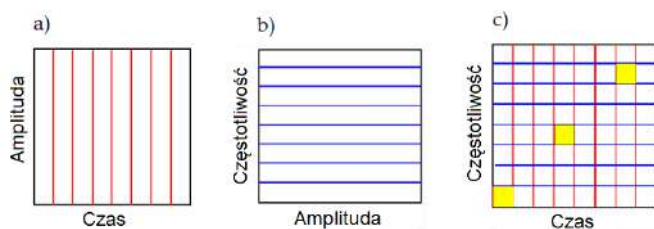
Rysunek 7.15 przedstawia typowe sygnały w dziedzinie czasu odpowiednio w kierunkach X i Y (poprzecznym) i Z (pionowym), w jednym przedziale czasowym, zarejestrowanych dla wybranej próby.



Rys. 7.15. Sygnał przyspieszeń oraz oporów skrawania: prędkość skrawania 94 m/min; prędkość posuwu 700 mm/min [226]

Jak podano w rozdziale 7.2.1 wiercenie przeprowadzono z prędkością wrzeciona  $n = 3000$  obr/min, prędkością posuwu  $v_f = 750$  mm/min, wiertłem o średnicy 10 mm. Jak można zobaczyć, sygnały drgań można scharakteryzować jako składające się z krótkich stanów przejściowych oscylacyjnych o wysokiej, niskiej częstotliwości, występujących losowo w czasie trwania podczas wywiercenia jednego otworu. Wraz ze zmianą gęstości materiału skrawanego, amplituda tych sygnałów zaczyna rosnąć. Wzbudzenie układu OUN w procesie wiercenia z częstotliwością niezależną od warunków cięcia, takich jak posuw i prędkość. Zdecydowanie większość sygnałów wibracyjnych składa się z komponentów częstotliwości związanych z dynamiką układu skrawania.

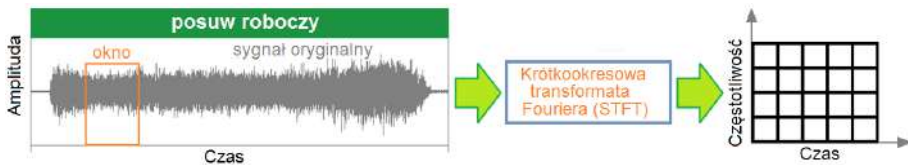
Na rysunku 7.16, zilustrowano ideę trzech znanych metod analizy sygnałów: czasową, częstotliwościową oraz czasowo-częstotliwościową (Short Time Fourier Transform – STFT). Widać na nim wyraźnie, że w metodzie STFT rozdzielczość czasowo-częstotliwościowa jest ustalona na całej płaszczyźnie time/frequency (rys. 7.16c). Podczas analizy sygnału z wykorzystaniem Fast Fourier Transform (FFT) nie ma żadnej informacji o zmianach częstotliwości sygnału badanego w czasie (rys. 7.16b). W pewnych przypadkach taka informacja jest bardzo pomocna.



Rys. 7.16. Porównanie metod analizy: a) czasowa (obserwacja właściwości sygnału w dziedzinie czasu), b) częstotliwościowa (obserwacja właściwości sygnału w dziedzinie częstotliwości), c) STFT (obserwacja właściwości sygnału na płaszczyźnie czas-częstotliwość) [226]

Short Time Fourier Transform pozwala odzyskać informację czasową, która tracona jest w przypadku zastosowania Fast Fourier Transform (FFT). STFT charakteryzuje się stosunkowo krótkim czasem obliczeń. Dzięki doborze odpowiedniego czasu próbkowania oraz długości okna czasowego, możliwa jest optymalizacja metody tak, aby uzyskać największą „czułość” w obszarze częstotliwości, na których skupia się analiza. Główną wadą metody jest stała wielkość okna czasowego. Skutkuje to tym, że jakość informacji czasowej jest odwrotnie proporcjonalna, do jakości informacji częstotliwościowej, a to oznacza, że większa rozdzielczość jednego parametru pogarsza dokładność drugiego.

STFT umożliwia wydobycie z sygnału informacji o tym, jak zmienia się jego widmo w czasie, czyli jednoczesną obserwację jego właściwości zarówno w dziedzinie czasu jak i częstotliwości. Wycinek sygnału (blok próbek o rozmiarze  $L$ ) przeznaczony do analizy zostaje podzielony na segmenty, a każdy segment podlega analizie widmowej niezależnie. Sukcesywne „przesuwanie okna czasowego” umożliwia lokalizację parametrów widmowych sygnału w czasie (rys. 7.17).



Rys. 7.17. Ruchome okno czasowe [226]

Zastosowanie ruchomego okna czasowego pozwala na uzyskanie dodatkowego wymiaru (czasu). Matematycznie STFT można zapisać jako (7.12):

$$\text{STFT} \{x(t)\} = X(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \omega(t - \tau) e^{-j\omega\tau} dt \quad (7.12)$$

gdzie:  $x(t)$  – analizowany sygnał,  $\omega(t)$  – opisuje funkcję okna czasowego.

Przesuwając okno w czasie, wzdłuż sygnału, wyznacza się jego zawartość widmową wewnątrz przedziału czasowego, którego długość jest określona szerokością okna. Kształt okna czasowego odgrywa kluczową rolę w przypadku STFT. Iloczyn szerokości okna w dziedzinie czasu i szerokości okna w dziedzinie częstotliwości jest wielkością stałą dla danego okna. Stąd też, poprawiając rozdzielczość w dziedzinie czasu, będziemy ją pogarszać w dziedzinie częstotliwości i odwrotnie. Zatem szerokość okna wybierana jest na drodze kompromisu. STFT dostarcza informacji czy i kiedy dana składowa częstotliwościowa znajduje się w sygnale i jak jest osadzona w czasie. Informacja ta ma jednak ograniczoną precyzję uzależnioną od rozmiaru okna czasowego w którym dokonywana jest analiza. Kwadrat amplitudy STFT pozwala na uzyskanie funkcji spektrogramu (7.13):

$$\text{spectrogram} \{x(t)\} = |X(\tau, \omega)|^2 \quad (7.13)$$

Do analizy zarejestrowanych sygnałów przyśpieszenia przygotowano własny program komputerowy (w środowisku LabVIEW) umożliwiający w wybranych odcinkach czasu wyznaczenie wybranych wartości rejestrowanych sygnałów. Działanie programu polegało na automatycznym wyznaczaniu wartości rejestrowanych sygnałów w ściśle określonych odcinkach czasowych.

Oczywiste jest, że przeważnie zarejestrowane sygnały przyśpieszeń nie wykazują jednoznacznie charakterystycznych cech związanych z przejściem od wiercenia w płycie MDF do wiercenia płyty HPL, jeśli obserwuje się je tylko w dziedzinie czasu. Jednakże, po analizie sygnałów przyśpieszeń w dziedzinie częstotliwości, można zaobserwować charakterystyczny zakres częstotliwości gdzie podwyższona wartość amplitudy sygnału jest cechą dominującą w zależności od materiału obrabianego. Aby uzyskać takie zakresy częstotliwości, charakterystyczne dla rodzaju obrabianego materiału, stosuje się krótkie odcinki czasowe za pomocą funkcji okna i określa się widma sygnału.

Okienkowanie polega na wykonaniu operacji splotu sygnału wejściowego oraz funkcji okna w osi czasu. Wynikiem powyższej operacji jest zmiana amplitudy sygnału w funkcji okna. W tym przypadku zastosowano okno czasowe Hamminga. Okno czasowe jest funkcją opisującą sposób pozyskiwania próbek z analizowanego sygnału. Przy założeniu, iż dany jest pewien sygnał  $s(n)$ , w skończonym przedziale czasu, wówczas wynikiem obserwacji takiego impulsu w oknie będzie funkcja  $g(n)$  opisana wzorem (7.14):

$$g(n) = s(n)w(n), \quad n \in (-\infty; +\infty) \quad (7.14)$$

gdzie:  $w(n)$  – wspomniana funkcja okna.

Szczególny przykład okna czasowego stanowi zaproponowane przez R.W. Hamminga okno Hamminga. Zostało ono opracowane aby minimalizować wartość maksymalną najbliższego płątka bocznego i charakteryzowane jest wzorem (7.15):

$$w(n) = \alpha - \beta \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (7.15)$$

gdzie:  $\alpha = 0,54$ ,  $\beta = 1-\alpha = 0,46$ ,  $N$  – liczba próbek sygnału.

Uzyskanie spektrogramu umożliwiającego efektywną identyfikację sygnału wiąże się z odpowiednim doбором takich parametrów jak: szerokość okna, funkcja okna czy rozdzielczość w dziedzinie czasu. Najwyższa rozdzielczość w dziedzinie czasu może być uzyskana przy zastosowaniu nakładkowania wynoszącego  $N-1$  próbek, jednak jak łatwo zauważyć przesuwanie okna w każdym kroku tylko o jedną próbkę wiąże się ze znaczącym wzrostem obliczeń. Dlatego też w przeprowadzonych badaniach wykorzystano nakładkowanie wynoszące 50% długości okna. Właściwy dobór długości okna jest zagadnieniem nieco bardziej złożonym.

Najwyższa efektywność osiągnięta jest w sytuacji gdy stosunek średniokwadratowej długości częstotliwościowej (A) do czasowej (B) był równy stosunkowi przyrostu częstotliwości do czasu, w którym dany przyrost miał miejsce (7.16):

$$\frac{A}{B} = \frac{\Delta f}{\Delta t} \quad (7.16)$$

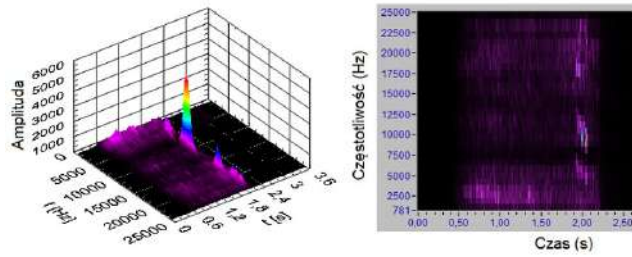
Problem doboru rodzaju funkcji okna jak i jej parametrów powinien stanowić swoisty kompromis pomiędzy jakością sygnału uzyskiwaną na wyjściu, a czasem niezbędnym do wykonania obliczeń. Należy również zauważyć, że sam dobór funkcji okna jest pewnym kompromisem pomiędzy szerokością listka głównego, poziomem pierwszego listka bocznego oraz szybkością zmian poziomów listków bocznych wraz ze wzrostem częstotliwości. A zatem jest to kompromis pomiędzy dokładnością wartości amplitudy oraz częstotliwością.

Rysunki 7.18 i 7.19 pokazują przykłady widm mocy sygnałów drgań generowanych w kierunku X i Y podczas wiercenia w różnych rodzajach materiałów obrabianych. Parametry skrawania to  $n = 3000$  obr/min,  $v_f = 750$  mm/min. Jak pokazano na rysunkach, maksymalna amplituda sygnału drgań w zakresie częstotliwości zmienia swoją wartość w przedziale od 2-22 kHz w zależności od rodzaju materiału obrabianego. Można zauważyć, że wierząc w sklejce (rys. 7.18a i 7.19a), widmo mocy ma charakterystyczne wzrosty amplitudy przy częstotliwościach około 10 kHz na kierunku X i 11 kHz oraz 12,5 kHz na kierunku Y. Wierząc w HPL (rys. 7.18b i 7.19b), widmo mocy ma charakterystyczne wzrosty amplitudy przy częstotliwościach około 19 kHz na kierunku X i 19 kHz na kierunku Y. Wierząc w materiale MDF (rys. 7.18c i 7.19c), widmo mocy ma charakterystyczne wzrosty amplitudy przy częstotliwościach około 10 kHz na kierunku X i 7,5 kHz na kierunku Y. Wierząc w płycie wiórowej (rys. 7.18d i rys. 7.19d), widmo mocy ma charakterystyczne wzrosty amplitudy przy częstotliwościach około 2,5 kHz na kierunku X i 2 kHz na kierunku Y.

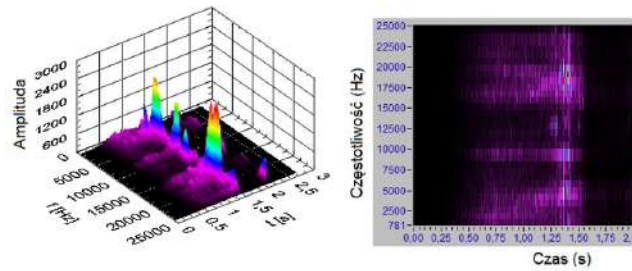
Porównując ze sobą otrzymane wartości amplitudy dominującej częstotliwości, w zależności od materiału obrabianego, można stwierdzić, że istnieje istotny wpływ materiału obrabianego na zakres dominującej częstotliwości występującej w sygnale. Można zaobserwować także, że istnieje korelacja pomiędzy twardością materiału obrabianego a przedziałem dominującej częstotliwości w sygnale drgań. Przykładowo, dla materiału HPL wartość dominującej częstotliwości to około 19 kHz (materiał o największej twardości), a dla płyty wiórowej to około 2,5 kHz (materiał o najmniejszej twardości).

Na rysunku 7.14 pokazano główne naturalne częstotliwości układu obrabianego przedmiotu i narzędzia uzyskane podczas analizy dynamicznej układu. Oczywiście jest, że składowe wysokiej częstotliwości zaobserwowane w sygnałach drgań odpowiadają jednej lub więcej częstotliwościom naturalnym wrzeczona obrabiarki oraz częstotliwościom systemu mocowania przedmiotu obrabianego. W powyższej analizie nie rozważano wpływu zużycia ostrza narzędzia skrawającego na sygnaturę sygnału drgań.

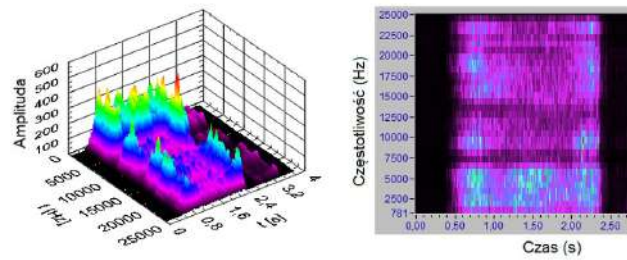
a) Sklejka



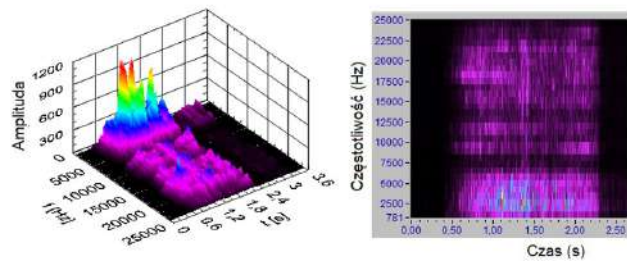
b) HPL



c) MDF

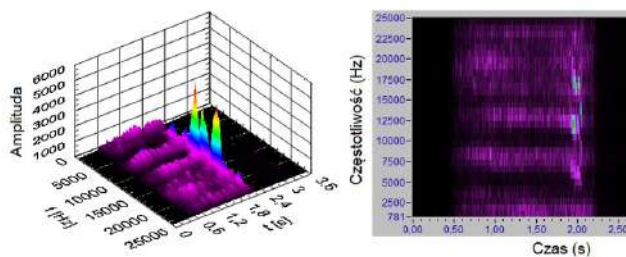


d) Płyta wiórowa

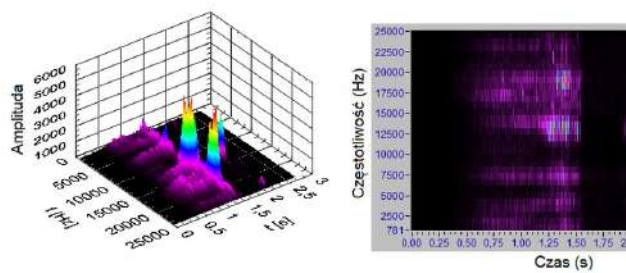


Rys. 7.18. Spectrogram sygnału drgań na kierunku X [226]

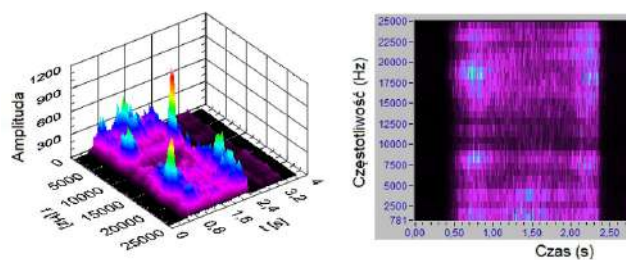
a) Sklejka



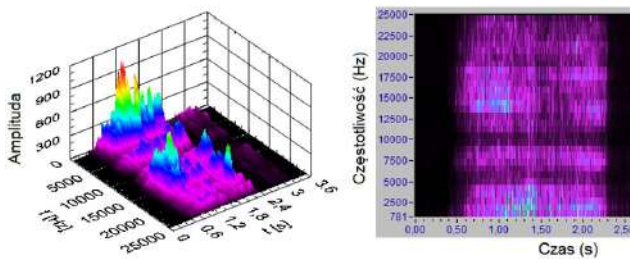
b) HPL



c) MDF



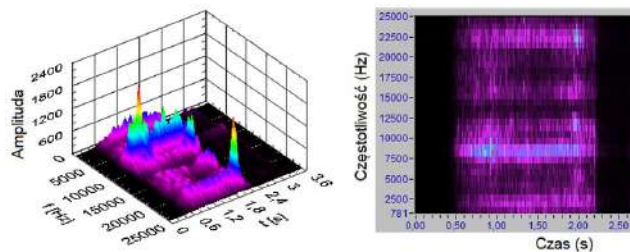
d) Płyta wiórowa



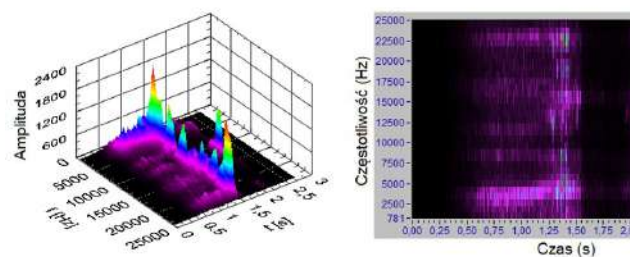
Rys. 7.19. Spectrogram sygnału drgań na kierunku Y [226]

Rysunek 7.20 przedstawia widma mocy sygnału drgań w kierunku Z uzyskane dla różnych materiałów obrabianych w procesie wiercenia.

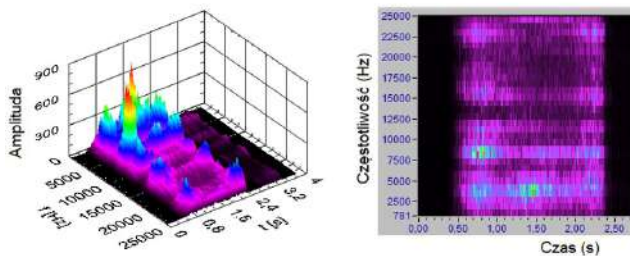
a) Sklejka



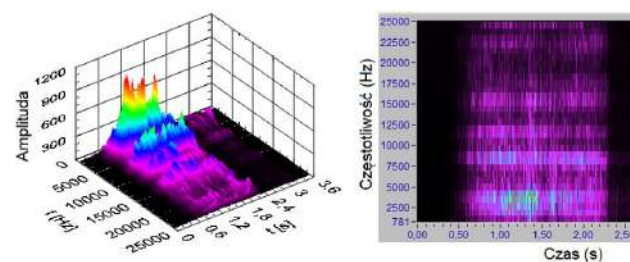
b) HPL



c) MDF



d) Płyta wiórowa



Rys. 7.20. Spectrogram sygnału drgań na kierunku Z [226]

Warunki skrawania były takie same jak warunki stosowane w testach w kierunku X i Y. Wyświetlane trendy są wyraźnie podobne do obserwowanych w kierunku X i Y. Jednak widma drgań wynikające z rodzaju materiału obrabianego w kierunku Z różnią się od widm uzyskanych w kierunku X i Y. Jak pokazano na rys. 7.20, różne obszary o zakresach częstotliwości były wzbudzone podczas wiercenia. Widoczne są dwa charakterystyczne piki amplitudy w analizowanych sygnałach. Wierząc w skleję (rys. 7.20a), widmo mocy sygnału ma charakterystyczne wzrosty amplitudy przy częstotliwościach około 8 kHz i 22 kHz na kierunku Z. Wierząc w HPL (rys. 7.20b), widmo mocy ma charakterystyczne wzrosty amplitudy przy częstotliwościach około 4 kHz i 22 kHz na kierunku Z. Wierząc w materiale MDF (rys. 7.20c), widmo mocy ma charakterystyczne wzrosty amplitudy przy częstotliwościach około 3 kHz i 8 kHz na kierunku Z. Wierząc w płycie wiórowej (rys. 7.20d), widmo mocy ma charakterystyczne wzrosty amplitudy przy częstotliwościach około 2.5 kHz na kierunku Z.

Porównując ze sobą otrzymane wartości amplitudy dominującej częstotliwości, w zależności od materiału obrabianego, można stwierdzić istotny wpływ materiału obrabianego na zakres dominującej częstotliwości występującej w sygnale. Nie jest on tak wyraźny jak w przypadku widm sygnału na kierunkach X i Y. Jednak, nie można już zaobserwować, istotnej korelacji pomiędzy twardością materiału obrabianego a przedziałem dominującej częstotliwości w sygnale drgań.

Zasadniczo na sygnał widm drgań mierzone w kierunku X, Y i Z ma wpływ rodzaj materiału obrabianego. Wyniki pokazują wyraźnie, że widma drgań można wykorzystać do identyfikacji materiału obrabianego. Różne rodzaje informacji mogą być wydobywane z analizy sygnałów wibracyjnych zarówno w dziedzinie czasu, jak i częstotliwości. Wyniki te pokazują, że istnieją specyficzne różnice związane z mechanizmem usuwania materiału pomiędzy procesami wiercenia różnych materiałów, wykrywalne przez sygnały przyspieszeń. Oznacza to, że ocena sygnału w dziedzinie częstotliwości umożliwi wyraźną identyfikację materiału w produkcji przemysłowej tworzyw drzewnych.

Miara złożoności szeregu czasowego układu dynamicznego jest interesującym zagadnieniem w nauce i inżynierii, ponieważ złożoność jest powiązana ze skomplikowanymi wewnętrznymi wzorcami ukrytymi w dynamice układu. Jeśli w systemie nie ma rozpoznawalnej struktury, uważa się go za stochastyczny. Entropia permutacji PermEn odnosi się do struktury porządku lokalnego szeregu czasowego, która daje ilościowe miary złożoności.

Szczegóły matematyczne metody entropii permutacji można znaleźć w [14, 324]. Koncepcja entropii permutacji została wprowadzona przez Bandta [324] celem uporządkowania kolejnych wartości szeregu czasowego, przy zaniechaniu skali różnic występujących pomiędzy nimi. Również w artykułach Kellera [325] podejście analizy permutacyjnej zostało szeroko zastosowane. Entropia permutacji szeregu czasowego jest entropią Shannona rozkładu wzorców porządkowych w szeregu czasowym [326]. Takie wzorce porządkowe, opisujące typy porządkowe wektorów, są kodowane przez permutacje. Oznaczmy zbiór permutacji

$\{1, \dots, d\}$  dla  $d$  należącego do liczb naturalnych przez  $\pi d$ . Mówi się, że wektor  $X$  zdefiniowany przez elementy  $x(1), x(2), \dots, x(d)$  ma wzór porządkowy  $\pi = (\pi_1, \dots, \pi_d) \in \pi d$ , który porządkuje te elementy (7.17):

$$x(\pi_1) < x(\pi_2) < \dots < x(\pi_d) \quad (7.17)$$

Jeśli  $x(i) = x(j)$ , ustalono, że  $x(i) < x(j)$ , gdy  $i < j$ . Elementy zbioru  $\pi d$  dzielimy na nachodzące na siebie wektory o długości  $d$  według schematu (7.18):

$$(x(1), \dots, x(d)), ((x(2), \dots, x(d+1)), \dots, ((x(N-d+1), \dots, x(N))) \quad (7.18)$$

Każdemu wektorowi jest przyporządkowany wzorzec zgodnie z równaniem (7.17), dzięki temu uzyskujemy rozkład wzorców porządkowych. Liczba możliwych wzorców długości  $d$  wynosi  $d!$ .

Głównym zastosowaniem rozkładu wzorców jest obliczanie entropii jako miary nieuporządkowania systemu, czyli entropii permutacji. Rozkład jest wyznaczany empirycznie, poprzez liczenie prawdopodobieństwa wystąpienia każdego wzorca w całym ciągu  $N$  danych według wzoru (7.19):

$$p(\pi) = \frac{|\{n: 0 \leq n \leq N-d+1, (x(n), x(n+1), \dots, x(n+d-1)) \text{ is type } \pi\}|}{N-d+1} \quad (7.19)$$

Wzór na entropię permutacji (7.20) jest oparty na wzorze na entropię Shannona, tylko zamiast rozkładu prawdopodobieństwa zdarzeń używa się rozkładu prawdopodobieństwa wzorców:

$$\text{PermEn} = - \sum_{i=1}^{d!} p(\pi_i) * \ln p(\pi_i) \quad (7.20)$$

Znormalizowana entropia permutacji ( $H_p$ ) wynosi zatem (7.21):

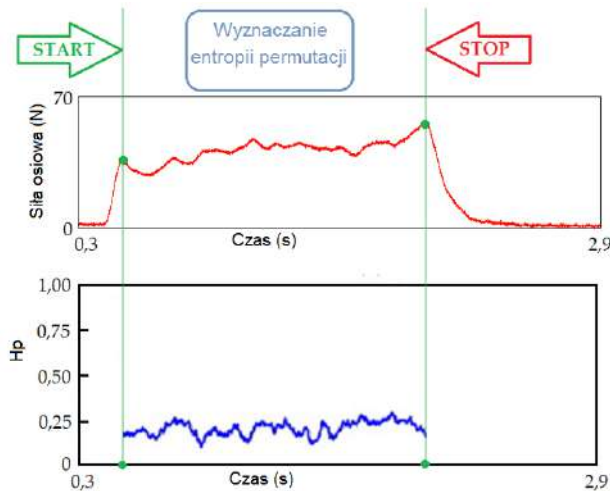
$$H_p = \frac{H_p(d)}{\ln(d!)} \quad (7.21)$$

Największa możliwa wartość  $H_p$  wynosi jeden, co oznacza, że wszystkie permutacje mają równe prawdopodobieństwo. Najmniejsza możliwa wartość  $H_p$  wynosi zero, co oznacza, że szereg czasowy jest bardzo regularny. Krótko mówiąc, im mniejsza wartość  $H_p$ , tym bardziej regularny jest szereg czasowy. Wybór  $n$  i  $d$  zależy od szeregu czasowego. Równanie (7.21) wskazuje, że otrzymany rozkład prawdopodobieństwa ma parametr  $d$  – wymiar. Odgrywa on ważną rolę w ocenie odpowiedniego rozkładu prawdopodobieństwa, ponieważ  $d$  określa liczbę stanów dostępnych daną przez  $d!$  Ponadto, aby uzyskać wiarygodne statystyki i właściwe rozróżnienie między dynamiką stochastyczną a deterministyczną,

konieczne jest, aby  $N \gg d!$  [327]. Ze względów praktycznych autorzy [324] sugerowali wybór parametru  $d$  z przedziału  $3 \leq d \leq 7d$ . Entropia permutacji może być stosowana do odróżniania chaosu od szumu w identyfikacji skali czasowej [328].

PermEn dla sygnałów sił  $F_t$  dla obrabianych materiałów została obliczona w oknie o długości 1000 elementów przesuwanym o krok 200. Zmiana częstotliwości sygnału wpływa na otrzymane wartości entropii permutacji, wzrasta ona liniowo wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału. PermEn jest bardzo wrażliwa na dodawanie szumu o różnej mocy.

Aby wyeliminować skutki nieoczekiwanego szumu w sygnale, stosuje się filtry do przetwarzania wartości cech sygnału, przed zastosowaniem go, w celu wykrycia zmiany materiału obrabianego w procesie wiercenia.



Rys. 7.21. Sygnał siły osiowej i jej entropia permutacji  $H_p$  [226]

Na rysunku 7.21 przedstawiono sygnał siły osiowej i jego entropię permutacji  $H_p$ . Wartości entropii permutacji  $H_p$  są na niskim poziomie dla materiałów charakteryzujących się budową jednorodną w normalnych warunkach skrawania, ponieważ sygnał siły jest podobny do zwykłego sygnału okresowego. Jednakże sygnały siły  $F_t$  mają zróżnicowany charakter przebiegu ze względu na różne efekty m. in. zróżnicowaną gęstością materiału, twardość, współczynniki tarcia w różnych położeniach. Wartość  $H_p$  zmieniała się, w stosunkowo niewielkich granicach w procesach wiercenia badanych materiałów obrabianych.

W tabeli 7.6 przedstawiono zmianę wartości  $H_p$  dla obrabianych materiałów. Wyniki pokazują, że entropia permutacji sygnałów siły  $F_t$  może mieć zastosowanie i wskazywać na zmianę materiału w procesie wiercenia.

Tabela 7.6. Znormalizowana entropia permutacji  $H_p$ 

Material obrabiany	$H_p$
MDF	0,32
Płyta wiórowa	0,53
Sklejka	0,48
HPL	0,21

### 7.3. Optymalizacja struktury sieci neuronowej do oceny zużycia ostrza w procesie wiercenia CFRP

#### 7.3.1. Wiadomości ogólne

W dostępnych na rynku systemach nadzoru stanu narzędzia skrawającego dominuje najprostsza strategia jednoczynnikowa [226]. Publikacje prezentowane na całym świecie zgodnie stwierdzają, że takie podejście nie wystarcza do poprawnej oceny zużycia narzędzia i że jedynie zastosowanie wielu czujników może dać zadowalające rezultaty [329, 330, 331]. Sztuczna inteligencja, czy systemy ekspertowe, które wykorzystują zarówno informacje z wielu czujników, jak i parametry skrawania wciąż pozostają w sferze badań laboratoryjnych [330, 332]. W wiodących ośrodkach badawczych podejmuje się jednak wiele wysiłku, w celu stworzenia efektywnego, inteligentnego układu nadzorującego. Obecnie do diagnozowania zużycia ostrza na podstawie sygnałów z wielu czujników wykorzystuje się najczęściej sieci neuronowe [333, 334], Neuro-Fuzzy [335, 336] i logiki rozmytej [337, 338]. Szeroki przegląd takich rozwiązań można znaleźć w [339, 340]. Najpopularniejszą siecią jest perceptron wielowarstwowy [159, 340].

Od kilku lat prowadzone są badania nad zastosowaniem sieci neuronowych (SN) do automatycznej oceny zużycia ostrzy narzędzi skrawających. Z sygnałów sił skrawania i emisji akustycznej rejestrowanych podczas prób skrawania wyznaczane są miary statystyczne – wartość średnia i odchylenie standardowe. Miary te wraz z parametrami skrawania służą jako dane do uczenia SN. Na podstawie tych danych, wyznaczanych na bieżąco podczas obróbki, nauczona wcześniej sieć neuronowa może przewidzieć wartość zużycia z niewielkim błędem.

Wykonano cztery próby trwałościowe. Zastosowano sieć neuronową: perceptronową typu FFBP. Celem tych badań było znalezienie minimalnej struktury sieci i sposobu jej treningu przy zachowaniu dobrej jakości odpowiedzi, czyli niskiego poziomu błędów.

### 7.3.2. Analiza wyników badań

Mając do dyspozycji dane z czterech prób trwałościowych narzędzia, zgodnie z metodyką przedstawioną w rozdziale 7.2.1 przystąpiono do eksperymentów z sieciami neuronowymi. Najwięcej uwagi poświęcono sieci typu FFBP i jej możliwościom pod kątem jakości predykcji zużycia wiertła. Minimalizacja struktury obejmowała głównie rozmiar wektora wejściowego, liczbę miar i parametrów wykorzystywanych przez sieć, ponieważ ilość informacji wchodzących do sieci wymaganych do poprawnej oceny zużycia wpływa na koszt układu diagnostycznego. Do symulacji sieci neuronowej FFBP użyto oprogramowania stworzonego i modyfikowanego we własnym zakresie. Umożliwia ono między innymi:

- a) obserwację RMS błędu i błędu maksymalnego dla pliku uczącego (eu i mu) i testującego (et i mt) jednocześnie;
- b) zmianę współczynników uczenia sieci:  $\eta_1$  – wsp. szybkości uczenia i  $\eta_2$  – momentum;
- c) automatyczne lub ręczne zakłócanie struktury sieci poprzez dodawanie bądź losowych wartości z określanego przez użytkownika przedziału, bądź wybranych stałych liczb, do każdej z wag połączeń między warstwami neuronowymi; zakłócanie automatyczne wyzwalane jest po upływie dowolnie ustalonej liczby iteracji od chwili, gdy błąd RMS uczenia przestaje maleć;
- d) automatyczny pruning (redukcję) neuronów ukrytych, gdy błąd RMS odpowiedzi całej sieci spadnie poniżej założonej wartości, a zmienność wyjścia rozpatrywanego neuronu będzie niższa od narzuconej przez użytkownika granicy;
- e) ręczny pruning wejść na podstawie informacji o przewidywanych błędach po usunięciu dowolnego wejścia i dla kompletnej sieci.

W literaturze coraz częściej można spotkać pogląd, że sieć trzywarstwowa (z jedną warstwą ukrytą) może spełnić te same zadania, co sieć czterowarstwowa. Postanowiono zweryfikować ten pogląd w zastosowaniu do uzyskanych danych pomiarowych. Na wstępie przyjęto następujące struktury sieci:

- a) sieć czterowarstwowa: 4 – 10 – 5 – 1;
- b) sieć trzywarstwowa: 4 – 10 – 1;

W celu zastosowania sieci neuronowej do wyników tych badań sporządzone zostały dwa pliki zawierające dane, odpowiadające próbom T1 do T4. Przypomnijmy, że każda z tych prób przeprowadzona była niezależnie z tymi samymi parametrami skrawania. Pliki z danymi zawierają wyniki pomiarów miar siły osiowej i momentu skrawania, które okazały się najlepiej skorelowane ze zużyciem ostrza ( $F_{T\text{ RMS},\text{śr}}$ ,  $M_{c\text{ RMS},\text{śr}}$ ), zakodowane wartości posuwu i wskaźnik delaminacji jako wejścia do sieci oraz wartości wskaźnika zużycia  $VB_{\text{max}}$  pełniące rolę wyjścia z sieci. Postanowiono do uczenia sieci wykorzystać próbę T4, w której uzyskano większe wartości wskaźnika zużycia  $VB_{\text{max}}$ , zaś testowanie sieci prowadzić w oparciu o dane z próby od T1 do T4. Badana sieć miała zatem sześć wejść i jedno wyjście o charakterze ciągłym. Arbitralnie przyjęto szesnaście komórek w war-

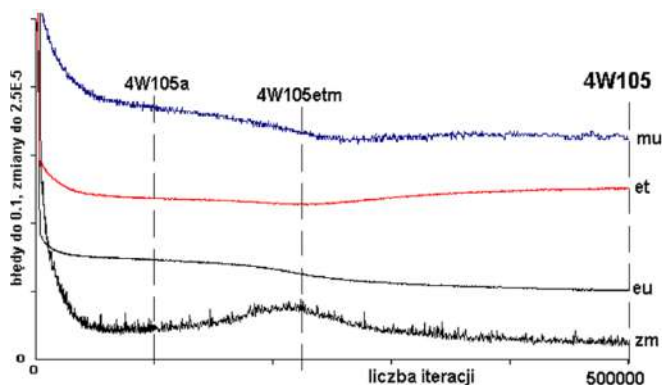
stwie ukrytej zakładając, że ich liczba będzie mogła zostać zmniejszona po wytre-nowaniu sieci (pruning komórek). Ocena stanu nauczonej sieci prowadzona była na podstawie następujących wskaźników:

- błędu średniego ( $\text{ErrCum}$  – średni kwadrat błędu łącznego) uczenia  $e_u$ ) i testowa-nia  $e_t$ ,
- błędu maksymalnego ( $\text{max\_err}$ ) uczenia  $m_u$  i testowania  $m_t$ ,
- iloczynu błędów będącego stosunkiem liczby błędnych odpowiedzi do liczby wszystkich wektorów; za błędną uznawano odpowiedź sieci różniącą się o ponad 20% od wartości zadanej.

Wartości wag są inicjalizowane losowo w zakresie  $\pm 1$ . Stąd i przebieg ucze-nia sieci musi być w jakiejś mierze losowy. W celu oszacowania tej losowości przebadano wpływ liczby inicjującej losowanie (seed) na przebieg i wyniki ucze-nia sieci. We wszystkich eksperymentach obserwowano jednocześnie błędy ucze-nia i testowania sieci. Do analizy przyjęto  $\eta_1 = 0,9$  oraz  $\eta_2 = 0,9$ .

Na rysunku 7.22 przedstawiono przebieg naturalnego, tzn. bez żadnych za-kłóceń, uczenia sieci 4-warstwowej. Są tu błędy uczenia  $e_u$  i błędy testowania sieci na próbie T1  $e_t$ , maksymalne błędy uczenia  $m_u$  oraz średnie zmiany wag sieci. Ta ostatnia wielkość informuje o szybkości zmian, jakim podlega sieć. Sieć uczyła się (obniżała błędy uczenia) bardzo szybko na początku, po czym szybkość ta wyraź-nie spadła. To naturalne zjawisko. Po 100000 iteracji błędy  $e_u$  i  $e_t$  się ustabilizo-wały, stąd zapamiętano stan sieci jako 4W105a.

Później nastąpiła intensyfikacja zmian sieci, osiągająca swoje maksimum po nieco ponad 200000 iteracji. Zaraz potem (po 220500 iteracjach) sieć osiągnęła minimum błędów testowania. Ten stan sieci został automatycznie wykryty przez program i zarejestrowany jako 4W105etm. Dalsze uczenie sieci prowadziło do na-turalnego spadku błędów uczenia lecz także do wzrostu błędów testowania. Po prawej stronie rysunku zestawiono wyniki uzyskanych sieci dla wszystkich czte-rech prób. Wyniki dla prób T1 i T2 są widoczne na rysunku, tab. 7.7 je jedynie precyzuje i dodaje maksymalne błędy testowania. Wiersz odpowiadający próbie T2 odnosi się oczywiście do błędów uczenia, a nie testowania.



Rys. 7.22. Przebieg naturalnego uczenia sieci 4-warstwowej i wyniki uzyskanych sieci [331]

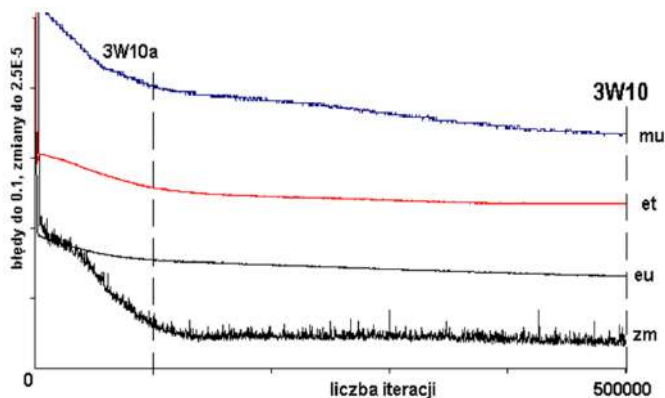
Tabela 7.7. Wyniki sieci 4-warstwowej

Test	4W105a		4W105etm		4W105	
	RMS	max	RMS	max	RMS	max
T1	0,047	0,125	0,045	0,120	0,050	0,123
T2	0,029	0,075	0,025	0,067	0,020	0,065
T3	0,064	0,129	0,067	0,137	0,070	0,150
T4	0,043	0,134	0,044	0,141	0,044	0,129
Wartość średnia	<b>0,046</b>	<b>0,116</b>	<b>0,045</b>	<b>0,116</b>	<b>0,046</b>	<b>0,117</b>

Analiza błędów uzyskanych w próbach T3 oraz T4 przynosi istotne wyniki – najlepsza okazała się tu sieć pierwsza, uzyskana po zaledwie 100000 iteracjach. Dalsze uczenie sieci prowadziło zawsze do poprawienia wyników dla próby T2, minimum błędów dla próby T1 po 220500 iteracjach i systematycznego pogarszania wyniku dla prób T3 i T4.

W sumie wyniki wszystkich trzech sieci dla wszystkich czterech prób (wartości średnie w ostatnim wierszu tab. 7.7) są niemal identyczne. Oznacza to bardzo ważny dla praktyki wniosek, nie należy zbyt wagi przywiązywać do błędów testowania w czasie uczenia sieci, wyniki uzyskane dla innych danych, mogą nie być zbieżne z uzyskanymi dla zbioru wykorzystanego do takiego testowania. Testowanie stanowić może jedynie przybliżoną wskazówkę o ewentualnym przetrenowaniu sieci, czyli zbyt dużym dopasowaniu do zbioru uczącego, co skutkuje brakiem zdolności do uogólnienia i pogorszeniem wyniku dla innych danych niż uczące.

W dalszej kolejności zajęto się analogicznym uczeniem sieci trzywarstwowej. Przebieg tego uczenia i uzyskane wyniki zestawiono na rys. 7.23. Podobnie jak poprzednio zarejestrowano stan sieci po 100000 iteracji (sieć 3W10a). Tym razem nie wystąpiło minimum błędów testowania, a sieć do końca poprawiała błędy uczenia i testowania. Warto także zauważyć, iż mimo znacznie prostszej struktury, sieć trzywarstwowa uzyskała stabilizację szybkości zmian wag po większej liczbie iteracji niż sieć czterowarstwowa. Po 100000 iteracji średnie wyniki uzyskane przez sieć 3- i 4-warstwową były prawie identyczne. Później jednak sieć trzywarstwowa poprawiła swój wynik i to nie tylko dla zbioru uczącego (co oczywiste) lecz także dla wszystkich innych zbiorów. Przemawia to na korzyść sieci 3-warstwowej, a przynajmniej nie podważa wspomnianego na wstępie poglądu o równoważności tych struktur (tab. 7.8).



Rys. 7.23. Przebieg naturalnego uczenia sieci 3-warstwowej i wyniki oceny uzyskanych sieci [331]

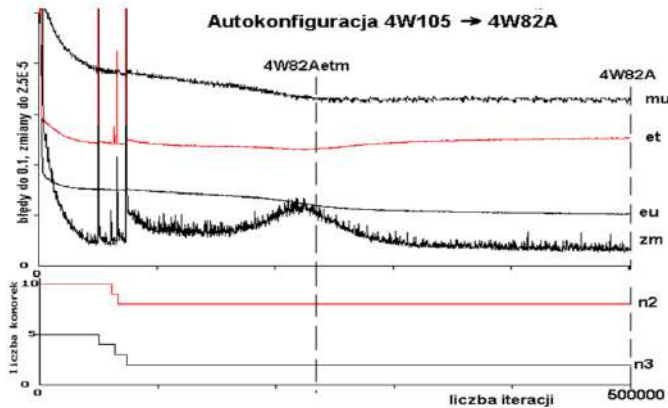
Tabela 7.8. Wyniki sieci 3-warstwowej

Test	3W10a		3W10	
	RMS	max	RMS	max
T1	0,052	0,123	0,047	0,121
T2	0,031	0,081	0,026	0,067
T3	0,063	0,131	0,062	0,132
T4	0,043	0,130	0,041	0,120
Wartość średnia	<b>0,047</b>	<b>0,116</b>	<b>0,044</b>	<b>0,112</b>

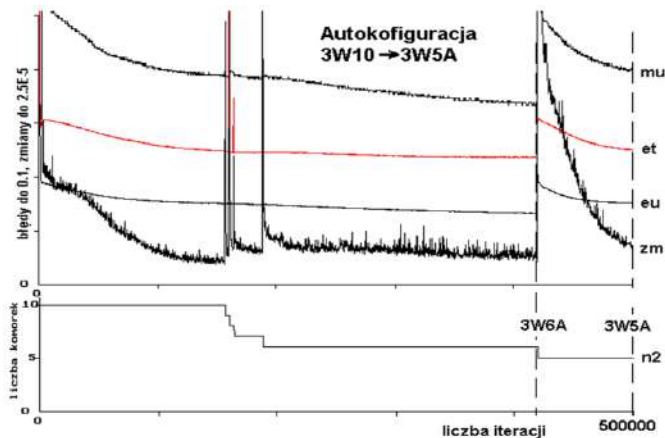
Oczywiście obok liczby warstw, duże znaczenie może mieć liczba komórek w poszczególnych warstwach. Stąd też przed ostateczną decyzją co do przyjęcia sieci 4- lub 3-warstwowej, podjęto próbę zmniejszenia liczby komórek.

Doboru właściwej liczby neuronów postanowiono dokonać w oparciu o opracowany we własnym zakresie algorytm automatycznego doboru struktury sieci wykorzystującego pruning komórek. Polega on na tym, że po osiągnięciu przez błąd uczenia zadanej wartości eupr świadczącej o dobrym wytrenowaniu sieci, następuje analiza zmienności na wyjściach wszystkich komórek. Wybierana jest ta, której zmienność jest najmniejsza i o ile jest ona niższa od założonego tzw. parametru pruningu pr, komórka ta jest usuwana. Średnią wartość jej wyjścia rozkłada się równomiernie na wartości progowe bias pozostałych komórek w warstwie. Stan sieci przed usunięciem komórki jest zapamiętywany. Minimalna liczba iteracji pomiędzy kolejnymi próbami usunięcia zbędnej komórki itr jest deklarowana przez użytkownika.

Na podstawie przedstawionych wyżej przebiegów naturalnego uczenia sieci, przyjęto minimalny błąd uczenia, zezwalający na pruning komórek, na poziomie  $eupr = 0,3$ . Ponadto przyjęto arbitralnie  $pr = 0,2$  oraz  $itpr = 2500$ . Na rysunku 7.24 przedstawiono przebieg uczenia sieci 4-10-5-1 z automatycznym pruningiem komórek (autokonfiguracja sieci), zaś na rys. 7.25 przebieg autokonfigurowania sieci 3-warstwowej. Już na pierwszy rzut oka uderzające jest podobieństwo zmienności zarówno błędów sieci jak i zmienności wag w trakcie autokonfiguracji w stosunku do naturalnego uczenia (porównując rys. 7.22 i 7.24 oraz 7.23 i 7.25)



Rys. 7.24. Przebieg autokonfiguracji sieci 4-warstwowej [331]



Rys. 7.25. Przebieg autokonfiguracji sieci 3-warstwowej [341]

Jak widać usuwanie kolejnych komórek powodowało jedynie „chwilowe” zakłócenie przebiegu uczenia, a po niewielkiej liczbie iteracji, sieć wracała do stanu sprzed pruningu. Usuwanie kolejnych komórek odbywało się szybko jedno po drugim, gdy tylko sieci osiągnęły założony poziom błędów uczenia. Świadczy to o właściwym doborze parametrów autokonfiguracji. Sieć czterowarstwowa dała

się zredukować do 4-8-2-1, czyli wyeliminowano 5 komórek. W czasie dalszego uczenia, zmienność wyjść pozostałych komórek nie spadała poniżej założonego progu  $pr = 0,2$ .

Inaczej rzecz się miała w przypadku sieci trzywarstwowej. Tu po stosunkowo szybkim usunięciu 4 komórek, długo nie następowały żadne zmiany. Dopiero po 405 250 iteracjach usunięta została piąta komórka, co pociągnęło za sobą wyraźne pogorszenie jakości sieci (podwyższenie błędów), które spadały w trakcie dalszego uczenia wolno, nie osiągając poprzedniego poziomu nawet po blisko 100000 iteracji.

Tabela 7.9. Wyniki ilościowe procesu autokonfiguracji sieci 4-warstwowej

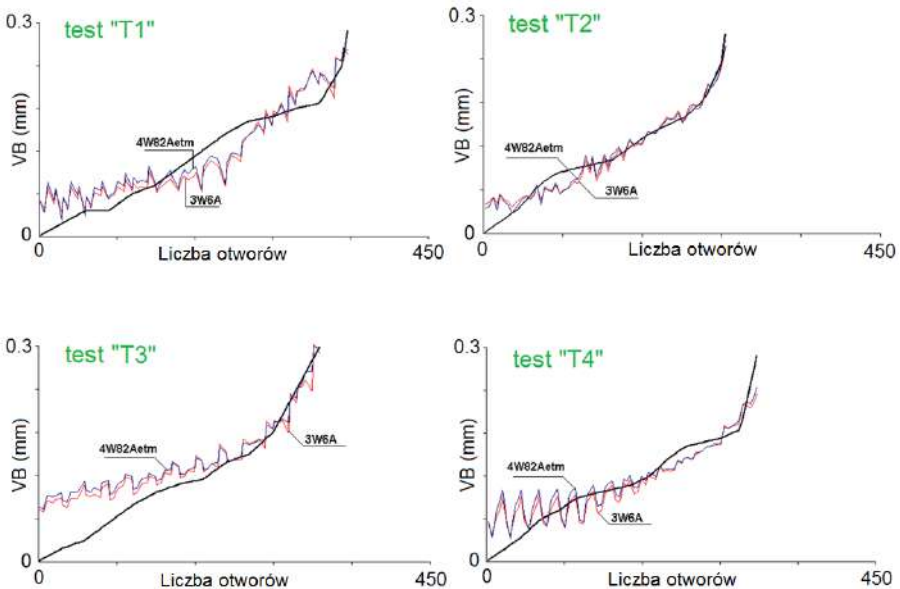
Test	4W82Aetm		4W82A	
	RMS	max	RMS	max
T1	0,046	0,115	0,050	0,124
T2	0,023	0,066	0,020	0,066
T3	0,067	0,142	0,069	0,150
T4	0,044	0,139	0,044	0,126
Wartość średnia	<b>0,045</b>	<b>0,116</b>	<b>0,046</b>	<b>0,117</b>

Tabela 7.10. Wyniki ilościowe procesu autokonfiguracji sieci 3-warstwowej

Test	4W82Aetm		4W82A	
	RMS	max	RMS	max
T1	0,046	0,121	0,050	0,124
T2	0,026	0,067	0,030	0,079
T3	0,062	0,131	0,061	0,123
T4	0,040	0,121	0,041	0,120
Wartość średnia	<b>0,044</b>	<b>0,113</b>	<b>0,046</b>	<b>0,112</b>

Wyniki podawane w tab. 7.9 i 7.10 są oczywiście obiektywną miarą jakości sieci, jednakże z punktu widzenia użytkownika ważniejszy jest rozkład błędów oszacowania zużycia popełnianych przez sieć w funkcji czasu. Stąd na rys. 7.26 przedstawiono podsumowanie wyników najlepszych z dotychczas uzyskanych

sieci (4W82etm oraz 3W6A) w postaci porównania rzeczywistych przebiegów zużycia (pogrubione, monotoniczne przebiegi) z oszacowanymi przez te sieci. Jak widać na rysunku dokładność oszacowania zużycia rośnie wraz z jego wartością. Dla  $VB = 0,3$  mm (wielkość odpowiadająca koniecznemu w tych warunkach skrawania wskaźnikowi stępienia) przewidywanie to jest bardzo dokładne. Wyniki uzyskiwane przez obie sieci są bardzo zbliżone ze sobą, co świadczy o ich równoważności. Ostatecznie można zatem przyjąć do dalszych rozważań sieć trzywarstwową.



Rys. 7.26. Porównanie rzeczywistego przebiegu zużycia z oszacowanym przez sieci 4W82etm i 3W6A we wszystkich próbach [331]

Jak wynika z przeprowadzonej analizy zastosowana sieć perceptronowa typu FFBP bardzo dobrze nadają się do automatycznej oceny stanu zużycia ostrza na podstawie użytych miar sił i parametrów skrawania. Pod względem implementacji są to najłatwiejsze narzędzia realizujące odwzorowania w wielowymiarowych przestrzeniach miar, parametrów i zużycia.

Sieci neuronowe nie wymagają poświęcania szczególnej uwagi danym wejściowym. Wystarczy skorzystać z wyciągniętych wcześniej wniosków dotyczących wyboru miar i struktury sieci, a następnie nauczyć sieć oczekiwanego odwzorowania. Sieć perceptronowa dobrze reaguje na zmienne wejściowe. Przy sztucznej inteligencji można z niewielkim błędem szacować zużycie ostrza narzędzia. Błąd ten ulega wyraźnej redukcji przy obniżeniu liczby danych uczących odpowiadających węższemu zakresowi zużycia. Zawężenie takie jest konieczne, ponieważ odwzorowanie danych w zużycie poniżej wartości 0,15 mm jest niemożliwe,

a próby uczenia sieci na całych przebiegach miar prowadzą do wzrostu błędów w istotnym przedziale 0,2-0,3 mm. Ponieważ producenci narzędzi skrawających określają wskaźnik stopienia dla nowoczesnych, wielokrotnie pokrywanych wiertel na ok. 0,3 mm (VB), ważniejsza jest znajomość dokładnego zużycia w zakresie od 0,2 do 0,3 mm niż w całym przedziale zmienności tych parametrów. Błąd oceny powyższych wskaźników wynika nie tyle z niedoskonałości samych narzędzi realizujących odwzorowanie, co z rozrzutu użytych miar spowodowanego głównie błędami pomiarowymi przy określaniu zużycia i nie.

## **7.4. Identyfikacja uszkodzeń przy wierceniu na podstawie analizy obrazu**

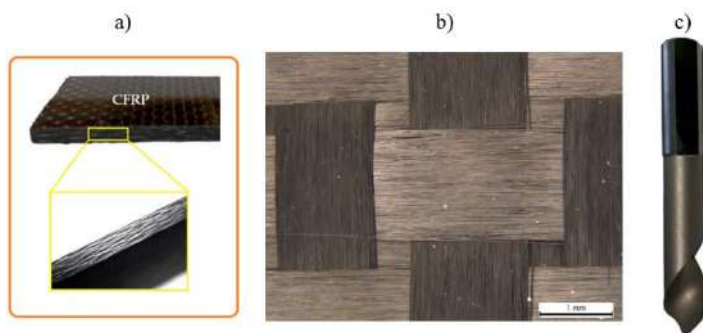
Kompozyty o osnowie polimerowej wzmocnione włóknami węglowymi, zaliczane do grupy CFRP (Carbon Fiber Reinforcement Plastics), są interesującą grupą materiałów inżynierskich [226, 317]. W przypadku wyrobów z CFRP proces wiercenia stanowi niezbędny etap produkcji mechanicznej podczas procesu montażu [159, 319]. Kompozyty CFRP mają tendencję do generowania pewnych defektów (w tym zadziorów i rozwarstwień) ze względu na naturę włókna węglowego i laminowanej struktury [320, 321]. Wiele eksperymentów wykazało, że defekty te znacznie zmniejszają wytrzymałość i odporność na zmęczenie materiałów CFRP, co nie tylko negatywnie wpływa na użyteczność produktów CFRP, ale także wpływa niekorzystnie na proces dalszego montażu [322, 323].

Stąd też niniejsze badania kładą nacisk na rozpoznawanie zadziorów i delaminacji CFRP powstałych w procesie wiercenia. Chociaż dostępnych jest wiele metod pomiaru defektów wywołanych wierceniem, wciąż trudno je odtworzyć ze względu na małą skuteczność opracowanych do tego celu algorytmów [317].

Głównym celem tego badania jest przedstawienie nowej metody rozpoznawania zadziorów i rozwarstwień powstałych w procesie wierceniem w oparciu o metody segmentacji progowej i przy użyciu rozmytego układu Takagi–Sugeno–Kang (TSK) z klasteryzacją subtraktywną. Proponowana metoda została zweryfikowana poprzez eksperymentalne próby wiercenia.

### **7.4.1. Metodyka badań**

W badaniach zastosowano sklejkę o grubości 9 mm oraz płytę CFRP o grubości 3 mm. Płyta CFRP została przyklejona jednostronnie do zewnętrznej powierzchni sklejki. Do badań w procesie wiercenia wykorzystano próbki o wymiarach 120 mm × 30 mm × 12 mm. Do testów wykorzystano typowe narzędzie skrawające, wiertło jednoostrzowe o średnicy 5 mm z ostrzami z polikrystalicznego diamentu (PCD) firmy Leitz Diamaster PRO (rys. 7.27).



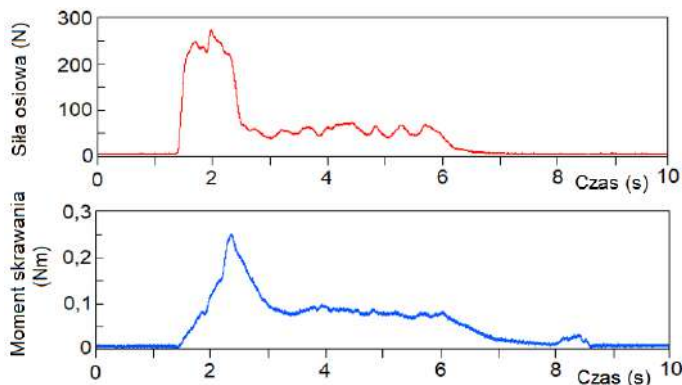
Rys. 7.27. Płyta CFRP (a), włókno węglowe (b), wiertło (c) [318]

Proces wiercenia przeprowadzono na pionowej frezarce CNC. Schematyczny diagram konfiguracji toru pomiarowego oraz systemu archiwizacji danych pomiarowych przedstawiono na rysunku (rys. 6.5). W testach wiercenia rejestrowano wartości siły posuwowej  $F_t$  i momentu skrawania  $M_c$  podczas obróbki. Wywiercono trzy otwory (z tym samym zestawem parametrów skrawania) w płycie CFRP/plywood o wymiarach  $130 \text{ mm} \times 30 \text{ mm} \times 18 \text{ mm}$  na frezarce CNC. Wartość siły posuwowej i momentu skrawania mierzono za pomocą piezoelektrycznego czujnika przemysłowego Kistler 9345B2. Sygnały z czujnika rejestrowano na dysku komputera osobistego (PC) za pomocą 16-bitowej karty analogowo-cyfrowej National Instruments 6034E o częstotliwości próbkowania 50 Hz. W badaniach zdjęcia powierzchni wokół wywierconych otworów wykonywano za pomocą mikroskopu stereoskopowego posiadającego optykę apochromatyczną z układem FusionOptics i TripleBeam.

#### 7.4.2. Analiza wyników badań

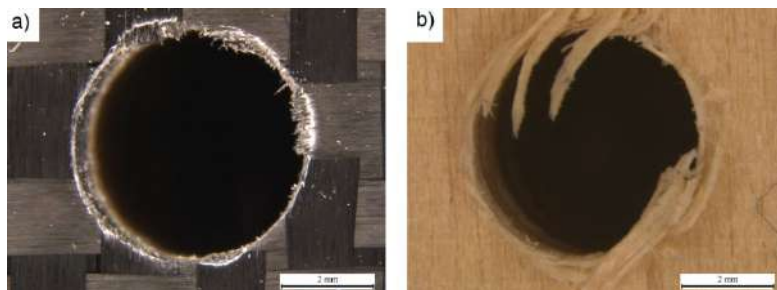
Zauważono, że podczas wiercenia można wyodrębnić charakterystyczne fragmenty sygnału siły posuwowej  $F_t$  i momentu skrawania  $M_c$  (rys. 7.28). Pierwszy fragment to obszar, w którym wiertło wchodzi w materiał obrabiany, w związku z tym siła posuwowa i moment skrawania wzrasta. Następnie wiertło zaczyna skrawać warstwę materiału o największej gęstości (CFRP).

Gdy wiertło opuszcza obszar materiału o zwiększonej gęstości, zarówno siła jak i moment maleje co do wartości. Następnie występuje fragment sygnału, w którym wiertło penetruje poszczególne warstwy forniru tworzące sklejkę. Powoduje to fluktuację wartości siły posuwowej i momentu skrawania.



Rys. 7.28. Zmiany siły posuwu i sygnału momentu skrawania [318]

Analiza wyrwań w procesie wiercenia CFRP jest kluczowa ze względu na specyfikę tego materiału. CFRP charakteryzuje się anizotropową strukturą, co sprawia, że wiercenie w nim jest bardziej skomplikowane niż w materiałach izotropowych, takich jak metale. Wyrwania, czyli uszkodzenia struktury materiału wokół otworu, mogą znacząco obniżyć jego wytrzymałość i funkcjonalność. Jednym z głównych przyczyn powstawania wyrwań to nadmierne siły posuwu i skrawania, co prowadzi do rozwarstwienia materiału. Stosowanie odpowiednich metod analizy i optymalizacja parametrów wiercenia pozwala na minimalizację uszkodzeń i uzyskanie otworów o wysokiej jakości. Wykonywanie i analiza zdjęć otworów w CFRP jest kluczowym elementem zapewnienia wysokiej jakości i integralności strukturalnej elementów kompozytowych. Stosowanie odpowiednich technik i narzędzi pozwala na dokładną ocenę uszkodzeń i optymalizację procesu wiercenia. Na rysunku 7.29 przedstawiono przykładowe zdjęcia wywierconych otworów, które posłużyły do dalszej analizy.



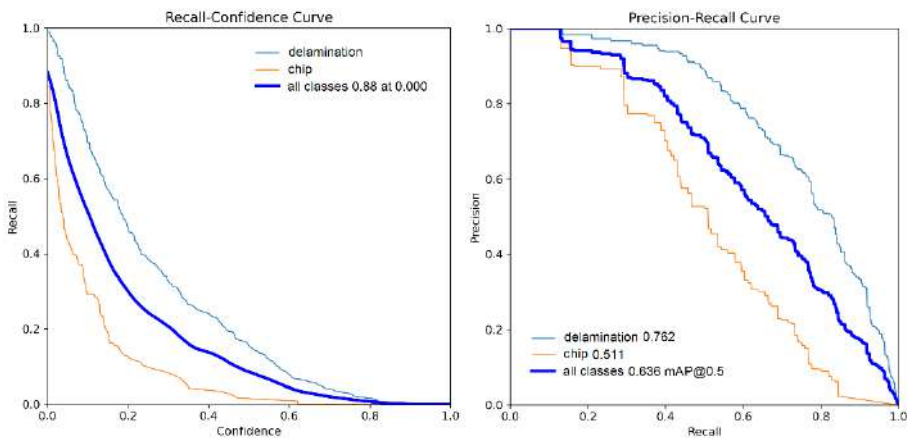
Rys. 7.29. Zdjęcie otworu: a) CFRP (wejście), b) sklejka (wyjście) [318]

W przeprowadzonych badaniach zastosowano dwie nadzorowane metody uczenia maszynowego: YOLOv8n i metodę wnioskowania rozmytego Takagi–Sugeno–Kang (TSK) z klasteryzacją subtraktywną, aby ocenić ich skuteczność

w wykrywaniu niezgodnej jakości otworów. Zestaw danych składał się z 72 poprawnych i 28 niezgodnych otworów. Z sygnału siły osiowej i momentu skrawania wyodrębniono cechy pozwalające na wykrywanie aktualnego położenie wiertła w trakcie obróbki, co umożliwiło identyfikację aktualnego położenia wiertła w obszarze płyty sklejkowej lub CFRP.

Ponadto z sygnałów siły osiowej i momentu skrawania wyznaczono miary w dziedzinie czasu, które posłużyły jako wejścia do systemu logiki rozmytej. 75% danych wykorzystano do treningu, a pozostałe 25% zarezerwowano do testowania. Do pierwszej analizy zastosowano Sieć YOLOv8n, jest to model detekcji obiektów w czasie rzeczywistym, będący najmniejszym i najszybszym wariantem z rodziny YOLOv8. Architektura YOLOv8n składa się z trzech głównych części: Backbone: służy do ekstrakcji cech z obrazu wejściowego, Neck: łączy cechy z różnych warstw „backbone” w celu poprawy dokładności detekcji obiektów o różnych rozmiarach, Head: odpowiada za ostateczną predykcję klasy i lokalizacji obiektów na obrazie.

Aby ocenić wydajność modelu YOLOv8n w zakresie wykrywania i rozpoznawania wad otworów, zastosowano dwie metryki: Recall i Average Precision (mAP) w celu oceny wydajności modelu (rys. 7.30). Recall mierzy, jak dobrze model identyfikuje wszystkie rzeczywiste pozytywne przypadki. W analizie uzyskano dokładność 88%. Average Precision (mAP) odzwierciedla dokładność modelu i reprezentuje średnią dokładność wszystkich stanów wykrytych przez model. W analizowanym przypadku wynosi 63,3% przy progu przecięcia 0,5.



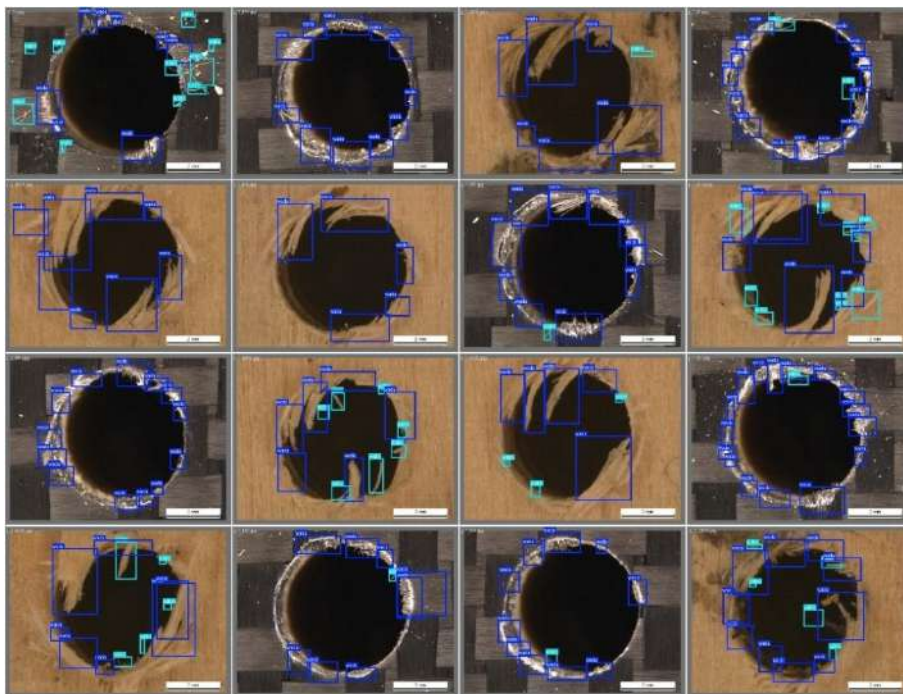
Rys. 7.30. Wskaźnik przywołania i średniej precyzji (mAP) dla modelu YOLOv8n [318]

Model Takagi-Sugeno-Kang (TSK) to rodzaj systemu wnioskowania rozmytego, który służy do modelowania i sterowania złożonymi, nieliniowymi systemami. Jedną z metod optymalizacji parametrów modelu rozmytego są metody klastrowania. Wykorzystują one fakt, że automatyczne wykrywanie pewnych grup

punktów pomiarowych i charakterystycznych wzorców zachowania systemu można przedstawić za pomocą jednej reguły lub ich spójnego zbioru.

Metoda potencjału subtraktywnego zastosowana w tych badaniach zakłada, że środkiem klastra może być tylko element zbioru punktów pomiarowych. Metoda została szczegółowo opisana w pracy [226]. Centra klastrów wyznaczone metodą potencjału subtraktywnego mogą być wykorzystane do budowy reguł wnioskowania rozmytego dla różnych algorytmów sztucznej inteligencji. W szczególności mogą być wykorzystane do budowy modeli, które przewidują zachowanie różnych typów złożonych systemów w czasie. Identyfikacja systemu przy użyciu klasteryzacji obejmuje tworzenie klastrów w przestrzeni danych i tłumaczenie tych klastrów na reguły TSK tak, aby uzyskany model był podobny do zidentyfikowanego systemu.

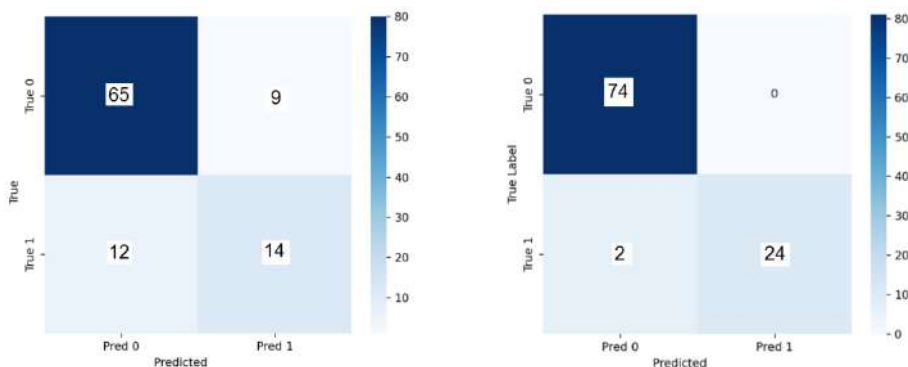
Rysunek 7.31 przedstawia wyniki procesu rozpoznawania defektów obserwowane po stronie wejścia i wyjścia otworu. Wyniki te uzyskano przy użyciu modelu YOLOv8n + TSK.



Rys. 7.31. Lokalizacja defektów wokół otworu [318]

Macierz pomyłek to prosta tabela, która pokazuje, jak dobrze działa model klasyfikacji, porównując jego przewidywania z rzeczywistymi wynikami. Dzieli przewidywania na cztery kategorie: prawidłowe przewidywania dla obu klas (prawdziwe pozytywy i prawdziwe negatywy) oraz nieprawidłowe przewidywania

(fałszywe pozytywy i fałszywe negatywy). Pomaga to zrozumieć, gdzie model popełnia błędy, dzięki czemu można go ulepszyć. Macierz wyświetla liczbę przewidywań wygenerowanych przez model na danych testowych. Macierz pomyłek (rys. 7.32) pomaga zobaczyć, jak dobrze działa model, pokazując prawidłowe i nieprawidłowe przewidywania. Pomaga również obliczyć kluczowe miary, takie jak: dokładność, precyzja i odwołanie.



Rys. 7.32. Macierz pomyłek dla wyników otrzymanych przy zastosowaniu modelu YOLOv8n (po prawej) oraz modelu YOLOv8n z wnioskowaniem rozmytym Takagi–Sugeno–Kang (TSK) z klasyfikacją subtrakcyjną (po lewej) [318]

Metryki wydajności są niezbędne do oceny skuteczności algorytmów wykrywania obiektów. Metryki te dostarczają informacji na temat tego, jak dobrze model wykrywa i lokalizuje obiekty na obrazach. Precyzja P opisuje odsetek wykrytych obiektów, które są rzeczywiście pożądaną klasą, podczas gdy odwołanie R wskazuje odsetek rzeczywistych obiektów wykrywanych przez model. Idealny model miałby zarówno precyzję, jak i odwołanie zbliżające się do 100%. Kluczowe metryki wyliczone na podstawie macierzy dla obu przypadków przedstawiono w tab. 7.11.

Tabela 7.11. Metryki oceny

Model	P %	R %
YOLOv8n	61	54
YOLOv8n+TSK	100	92

W niniejszym badaniu przedstawiono nowe podejście do monitorowania procesów w wierceniu, mające na celu identyfikację otworów niezgodnych z wymaganiami. W szczególności wprowadzono logikę rozmytą TSK w celu wykrywania punktów przejścia materiału, umożliwiając automatyczną segmentację sygnału siły posuwowej i momentu skrawania. Po mikroskopowej analizie zdjęć

przypisano etykiety na podstawie obserwacji współczynnika rozwarstwienia. YO-LOv8n osiągnęło wyniki gorszy w stosunku do model połączenia YOLOv8n i rozmytego modelu Takagi–Sugeno–Kang TSK. Precyzja P modelu YOLOv8n wynosiła 61%, podczas gdy odwołanie R 54%. Natomiast precyzja modelu YO-LOv8n+TSK wynosiła 100%, podczas gdy odwołanie R 92%.

## 7.5. Podsumowanie

Identyfikacja materiału poddawanego obróbce w trakcie procesu wiercenia możliwa jest na podstawie siły skrawania  $F_c$ , momentu skrawania  $M_c$  oraz sygnałów przyspieszenia. Identyfikacja na podstawie sygnałów siły skrawania i momentu skrawania oparta jest na wartości jednostkowego oporu skrawania  $k_{c1,1}$  oraz na podstawie zmiany wartości PermEn Hp.

Identyfikacja oparta na analizie STFT sygnałów przyspieszenia w określonych kierunkach X, Y i Z wykorzystuje ocenę dominujących amplitud częstotliwości w zależności od obrabianego materiału. Znajomość historii sygnału nie jest konieczna do identyfikacji przetwarzanego materiału. Zgodnie z oczekiwaniami, jednostkowy opór skrawania  $k_{c1,1}$  zmieniał swoją wartość w zależności od rodzaju obrabianego materiału, co pozwoliło na jednoznaczne rozróżnienie materiałów. Wyniki wskazują, że proponowana metodologia może być wykorzystana jako inteligentna technika w procesie wiercenia, służąca do identyfikacji materiałów obrabianych. Ponadto, zastosowana identyfikacja materiału oparta na zmianach wartości PermEn Hp sygnału siły skrawania  $F_c$  podczas procesu wiercenia działała niezawodnie dla wszystkich analizowanych materiałów poddawanych obróbce. Okazało się, że metoda ta jest niewrażliwa na kombinacje parametrów wiercenia zastosowane w badaniach. Proponowana metoda umożliwia wiarygodne wykrycie kontaktu narzędzia z materiałem przedmiotu obrabianego oraz identyfikację materiału podczas procesu wiercenia. Nie zaobserwowano wyraźnych różnic w rejestrowanych sygnałach wibroakustycznych w dziedzinie czasu przy zmianie przetwarzanego materiału. Jednak po przetworzeniu sygnału do dziedziny częstotliwości można zaobserwować charakterystyczne pasma częstotliwości o dominującej amplitudzie, zależne od obrabianego materiału.

W niniejszej pracy podjęto także próbę predykcji chropowatości powierzchni obrabianej płyty MDF w procesie frezowania na podstawie sygnałów przyspieszenia z przemysłowego czujnika piezoelektrycznego zainstalowanego w strefie skrawania. Do oceny i pomiaru chropowatości powierzchni przyjęto parametr chropowatości powierzchni Sq. Przewidywanie chropowatości powierzchni przeprowadzono z wykorzystaniem sztucznej sieci neuronowej (ANN) z radialną funkcją bazową (RBF) oraz rozmytego modelu Takagi–Sugeno–Kang (TSK) z subtraktywnym klasterowaniem. W badaniach, jako dane wejściowe do ANN i modelu rozmytego przyjęto parametry kinematyczne procesu skrawania oraz wybrane miary sygnału przyspieszenia. Na wyjściu uzyskano wartości parametru chropowatości powierzchni Sq. Wyniki eksperymentów pokazują, że na chropowatość

powierzchni wpływają nie tylko parametry kinematyczne skrawania, ale także drgania generowane podczas procesu frezowania. Zatem, łącząc informacje o parametrach kinematycznych skrawania i drganiach, można poprawić dokładność przewidywania chropowatości powierzchni w procesie frezowania płyt MDF. Zastosowanie modelowania rozmytego TSK opartego na metodzie klasteryzacji subtraktywnej do integracji informacji z wielu pomiarów sygnału przyspieszenia w badanym zakresie warunków skrawania oznaczało, że chropowatość powierzchni została przewidziana z dużą dokładnością i wysoką niezawodnością.

Za pomocą dwóch przetestowanych narzędzi sztucznej inteligencji możliwe jest oszacowanie chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego z niewielkim błędem. Z analizy uzyskanych wyników wynika, że zastosowana w badaniach sieć neuronowa RBF oraz logika rozmyta TSK doskonale nadają się do automatycznej oceny chropowatości powierzchni w oparciu o pomiary sygnałów przyspieszenia i parametrów kinematycznych procesu frezowania płyt MDF. Pod względem implementacji metody te stanowią najłatwiejsze narzędzia do mapowania pomiarów i parametrów skrawania w przestrzeni wielowymiarowej. Sieć neuronowa nie wymaga szczególnej uwagi w odniesieniu do danych wejściowych. Wystarczy określić pomiary sygnałów i strukturę sieci, a następnie wytrenować ją w celu uzyskania oczekiwanego odwzorowania. Tworząc bazę reguł wnioskowania dla układu rozmytego, konieczna jest staranna analiza przebiegów sygnałów pomiarowych. Reguły układu rozmytego są proste, a ich konstrukcja polega na przeniesieniu, niemal „bezpośrednio”, obserwacji zmian pomiarów na język logiki rozmytej. Zarówno sieci RBF, jak i układ rozmyty dobrze reagują na zmienne wejściowe. Za pomocą dwóch przetestowanych narzędzi sztucznej inteligencji możliwe jest oszacowanie chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego z niewielkim błędem. Przy zastosowaniu sieci neuronowej RBF, błąd RMSE oszacowania wartości parametru  $S_q$  wyniósł  $0,379 \mu\text{m}$ , podczas gdy błąd oszacowania oparty na logice rozmytej wyniósł  $0,198 \mu\text{m}$ . Wyniki eksperymentów potwierdzają skuteczność logiki rozmytej i stanowią satysfakcjonujące porównanie z innymi metodami sztucznej inteligencji. Błąd w ocenie parametru  $S_q$  wynika nie tyle z niedoskonałości narzędzi mapujących, co z rozproszenia pomiarów, spowodowanego głównie błędami pomiaru wartości parametru  $S_q$  oraz niejednorodnością materiału obrabianego przedmiotu. Zaletą sieci RBF jest jej czas uczenia, który jest znacznie krótszy niż w przypadku uczenia wielowarstwowej sieci neuronowej perceptronu.

## 8. DIAGNOSTYKA ZUŻYCIA OSTRZA SKRAWAJĄCEGO

### 8.1. Wiadomości ogólne

Ciągłe dążenie do zwiększania wydajności i jakości przy jednoczesnej minimalizacji kosztów obróbki skrawaniem nieuchronnie wymusza automatyzację, zmniejszając tym samym udział człowieka w nadzorze nad procesem obróbki. Istotną częścią tego nadzoru jest monitorowanie zużycia ostrzy narzędzi skrawających, które ma negatywny wpływ na dokładność obróbki, jakość powierzchni i wzrost kosztów. W związku z tym konieczność monitorowania stanu narzędzi w czasie rzeczywistym i wdrażania odpowiednich środków zaradczych jest przedmiotem znacznego zainteresowania badaczy i praktyków od kilku dziesięcioleci.

Literatura naukowa na ten temat jest obszerna i dostępne są liczne przeglądy. Stan badań i zastosowań przemysłowych pod koniec ubiegłego wieku przedstawiono w [329]. Niedawne wystąpienie otwierające CIRP [342] omówiło kluczowe technologie wspomagające dla Przemysłu 4.0, a także przykłady zastosowań w procesach przemysłowych, przyszłe wyzwania i nadchodzące trendy w monitorowaniu obróbki. W [343] przedstawiono aktualne osiągnięcia (2012–2022), w których do określania trwałości ostrzy narzędzi skrawających wykorzystuje się uczenie maszynowe i inne procesy statystyczne. Pojawiło się mnóstwo publikacji oferujących coraz większą gamę nowatorskich rozwiązań, ze szczególnym naciskiem na sztuczną inteligencję. Obszerny przegląd tego tematu można znaleźć w [344].

Pomimo obszernej literatury naukowej na temat systemów monitorowania, w której w ostatnich latach opublikowano dziesiątki artykułów, nacisk tych publikacji nadal położony jest na osiągnięcia naukowe i nowe rozwiązania laboratoryjne, a nie na szersze zastosowania w kontekście przemysłowym. Nawet jeśli niektóre z nich zostały przetestowane w warunkach przemysłowych (np. [345, 346, 347, 348]), nie są one dostępne komercyjnie.

W dobie Przemysłu 4.0 logiczne wydaje się szerokie zastosowanie systemów monitorujących proces obróbki. Jednakże ich zastosowanie obserwuje się przede wszystkim w branżach charakteryzujących się produkcją wielkoseryjną. Większość strategii stosowanych w komercyjnych systemach monitorujących wymaga, aby system pozyskiwał wiedzę o przebiegu sygnału diagnostycznego podczas początkowej operacji z ostrymi narzędziami. Po zakończeniu procesu uczenia się system może monitorować narzędzia dla operacji o identycznym charakterze. W konsekwencji, dominującym zastosowaniem systemów jest produkcja wielkoseryjna.

Inne zupełnie wymagania dotyczą skuteczności danego systemu (strategii) w zastosowaniach obejmujących pojedynczą, niewielką produkcję partiovą a produkcję seryjną (masową). Ważne jest, aby zauważyć, że strategie opracowane dla

produkcji jednostkowej można bezproblemowo dostosować do produkcji masowej. Znaczącym postępem byłoby wyeliminowanie potrzeby uczenia się systemu i możliwości monitorowania narzędzia od pierwszej operacji.

Jednak przegląd literatury naukowej, w tym główni przeglądu literatury na temat systemów monitorujących, ujawnia uderzający brak uwagi poświęconej temu problemowi. Sporadycznie podejmowano próby sformułowania strategii dla jednostkowej produkcji. Na przykład [349] zaproponował strategię monitorowania operacji mikrofrezowania bez wcześniejszego uczenia. Strategia ta pozwala oszczędzać zużycie i lokalne uszkodzenia krawędzi skrawających narzędzia.

Wszelkie przyszłe prace w tym obszarze powinny uwzględniać różnicę między dwiema możliwymi sytuacjami, jakie mogą mieć miejsce w praktyce przemysłowej:

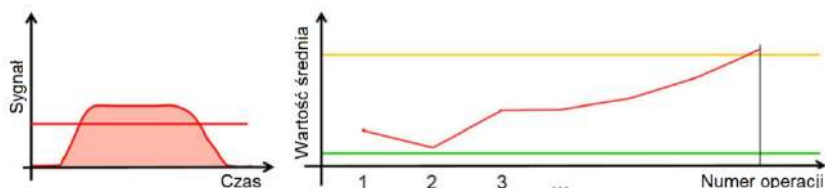
- w warunkach przemysłowych produkowane są różne części, tzn. operacje są wykonywane z różnymi parametrami skrawania, podczas gdy narzędzia i materiał obrabiany są stałe (niezmienne). Kluczowymi czynnikami są tutaj czas i umiejętności personelu wymagane do nauki obsługi systemu nadzorującego stan narzędzia,
- w zakładzie przemysłowym różne części są produkowane w krótkich partiach, z różnych materiałów i przy użyciu różnych narzędzi. W takim zastosowaniu wdrożenie systemu monitorowania staje się koniecznością bez wcześniejszego uczenia, które zostało już przeprowadzone przez producenta systemu poprzez wykorzystanie bazy danych, budowę modelu fizycznego i zbieranie danych sygnałowych podczas rzeczywistych operacji przetwarzania. W takiej sytuacji uczenie nie wpływa negatywnie na produkcję na konkretnej obrabiarce w zakładzie przemysłowym. Należy jednak starannie rozważyć złożoność i zakres danych wprowadzanych przez operatora, w tym informacje dotyczące planowanej obróbki, parametrów skrawania, materiału obrabianego przedmiotu i narzędzi, ponieważ będą one bezpośrednio wpływać na wymagany poziom kompetencji operatora.

W praktyce przemysłowej operator często ręcznie reguluje posuw lub prędkość skrawania podczas obróbki za pomocą pokrętki. System monitorowania procesu byłby korzystny, gdyby potrafił wykrywać takie postępowanie i uwzględniać je w swoich działaniach. Jednak istniejące systemy diagnostyczne nie są w stanie poradzić sobie z takimi sytuacjami.

Stan narzędzia jest określanej za pomocą określonych strategii, tj. metod przetwarzania sygnałów i algorytmów. Jak wspomniano wcześniej, głównym celem komercyjnych systemów nadzoru jest identyfikacja zużycia ostrzy narzędzi, w szczególności nadmiernego zużycia, które skutkuje zakończeniem okresu trwałości ostrza. Ogólnie rzecz biorąc, monitorowaną wielkością jest wartość sygnału z wybranego czujnika, która jest czasami filtrowana dolnoprzepustowo lub górno-przepustowo (składnik dynamiczny). Sygnały te są następnie poddawane analizie z wykorzystaniem jednej lub wielu strategii.

W większości komercyjnych systemów monitorowania parametry operacyjne, takie jak wybór strategii, wybór części operacji do diagnozy (np. wykluczenie początku i końca skrawania w przypadku silnego zakłócenia sygnału), wartości

graniczne itp., muszą być definiowane ręcznie przez użytkownika. Parametry te mogą być dość liczne, a ich ustalenie może być trudne i wymagać specjalistycznej wiedzy. W systemach niektórych producentów parametry są wstępnie ustawiane automatycznie, a następnie użytkownik może je dostosować w „trybie eksperckim”.



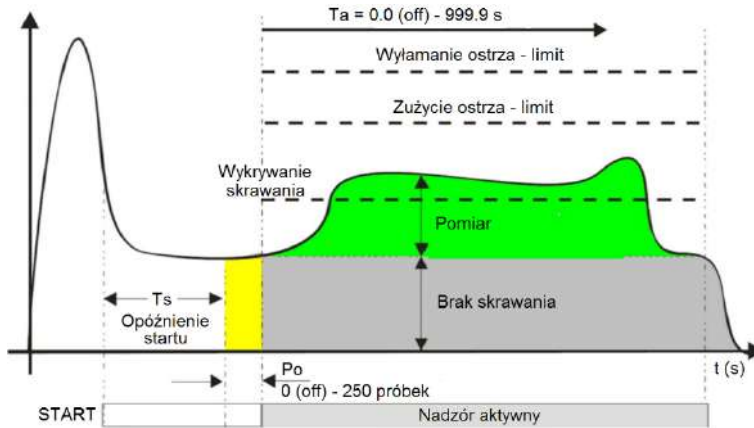
Rys. 8.1. Monitorowanie zużycia narzędzia na podstawie średniej wartości sygnału z całej operacji Ceratizit [350]

W miarę zużycia ostrza narzędzia skrawającego średnia siła skrawania (lub inny sygnał, taki jak moment skrawania, poziom drgań itp.) zwykle wzrasta. Dlatego wartość ta jest często używana do monitorowania zużycia narzędzia. System monitorujący rejestruje średnią wartość sygnału podczas każdej operacji i porównuje ją do limitu zużycia (żółta linia na rys. 8.1) po operacji. Tę strategię monitorowania zużycia narzędzia stosuje kilku producentów systemów TCMS (Digital Way [351], Caron [352], Ceratizit [353], Techna-Tool [354], czasami jako pole pod krzywą sygnału, w innych przypadkach użytkownik określa część operacji w celu monitorowania zużycia narzędzia (Korloy [355], Nordmann [356])).

Najprostszą metodą monitorowania stanu narzędzia stosowaną w komercyjnych systemach są proste, stałe, zaprogramowane przez użytkownika limity wartości obserwowanego sygnału. Stosując tę strategię, system porównuje sygnały czujników do zdefiniowanych przez użytkownika stałych limitów przez cały cykl skrawania danego narzędzia. Limity pozostają niezmiennie przez kolejne cykle procesu tego narzędzia (Montronix [357]).

Przykład stałych limitów zastosowanych do typowego cyklu obróbki przez Techna-Tool [354] pokazano na rys. 8.2. Pierwszy szczyt pomiaru, spowodowany zmianą prędkości silnika lub jego uruchomieniem, nie jest monitorowany. Tylko część skrawania, w której prędkość obrotowa jest stała, a narzędzie faktycznie skrawa, jest monitorowana przez system monitorujący. Gdy głowica maszyny zaczyna się poruszać w kierunku przedmiotu obrabianego, sterowanie obrabiarką generuje sygnał „Start”, który informuje system monitorujący, że rozpoczyna się nowy cykl i aktywowane jest zdefiniowane przez użytkownika opóźnienie startu, Ts. Pod koniec opóźnienia startowego, zanim narzędzie zacznie skrawać przedmiot obrabiany, wykonywany jest pomiar biegu jałowego. Pomiar ten zazwyczaj zmienia się w ciągu dnia ze względu na takie czynniki, jak tarcie, temperatura, lepkość oleju i smaru. Jest on obliczany jako średnia z określonej programowalnej

liczby pomiarów  $P_o$ . Po zakończeniu pomiaru biegu jałowego monitorowanie narzędzia staje się aktywne.



Rys. 8.2. Stałe limity stosowane w strategii TCMS „Techna-Check 6400”, Techna-Tool [358]

Czas trwania monitorowania można ograniczyć za pomocą timera monitorowania  $T_a$ , aby uniknąć monitorowania niepożądanych zdarzeń, takich jak zmiany prędkości obrotowej silnika. W razie potrzeby timer można wyłączyć, aby umożliwić monitorowanie tak długo, jak długo obecny jest sygnał startowy. Jeśli sygnał przekroczy górną „limit przeciążenia”, system wyzwoi alarm, który powinien zostać wysłany do układu sterowania obrabiarki w celu natychmiastowego zatrzymania obróbki i wycofania narzędzia. Środkowa „limit stępienia” oznacza nadmierne zużycie ostrza (koniec okresu trwałości ostrza), a dolna „brak skrawania” oznacza brakujące (uszkodzone) narzędzie (rys. 8.2). Wartości stałe ( $T_s$ ,  $P_o$ ,  $T_a$ ) i limity są ustawiane przez użytkownika.

## 8.2. Koncepcja systemu monitorowania zużycia ostrza

Przy wyborze miary mającej służyć jako wskaźnik zużycia ostrza ważne jest, aby była ona skorelowana z jego zużyciem. W literaturze można znaleźć kilka sposobów określania miary. Są to najczęściej kombinacje liniowe: siły skrawania i wielkości pochodnych, emisji akustycznej oraz drgań na podstawie których określone są ich przyrosty (względne lub bezwzględne). Z doświadczeń zgromadzonych oraz opisanych w innych pracach z tego zakresu, można wyróżnić kilka charakterystycznych sposobów poszukiwania pośrednich wskaźników zużycia ostrza, opartych na pomiarach sił skrawania i wielkości pochodnych. Najprostszym sposobem jest bezpośrednie korelowanie sił skrawania ze zużyciem ostrza.

Przy opracowaniu strategii działania układu założono, że do prowadzenia nadzoru naturalnego zużycia ostrza będą mogły być użyte trzy warianty czujników siły skrawania. Poczynając od czujnika do pomiaru tylko jednej siły (najtańszy)

poprzez czujnik trzyskładowy i kończąc na czujniku do pomiaru siły i momentu skrawania mocowanym we wrzecionie obrabiarki (najdroższy). Takie założenie wiąże się z odpowiednim doбором miar sygnałów sił skrawania. Postanowiono zastosować następujące miary: Bezpośrednia wartość miar sygnałów w dziedzinie czasu siły  $F_z$ ,  $F_x$  lub  $F_y$  lub momentu  $M_c$ . Sygnały składowych siły skrawania i momentu są najbardziej skorelowana ze zużyciem ostrza. Ponieważ są one zależne także od parametrów skrawania, muszą one być znane, a mówiąc ściślej, strategia musi określać wartości siły  $F_z$ ,  $F_x$ ,  $F_y$  lub  $M_c$  oddzielnie dla każdego zabiegu o ustalonych parametrach skrawania. Po spełnieniu tego warunku miary w dziedzinie czasu tych sygnałów tych wystarczają do określania stanu ostrza.

W opracowaniu strategii przyjęto następujące miary:

- Bezpośrednia wartość miar sygnału siły na kierunkach  $F_x$  lub  $F_y$  w dziedzinie częstotliwości (podobnie jak miara powyżej).

Stosunek odchylenia standardowego sygnału siły na kierunku  $F_x$  lub  $F_y$  do sygnału siły  $F_z$ . Sygnał siły na kierunku  $F_z$  w znacznie mniejszym stopniu zależy od zużycia ostrza, niż siła  $F_y$  lub  $F_x$ , jest natomiast powiązana z parametrami skrawania. W przypadku zmian głębokości skrawania wartość stosunku siły  $F_y$  lub  $F_x$  do siły  $F_z$  ulega niewielkim zmianom, co może być wykorzystane przy obróbce, w której zmiany głębokości skrawania występują w sposób niekontrolowany, przypadkowy. Pamiętać przy tym należy, iż wartość tego stosunku znacznie zależy od posuwu, nie można więc stosować tej miary bez znajomości posuwu (odróżnienia zabiegów o różnych posuwach). Miara ta nie jest korzystniejsza od bezpośredniej wartości miary sygnału siły  $F_y$  lub  $F_x$  przy znanych zmianach głębokości skrawania.

- Stosunek sumy odchylenia standardowego sygnałów siły na kierunku  $F_x$  i  $F_y$  i do sygnału siły na kierunku  $F_z$ .

Przyjęcie takiej miary wiąże się z tym, że informacje o zużyciu ostrza zawarte są w sygnałach sił na kierunkach  $F_x$  i  $F_y$ . Miara, w której dwa sygnały siły niosą informację o zużyciu ostrza, jedna wyłącznie informację o parametrach skrawania będzie zatem bardziej wiarygodna.

Nie mniejsze znaczenie niż wybór samych miar ma dobór sposobu ich wyznaczania. Postanowiono zastosować trzy takie sposoby:

- Wartość średnia miary w czasie całej operacji ( $S_{sr}$ ) – zgodnie z obecnym stanem wiedzy, to najlepszy, najchętniej stosowany sposób wyznaczania miary sygnałów sił skrawania i momentu. Umożliwia uwzględnienie całej operacji. Jest szczególnie przydatny np. przy obróbce wielozabiegowej, w trakcie której nie występuje duże zróżnicowanie parametrów skrawania.

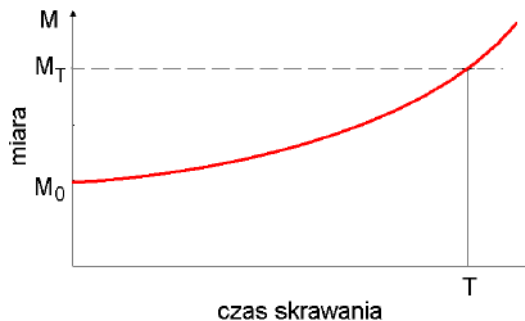
- Wartość maksymalna miary z określonych punktów operacji ( $S_i[NrP]$ ) jest przydatna np. przy operacjach wielozabiegowych, w których występuje duże zróżnicowanie parametrów skrawania. Operator nie musi przy tym wybierać określonych zabiegów, lecz wybrać charakterystyczne punkty w przebiegu każdego z nich. Oczywiście czasy trwania poszczególnych zabiegów muszą być odpowiednio dłu-

gie (przynajmniej 5 sek.), by wybór ten nie był kłopotliwy. Układ nadzoru wyznaczał będzie miarę dla wybranych punktów, a następnie wyznaczał maksymalną wartość przyrostu tej miary. Oznacza to diagnozowanie zużycia ostrza w oparciu o pomiary wykonywane w czasie jednego z zabiegów, tego, w którym przyrost miary jest najwyższy. Dodatkową zaletą tego sposobu określania wartości miary jest możliwość brania pod uwagę wybranych fragmentów operacji, w których skrawanie jest ustalone, w operacjach, w których występują niepowtarzalne zmiany przekroju warstwy skrawanej, a więc i sił skrawania.

- Wartość maksymalna miary w czasie całej operacji ( $M_{\max}$ ) – wykorzystywano ona może być np. przy obróbce złożonych kształtów gdzie zmiana parametrów skrawania następuje w sposób ciągły, a nie występują dostatecznie długie fragmenty skrawania ustalonego, w których można by zastosować pomiary w określonych punktach.

### 8.3. Wykorzystana część okresu trwałości ostrza

Strategie wykrywania nadmiernego wzrostu zużycia ostrza używane przez różnych producentów bazują zwykle na wzroście wybranej miary sygnału (zmieniającej się wraz ze zużyciem ostrza) towarzyszącemu zużyciu. Miarą taką może być średnia, maksymalna wartość sygnału siły, liniowa kombinacja sygnałów sił skrawania. Ocena wybranej miary jest wykonywana z reguły po zakończeniu operacji. Oznaczmy miarę jako  $M$ . Ostremu narzędziu odpowiada wartość początkowa miary  $M_0$ . W trakcie używania się ostrza miara rośnie, uzyskując przy jego stopniu (na koniec okresu trwałości ostrza  $T$ ) wartość  $M_T$  (rys. 8.3).



Rys. 8.3. Przyrost siły skrawania towarzyszący zużyciu się ostrza

Uczenie układu polega na obróbce pierwszego przedmiotu ostrym narzędziem. Na jej podstawie wyznaczany jest poziom graniczny  $M_T$ , w oparciu o podany przez operatora dopuszczalny przyrost procentowy wartości miary  $dM_T$  (8.1):

$$M_T = M_0 \left( 1 + \frac{dM_T}{100\%} \right) \quad (8.1)$$

Osiągnięcie poziomu granicznego oznacza koniec okresu trwałości ostrza, czyli jego stępienie. Układy komercyjne często informują o aktualnej wartości przyjętej miary. Takie informacje przedstawione w formie graficznej lub cyfrowej mogą być użyteczne dla naukowca, ale nie dla operatora, dla którego istotna jest informacja o aktualnym stopniu zużycia ostrza. Bardziej lub mniej świadomie posługuje się on pojęciem wykorzystanej części okresu trwałości ostrza  $\Delta T$  będącym stosunkiem dotychczasowego czasu skrawania do okresu trwałości ostrza [118] (8.2):

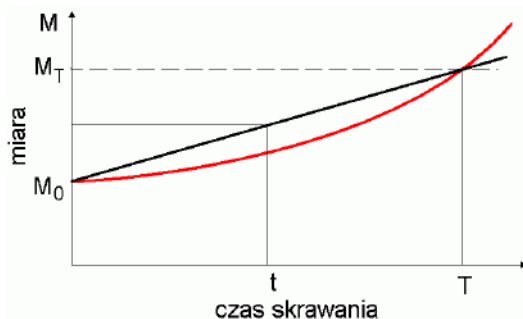
$$T = t/T \quad (8.2)$$

Wykorzystana część okresu trwałości ostrza jest z definicji liniową funkcją czasu. Jej przebieg oszacowuje się na podstawie przebiegu sygnału diagnostycznego który może, lecz nie musi, być liniową funkcją czasu (rys. 8.4). Na podstawie tego uproszczenia, wykorzystaną część okresu trwałości ostrza można wyznaczyć jako (8.3):

$$\Delta T = \frac{t}{T} = \frac{M - M_0}{M_T - M_0} \quad (8.3)$$

a podstawiając (8.1) do (8.3) oraz wyrażając  $\Delta T$  w % otrzymuje się (8.4):

$$\Delta T = \left( \frac{M}{M_0} - 1 \right) \frac{10^4}{dM_T} \quad (8.4)$$



Rys. 8.4. Rzeczywisty i uproszczony przebieg wybranej miary w funkcji czasu

Obliczenia te operator wykonuje lub oszacowuje w pamięci, co jest dość nie wygodne. Wydaje się, że układ będzie znacznie bardziej przyjazny operatorowi, jeśli w trakcie nadzoru, zamiast wartości miar sygnałów pomiarowych będzie go informował właśnie o stopniu wykorzystania ostrza  $\Delta T$  %. Miary sygnałów będą wyświetlane jedynie w trakcie uczenia układu. Po uczeniu z ostrym narzędziem wyświetlana jest wartość  $M_0$ , po uczeniu narzędziem stępionym, wartość  $M_T$ . Na ich podstawie operator wyznaczyć może  $dM_T$  ze wzoru (8.5):

$$dM_T = \frac{M_T - M_0}{M_0} 100\% \quad (8.5)$$

Przyjęcie uproszczonego, liniowego przebiegu miar sygnałów sił skrawania w funkcji czasu pociąga za sobą pewne błędy. Nie sposób jednak z góry przewidzieć jaką funkcją można opisać zależność miary od czasu. Pozostawiony zatem zostanie – jako pierwsze przybliżenie – uproszczony liniowy opis zależności miar od czasu skrawania. Bardzo istotne jest jednak, że opisane błędy z definicji maleją do zera ( $M_K$  określone jest dla  $t = T$ ,  $\Delta T = 100\%$ ), gdy ostrze osiągnie koniec okresu trwałości. Stopień ostrza zatem wykrywane winno być prawidłowo, nawet jeśli ocena wykorzystanej części okresu trwałości ostrza w jego trakcie jest obciążona błędami.

Na zakończenie warto podkreślić, że przydatność zaproponowanej strategii zależy od występowania korelacji między sygnałami sił skrawania a zużyciem ostrza. Nie ma przy tym znaczenia materiał obrabiany, materiał ostrza czy inne warunki skrawania. Strategia będzie skuteczna, jeśli zużywaniu się ostrza towarzyszył będzie znaczący (najlepiej liniowy) przyrost sygnałów sił skrawania. Pamiętać jednak należy o tym, że występują przypadki, w których zależność sił od zużycia jest zbyt słaba by mogła być zastosowana przy użyciu zaproponowanej jak i każdej innej strategii opartej na pomiarach wielkości sygnałów sił skrawania.

## 8.4. Algorytm działania strategii nadzoru stanu narzędzia

Ważną cechą opracowanej strategii, jaką postanowiono uzyskać, była prostota obsługi układu nadzorującego. Oznacza to sprowadzenie ilości informacji wprowadzanych przez operatora do niezbędnego minimum. Od układu sterującego obrabiarki potrzebny będzie sygnał o starciu i zatrzymaniu posuwu roboczego (początek i koniec nadzoru).

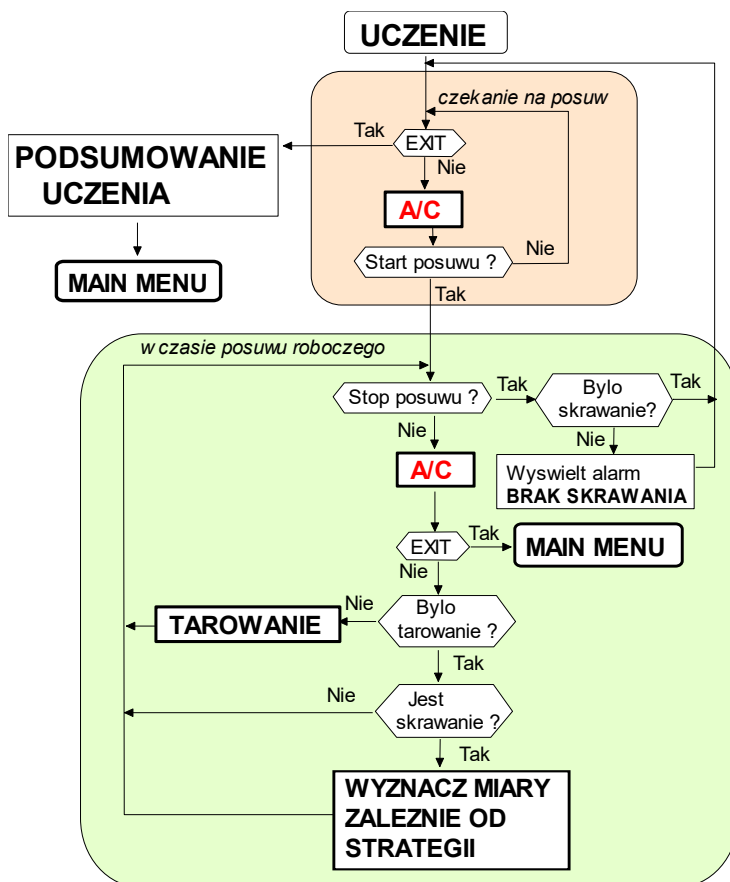
Przyjęto, że program główny będzie się składał z trzech modułów (podprogramów) realizujących trzy podstawowe funkcje układu:

1. Ustawienia.
2. Uczenie.
3. Nadzór.

Poszczególne programy będą wywoływane z głównego menu programu, do którego program wróci po wykonaniu każdego podprogramu.

W Ustawieniach po pierwsze należy wskazać zainstalowany na obrabiarce czujnik (co mierzy). Od tej informacji zależy przyjęta miara sygnału. Jeśli wybrano czujnik sił, operator stwierdza, czy chce prowadzić nadzór katastroficznego stopnia ostrza. Jeśli nie, układ przyjmuje, że prowadzony będzie nadzór zużycia ostrza. Ostatnią informacją, jaką należy podać jest minimalna występująca w operacji prędkość obrotowa wrzeciona. Jest ona potrzebna do wyznaczenia czasu niezbędnego do ustabilizowania się obróbki.

Procedura Uczenie (rys. 8.5) rozpoczyna się od oczekiwania na sygnał startu posuwu roboczego od układu sterowania obrabiarki. W trakcie tego oczekiwania użytkownik może zakończyć uczenie i przejście do jego podsumowania. Będzie ono omówione niżej. W każdym obiegu pętli oczekiwania na posuw wykonywane jest próbkowanie sygnałów z czujników, a wyniki są zapamiętywane w pamięci wraz ze zmiennymi logicznymi określającymi aktualny stan układu. Ponadto sygnały z przetwornika są filtrowane dolnoprzepustowo w celu ich wygładzenia i eliminacji przypadkowych, krótkotrwałych zakłóceń. Po nadejściu sygnału start posuwu (od obrabiarki), układ przechodzi do następnej pętli, wykonywanej w czasie trwania posuwu roboczego. Po jego zakończeniu (co jest sprawdzane na początku pętli) układ sprawdza, czy w jego trakcie wystąpiło skrawanie i w razie stwierdzenia, że skrawania nie było, przed przejściem do oczekiwania na następny zabieg wyświetla odpowiedni alarm. Taki brak skrawania może świadczyć o błędzie w programie obróbki lub zakłóceniach w działaniu czujnika. Do operatora należy właściwa interpretacja tego zjawiska.



Rys. 8.5. Uproszczony algorytm uczenia

Dalej następuje próbkowanie i zapamiętanie stanu układu, jak w czasie oczekiwania na posuw. Tym razem jednakże, od wartości filtrowanych odejmowane są wartości odpowiadające „zeru” sygnału, wyznaczone w trakcie tarowania. Przed ich wyznaczeniem, wartości te równają się zeru.

W czasie trwania posuwu roboczego użytkownik może opuścić Uczenie, w tym przypadku oznacza to rezygnację z uczenia i powrót do menu głównego. Następnie, o ile do tej pory nie wystąpiło tarowanie układu, jest ono przeprowadzane. Polega ono na sumowaniu wartości sygnałów w czasie 0,1 sekundy (odpowiednią liczbę obiegów pętli), a następnie wyznaczeniu wartości średniej, która jest przyjmowana z zerową wartością mierzonej wielkości. W trakcie tarowania układ nie wykonuje dalszych działań, które wykonywane są dopiero po jego zakończeniu.

Pierwszym z nich jest sprawdzenie, czy występuje skrawanie (wartości tarowanych sygnałów przekroczyły zadany próg), przy czym jeśli używany jest czujnik sił, spadek wartości sygnału poniżej progu uznawany jest za przerwę w skrawaniu. Jeśli układ uzna, że trwa skrawanie, układ na podstawie tarowanych i filtrowanych sygnałów wyznacza miary sygnałów zależnie od przyjętej strategii:

- 1) Dla strategii I układ sprawdza, czy ostatnio uzyskana wartość miary sygnałów jest większa od uzyskanych dotychczas. Jeśli tak, zapamiętuje nowe maksimum.
- 2) Dla strategii II układ sumuje wartości wybranej miary by w podsumowaniu uczenia wyznaczyć jej wartość średnią.
- 3) Dla strategii III układ sprawdza czy użytkownik wybrał punkty pomiarowe sygnału, a jeśli tak, sumuje wartości wybranej miary przez 0.5 sekundy, po czym wyznacza wartość średnią i wraz czasem skrawania odpowiadającym naciśnięciu zapamiętuje w odpowiedniej tablicy. Układ dba o to, by punkty wyznaczania miar były odległe od siebie o co najmniej 5 sekund czasu skrawania.

Po wyjściu z Uczenia, w czasie gdy układ oczekuje na kolejny zabieg, układ przechodzi do podsumowania, w trakcie którego:

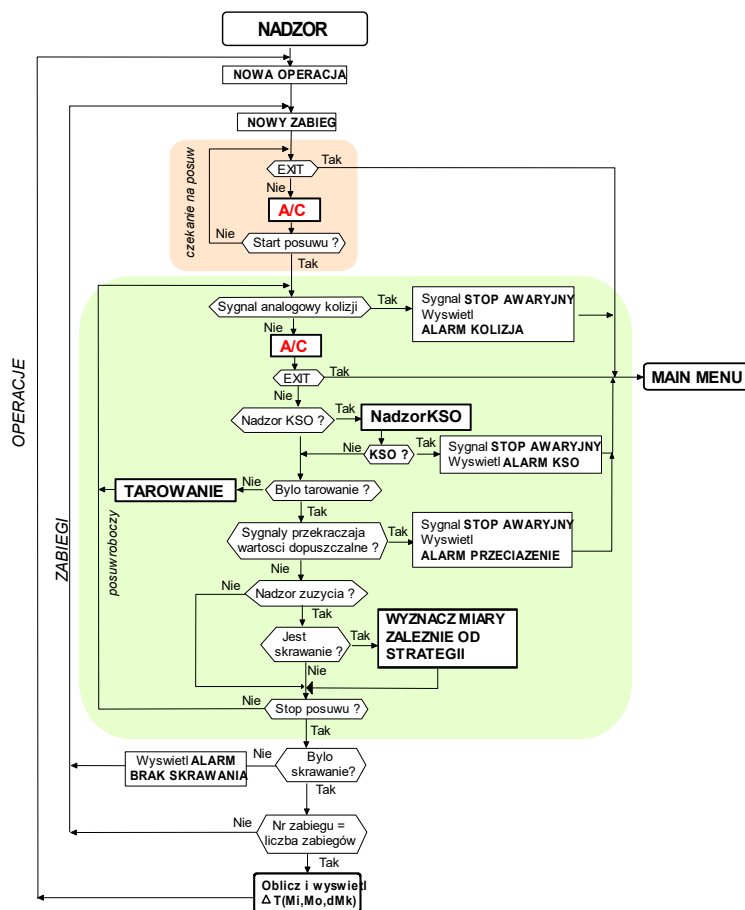
- a) zapamiętuje liczbę dotychczas wykonanych zabiegów, jeśli jest ona równa zeru, wyświetla odpowiedni komunikat i pozostaje nie nauczony,
- b) jeśli przy strategii III operator nie wybrał żadnego punktu, układ wyświetla odpowiedni komunikat i pozostaje nienauczony,
- c) jeśli nie wystąpiły wymienione wyżej nieprawidłowości, układ zapamiętuje uzyskane wartości miar (odpowiednio do wybranej strategii) jako odpowiadające ostremu narzędziu i wyświetla je.

Poprawne zakończenie uczenia warunkuje możliwość podjęcia nadzoru.

Każda operacja i każdy zabieg rozpoczyna się od inicjalizacji zmiennych i stałych występujących w programie. Zabieg, podobnie jak w uczeniu zaczyna się od oczekiwania na posuw roboczy. W jego trakcie można przerwać Nadzór (rys. 8.6).

Na początku pętli posuwu roboczego sprawdzana jest analogowa wartość sygnału i porównywana z dopuszczalną. Przekroczenie jej oznacza kolizję i wywo-

łuje natychmiastowy stop awaryjny obrabiarki i wyświetlenie odpowiedniego komunikatu. Dopiero po tym sprawdzeniu wykonywane jest próbkowanie, filtrowanie i odejmowanie wartości odniesienia – jak w uczeniu. Następnie sprawdzane są wartości dopuszczalne sygnałów (założone w ustawieniach). Z chwilą gdy zostaną przekroczone wyświetlany jest odpowiedni komunikat. Jeżeli w ustawieniach zadeklarowano nadzór zużycia następuje sprawdzenie czy zaczęło się skrawanie i wyznaczane są miary w zależności od przyjętej strategii.



Rys. 8.6. Uproszczony algorytm nadzoru

Po wyznaczeniu miar, jak i w przypadku gdy nie wybrano nadzoru zużycia, układ czeka na sygnał stop posuwu. Jeżeli nie otrzyma takiego sygnału, przechodzi na początek pętli posuwu roboczego. W przeciwnym razie sprawdza czy numer aktualnego zabiegu jest równy liczbie zabiegów (o liczbie zabiegów dowiaduje się w uczeniu). Jeżeli tak wyznaczana jest wartość wykorzystanej części okresu trwałości ostrza. Jeżeli nie, układ przechodzi na początek pętli operacji.

## 8.5. Ocena poprawności działania zaproponowanej strategii

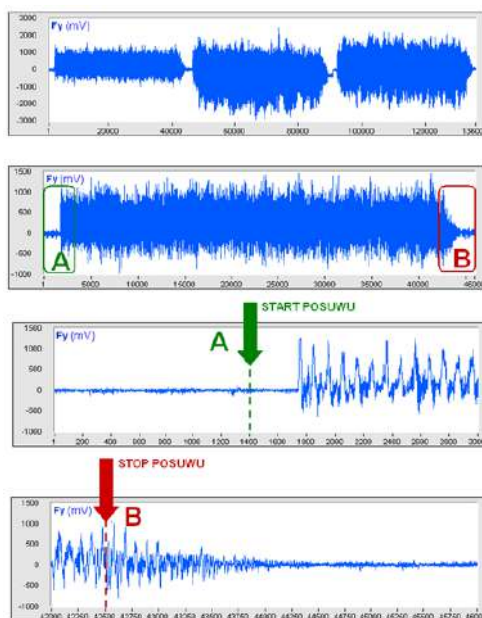
W celu zweryfikowania poprawności działania opracowanej strategii układu nadzoru stanu narzędzia, opracowano specjalny program komputerowy (w LabView) symulujący jego działanie na podstawie wyników pomiarów sygnałów sił zarejestrowanych w plikach.

Zgodnie z poczynionymi założeniami (rys. 8.4) opracowano koncepcję symulacji rzeczywistego układu nadzoru (rys. 8.7).



Rys. 8.7. Symulowany układ nadzoru stanu narzędzia

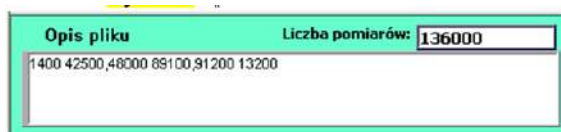
Sygnaly start-stop posuwu z układu sterowania obrabiarki zastępują numery punktów w opisach plików (nagłówkach). Sygnaly z czujników zastępują wyniki pomiarów sił skrawania.



Rys. 8.8. Metodyka przygotowania zapisanych sygnałów sił skrawania do testowanie programu

Do realizacji tego celu niezbędne było odpowiednie przygotowanie zapisanych sygnałów sił skrawania. Podczas badań rejestracja sygnałów sił skrawania przeprowadzana była osobno dla każdego kolejnego pomiaru. Należało zatem, połączyć poszczególne pomiary (z każdej operacji) i opisać plik tak, aby program odczytywał informację o starciu i stopie posuwu roboczego (zamiast sygnału z układu sterowania obrabiarki). Na rysunku 8.8 pokazano metodykę postępowania przy sporządzaniu zapisów sygnałów sił skrawania, na przykładzie operacji składającej się z trzech zabiegów.

Informacja o starciu i stopie posuwu roboczego została podana w opisie pliku, z którego pobiera informację program. Przykładowy opis tak przygotowanego pliku przedstawiono na rys. 8.9.



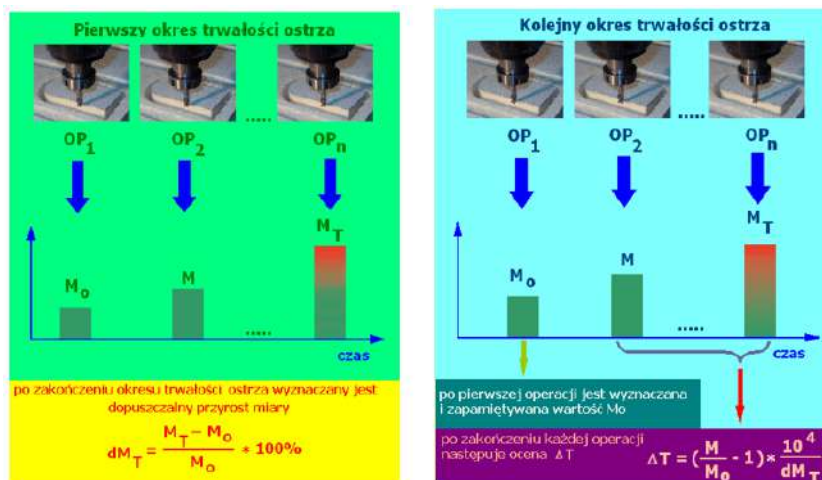
Rys. 8.9. Opis pliku służącego do testowania programu

W ramach testowania *Uczenie i Nadzór* przeprowadzano wykorzystując w tym celu sygnały sił zarejestrowane podczas badań. *Uczenie* realizowano na przebiegach poszczególnych wartości miar sygnałów sił w czasie obróbki przedmiotu z próby K1 (do chwili zużycia odpowiadającego stopniemu  $VB_B = 0,2$  mm). Do testowania zastosowano następujące miary siły skrawania:

- wartość średnia odchylenia standardowego sygnału siły  $(F_x)_{dev}$  z całej operacji,
- wartość średnia odchylenia standardowego sygnału siły  $(F_y)_{dev}$  z całej operacji,
- wartość amplitudy sygnału siły  $(F_x)$  w dziedzinie częstotliwości z całej operacji,
- wartość amplitudy sygnału siły  $(F_y)$  w dziedzinie częstotliwości z całej operacji.

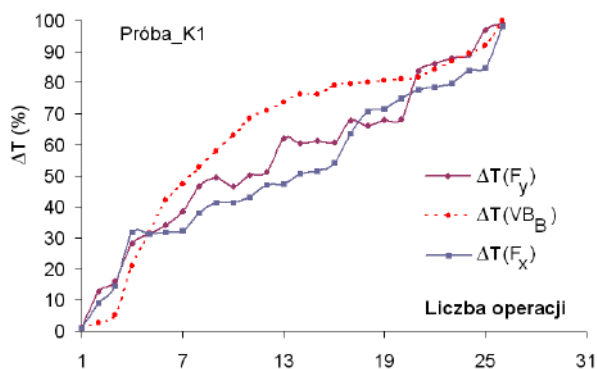
Dla poszczególnych miar (w trakcie uczenia) wyznaczone zostały dopuszczalne procentowe przyrosty sygnału ( $dM_T$ ), które posłużyły do prowadzenia nadzoru na próbach K2, K3, K4 i K5.

W trakcie obróbki wykonywanej nowym ostrzem zapamiętywana była miara początkowa  $M_0$  dla pierwszej operacji (rys. 8.10). Następnie realizowano kolejne operacje ( $OP_1, OP_2 \dots OP_n$ ) do momentu uzyskania wartości przyjętego wskaźnika zużycia  $VB_B$ . Po zakończeniu okresu trwałości ostrza wyznaczana jest wartość miary odpowiadającej ostrzu stopionemu –  $M_T$  oraz odpowiadający jej dopuszczalny przyrost miary  $dM_T$ .

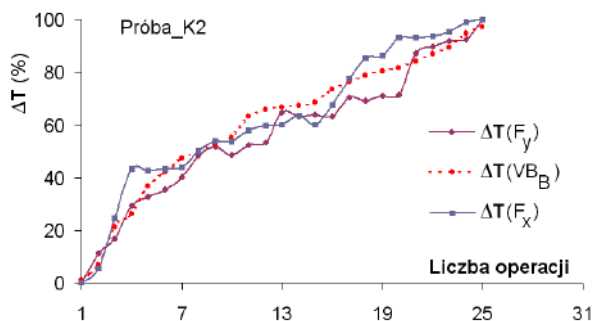


Rys. 8.10. Procedura Uczenia i Nadzoru

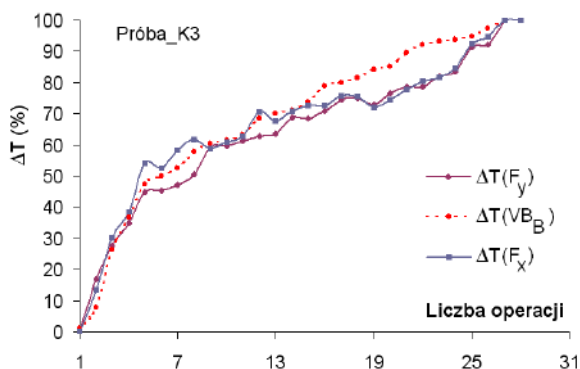
Na rysunkach 8.11-8.15 pokazano otrzymane wyniki dotyczące prowadzonego Uczenia na wartości przyjętych miar: wartość średnia odchylenia standardowego sygnału siły  $(F_x)_{dev}$  i  $(F_y)_{dev}$  z całej operacji. Próbą uczącą była próba K1. Następnie prowadzono nadzór na próbach K2-K5. Na przedstawionych wykresach zestawiono także wykorzystaną część okresu trwałości ostrza  $\Delta T$ , obliczoną jako stosunek aktualnej wartości zużycia ostrza  $(VB_B)$  do kryterium stępienia  $VB_B = 0,2 \text{ mm} - \Delta T(VB_B)$



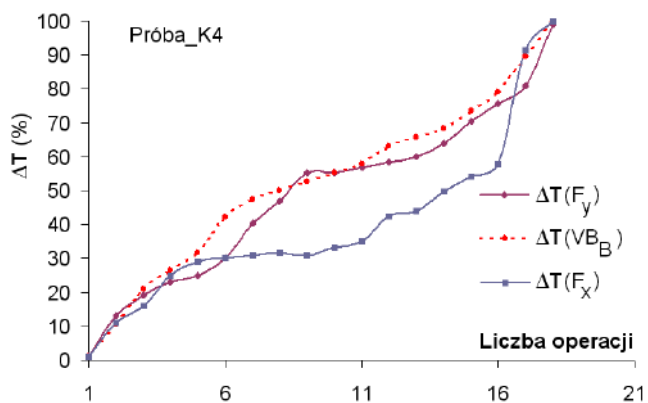
Rys. 8.11. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie uczenia – próba K1



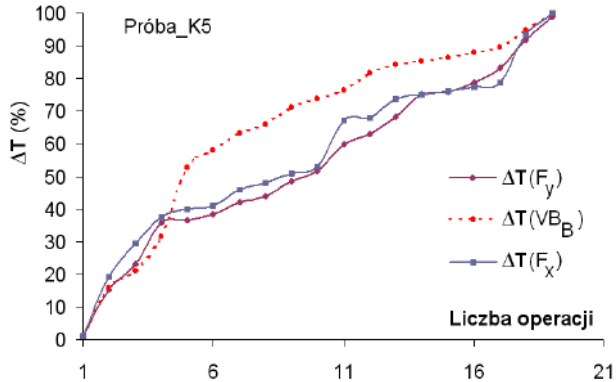
Rys. 8.12. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K2



Rys. 8.13. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K3



Rys. 8.14. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K4



Rys. 8.15. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbce K5

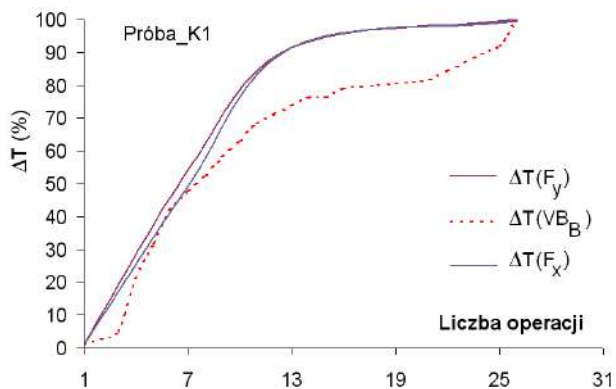
Przy prowadzonym nadzorze (dla przyjętych miar) charakterystyczna jest znaczna dynamika wzrostu wskaźników układu dla całego okresu trwałości ostrza. Jest to wynikiem wzrostu sygnałów sił w tym czasie. W ramach przeprowadzonego nadzoru (dla przyjętych miar) współczynnik  $\Delta T$  osiągnął założoną wartość graniczną (ok. 100% dla  $VB_B = 0,2$  mm).

Na podstawie przeprowadzonych badań poprawności działania opracowanej strategii można stwierdzić, że w przytoczonych przykładach najbardziej dokładne wyniki otrzymano, gdy nadzór prowadzono, wykorzystując w tym celu jedynie sygnał siły  $F_y$ .

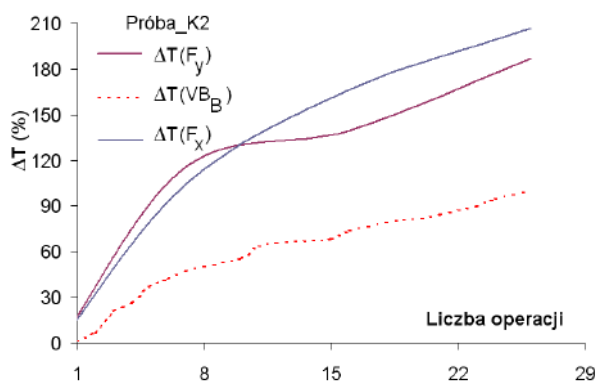
Przedstawione wyniki wskazują na poprawność i przydatność przyjętej strategii nadzoru zużycia ostrza. Podawanie przez układ wykorzystanej części okresu trwałości ostrza znacznie ułatwia operatorowi ocenę tego zużycia, w stosunku do układów tradycyjnych, w których wyświetlana jest jedynie wartość mierzonego sygnału (miary sygnału siły).

Na rysunkach 8.16-8.20 zaprezentowano otrzymane wyniki dotyczące prowadzonego uczenia na wartości sygnałów sił  $F_x$  i  $F_y$  w dziedzinie częstotliwości z całej operacji dla próby uczącej K1 i prowadzonego nadzoru na próbach K2-K5. Na przedstawionych wykresach zestawiono także wykorzystaną część okresu trwałości ostrza  $\Delta T$ , obliczoną jako stosunek aktualnej wartości zużycia ostrza ( $VB_B$ ) do kryterium stopienia  $VB_B = 0,2$  mm –  $\Delta T(VB_C)$ .

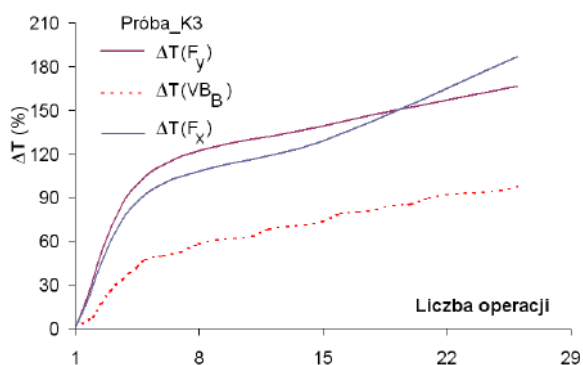
Bardzo istotne jest jednak to, że błędy wskazania zużycia ostrza z definicji maleją do zera ( $M_K$  określone jest dla  $t = T$ ,  $\Delta T = 100\%$ ), gdy ostrze osiągnie koniec okresu trwałości. Stopień ostrza zatem wykrywane winno być prawidłowo, nawet jeśli ocena wykorzystanej części okresu trwałości ostrza w jego trakcie jest obciążona błędami.



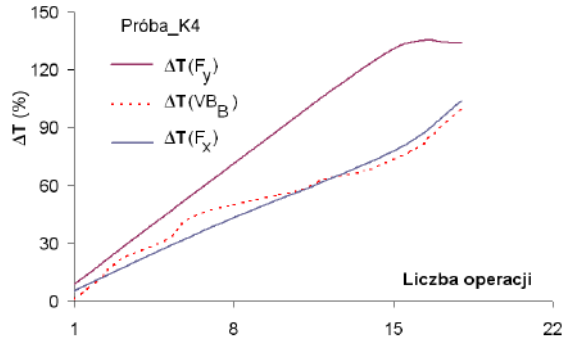
Rys. 8.16. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbce K1



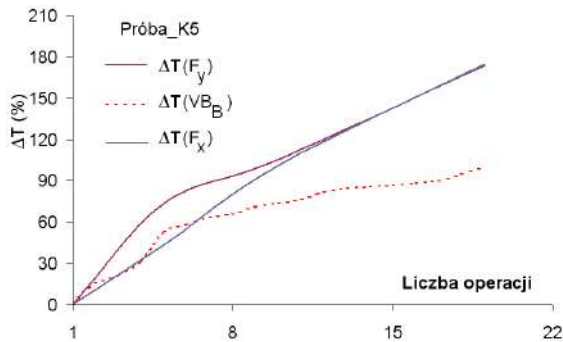
Rys. 8.17. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbce K2



Rys. 8.18. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbce K3



Rys. 8.19. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K4



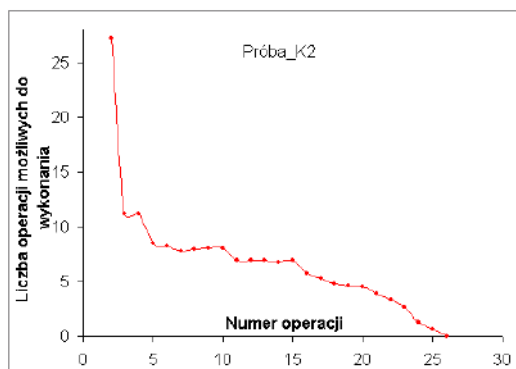
Rys. 8.20. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K5

Na podstawie przeprowadzonego Nadzoru (dla przyjętych miar) charakterystyczna jest wyraźna dynamika wzrostu wskazań układu dla całego okresu trwałości ostrza. Jest to wynikiem wzrostu sygnałów siły w tym czasie. W ramach przeprowadzonego Nadzoru (dla przyjętych miar) współczynnik  $\Delta T$  przekroczył założoną wartość graniczną (ok. 100% dla  $V_{B_B} = 0,2$  mm) dla większości prób. Można wnioskować, że przyjęty w strategii względny przyrost miary sygnału nie sprawdził się w tym przypadku. Spowodowane to jest tym, że wymiana narzędzia (na nowe) w kolejnych próbach trwałościowych prowadzi do zmiany wartości amplitudy zarówno początkowej jak i końcowej dla określonej częstotliwości (obserwowanej). Ponadto, warte rozważenia wydaje się być podawanie nie wykorzystanej części okresu trwałości, lecz liczby możliwych do wykonania operacji, którą można wyznaczyć z zależności korzystając ze wzoru (8.6):

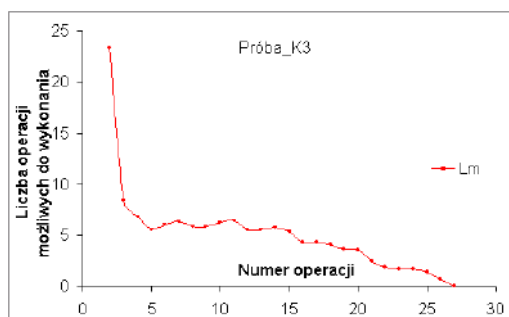
$$L_m = L_w \left( \frac{100}{\Delta T} - 1 \right) \quad (8.6)$$

gdzie:  $L_m$  – liczba operacji możliwych do wykonania,  $L_w$  – liczba wykonanych operacji.

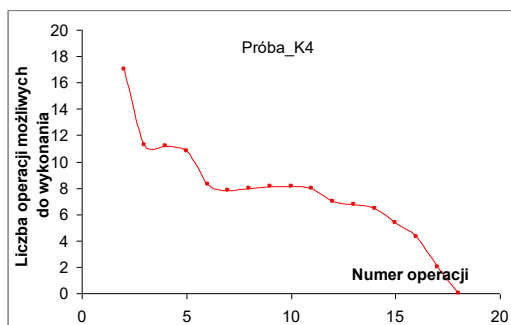
Wskazania układu w przedstawionych próbach (dla miary – odchylenie standardowe sygnału  $F_y$  wyglądałyby wtedy jak na rys. 8.21-8.24.



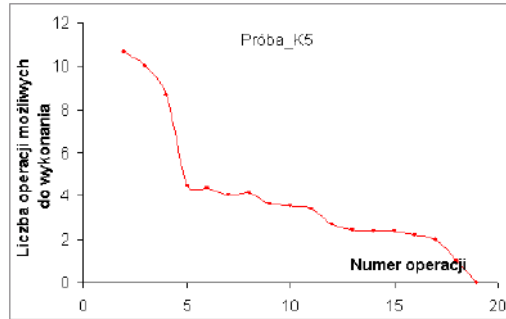
Rys. 8.21. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K2



Rys. 8.22. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K3



Rys. 8.23. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K4



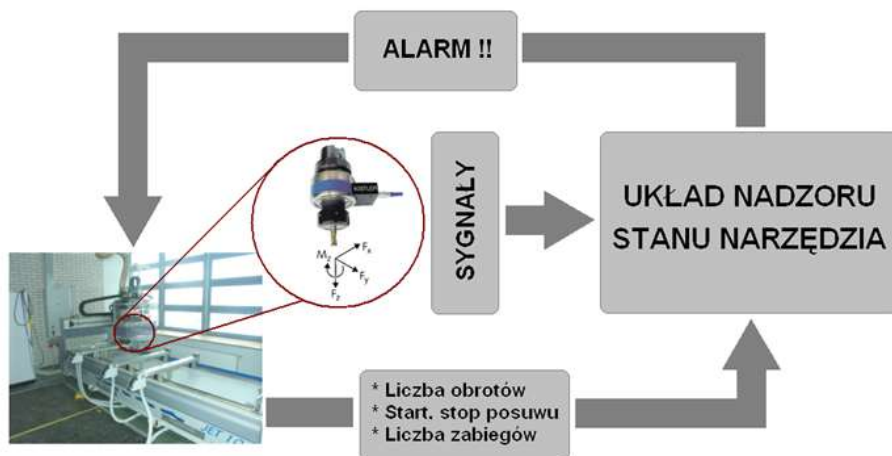
Rys. 8.24. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K5

Układ nadzoru stanu narzędzia powinien posiadać możliwość zarówno sygnalizacji stanów awaryjnych, jak i reagowania na nie. W czasie nadzoru zużycia, gdy wykorzystana część okresu trwałości ostrza osiągnie wartość 100%, sygnalizowane jest stopień ostrza. Układ może wysłać informację do układu sterowania obrabiarki o potrzebie wymiany narzędzia po aktualnie wykonywanej operacji. Przy nadzorze KSO warunkiem koniecznym poprawności funkcjonowania układu jest natychmiastowa reakcja. Powinno być to:

- 1) zatrzymanie posuwu roboczego,
- 2) wycofanie narzędzia,
- 3) zatrzymanie obrotów wrzeciona.

Układ nadzoru potrzebuje informacji o starciu i stopie posuwu roboczego, liczbie obrotów narzędzia skrawającego, liczbę zabiegów przelicza z informacji „start-stop” posuwu.

Należy pamiętać, że układu nadzoru i układ sterowania obrabiarki muszą być przystosowane do wzajemnej współpracy. Dotyczy to, zarówno instalacji czujnika siły skrawania, jak i połączeń elektrycznych do przekazywania informacji. Przyłączenie układu nadzoru do obrabiarki polegałoby na podłączeniu czujnika i wtyku RS232. W układzie sterowania obrabiarki można również przewidzieć możliwość programowania dodatkowego wyjścia i wejścia jako sygnałów wymiany informacji. Bardziej zaawansowane rozwiązanie polegałoby na połączeniu układu ze sterownikiem PLC obrabiarki poprzez szynę danych lub kabel szeregowy. Ogólną koncepcję konfiguracji układu nadzoru przedstawiono na rys. 8.25.



Rys. 8.25. Konfiguracja układu

## 8.6. Wirtualny układ diagnostyki stanu narzędzia

Do stworzenia wirtualnego układu nadzoru postanowiono zastosować strategię opisaną wcześniej. W komercyjnych układach nadzoru stanu narzędzia wykorzystywane są najczęściej sygnały pochodzące z czujników siły skrawania, drgań lub emisji akustycznej. Na ich podstawie, przy pomocy różnych metod, dokonuje się diagnozy zużycia ostrza.

Konwencjonalne układy automatycznej diagnostyki stanu narzędzia składają się z odpowiednich czujników, odpowiadających im układów wstępnej obróbki sygnału (przedwzmacniaczy) oraz jednostki centralnej (właściwego układu nadzorującego), mogącej współpracować z różnymi czujnikami. Mimo znacznej uniwersalności takich układów, wszystkie ich funkcje, charakterystyki możliwości, algorytmy działania są określane w momencie budowy i trudne lub niemożliwe do późniejszej zmiany. Ponadto wykonanie każdego kolejnego egzemplarza wymaga niemal tych samych nakładów do pierwszego.

Alternatywnym, nowoczesnym rozwiązaniem jest zastosowanie tzw. wirtualnego układu nadzorującego (WUN), będącego programem zainstalowanym w komputerze lub układzie sterującym obrabiarki. Sygnały pomiarowe z przetworników są przez uniwersalną kartę A/D przetwarzane w komputerze na postać cyfrową, a dalej obrabiane przez program WUN. Zaletą takiego rozwiązania jest otwartość architektury układu, co stwarza jego ogromną elastyczność, możliwość szybkiej wymiany i modernizacji stosowanych algorytmów nadzorowania oraz znacznie niższe koszty realizacji stanowiska, które może być wykorzystywane także do całkiem innych celów (innych przyrządów pomiarowo-kontrolnych).

Od wielu lat prowadzone są na Wydziale Technologiczno-Mechanicznym PRz badania sygnałów emisji akustycznej, drgań i sił skrawania pochodzących ze strefy skrawania, zmierzające do ich zastosowania w diagnostyce stanu narzędzia.

Zdobyto zatem duże doświadczenie zarówno w badaniu sygnałów, jak i budowie strategii działania układów nadzorujących. Głównym celem tych badań było stworzenie podstaw pod budowę wirtualnego układu nadzoru stanu narzędzia, wyposażonego w szereg wymiennych (alternatywnych) strategii działania oraz wypróbowanie jego działania w oparciu o sygnały pochodzące z czujników sił skrawania. Wykorzystano tutaj zarówno analizy literatury wykonane w innych pracach i przedstawiane we własnych publikacjach jak i wyniki własnych wcześniejszych prac. Pozwoliło to na instalację układu nadzoru w układzie sterowania obrabiarki w postaci całkowicie uniwersalnej, seryjnej karty wyposażonej w stworzone tu oprogramowanie.

## 8.7. Weryfikacja poprawności działania układu w warunkach laboratoryjnych

Sprawdzenie poprawności działania opracowanego programu przeprowadzono, opierając się na sygnałach pochodzących z rzeczywistych, przemysłowych czujników siły skrawania. Zaprezentowano skuteczność opracowanej strategii. Miary sygnałów nie były wyznaczane innymi programami i podawane jako wejścia do układu diagnostycznego (tak czyni się w bardzo wielu pracach rozpoznawczych), lecz określane przez sam program, a niedostępne z zewnątrz. Analiza działania układu przeprowadzona została podczas obróbki online. W trakcie wykonywania poszczególnych operacji sygnały sił skrawania i informacje pochodzące od obrabiarki wchodziły bezpośrednio do komputera osobistego gdzie dalej zostały poddawane analizie.

Oczywiście można było wyposażać program w możliwość zapisywania tych miar w oddzielnym pliku, lecz nie uczyniono tego, jako że nie jest to potrzebne do jego działania.

W badaniach stosowano frez trzpieniowy:  $\phi 12 \times 51$  dwuostrzowy z ostrzami z węgliku spiekanego, firmy Dimar. Do badań użyto standardowej płyty wiórowej, produkowanej przez firmę Kronopol i powszechnie wykorzystywanej w polskim przemyśle meblarskim.

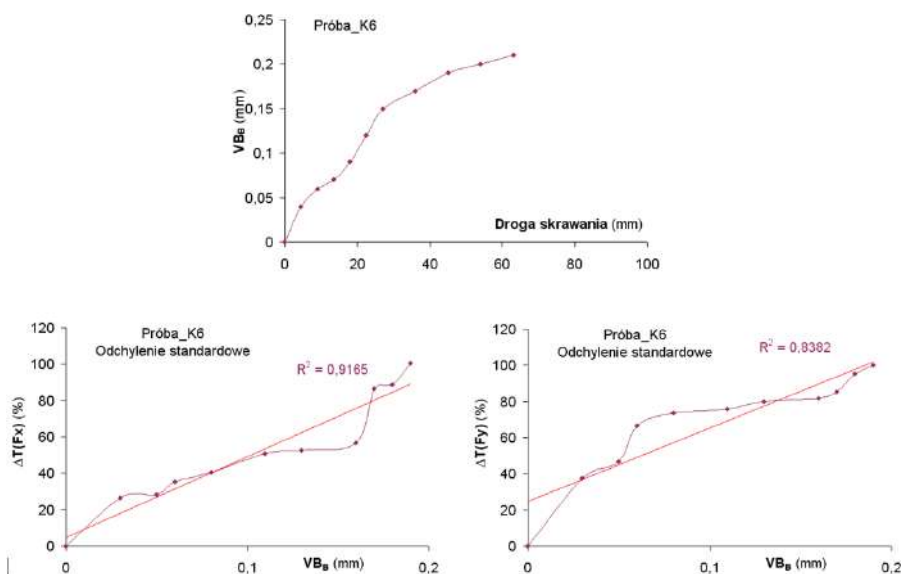
Próby trwałościowe przeprowadzone z wykorzystaniem czujnika przemysłowego oznaczono literą „K” (jak w poprzednich badaniach). W ramach badań wykonano trzy pełne próby trwałościowe „K”. Plan badań dla tych prób był zbliżony. W każdej z prób głębokość i szerokość frezowania były stałe i wynosiły odpowiednio:  $a_p = 18$  mm,  $a_e = 12$  mm. Jako wskaźnik zużycia ostrza brano pod uwagę starcie ostrza na powierzchni przyłożenia –  $VB_B$ . Jako kryterium stępienia przyjęto  $VB_B = 0,2$  mm.

Jak wspomniano, wykonano cztery pełne testy, w których ostrza wykonywały identyczne operacje od początku do stępienia. Ostatnią z nich (K9) wykorzystano do uczenia układu, tzn. przebieg pierwszej wykonanej operacji posłużył do uczenia układu przebiegu operacji oraz wartości sygnałów odpowiadających

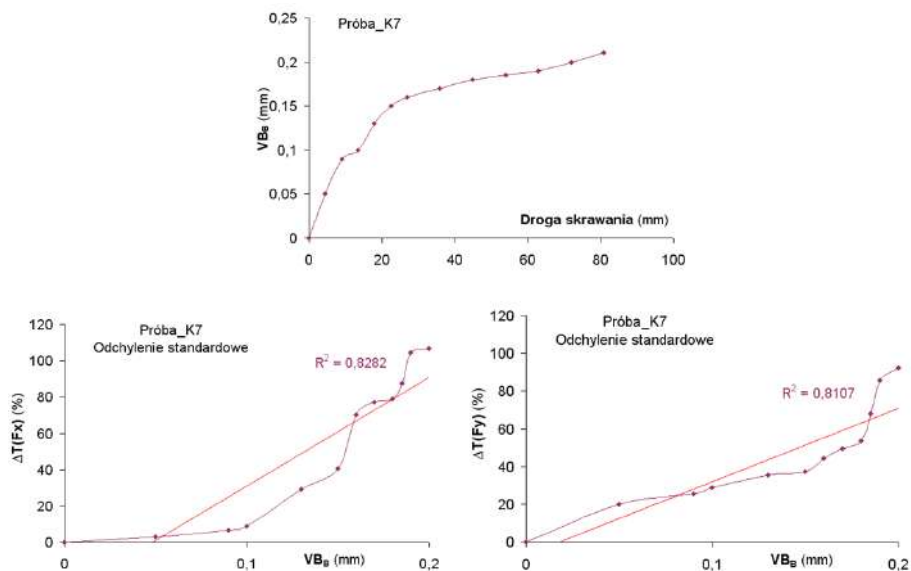
ostremu narzędziu. Po wykonaniu dziesięciu operacji ostrze osiągnęło wartość zużycia  $VB_B = 0,195$  mm, a więc tę operację uznano za odpowiadającą stopniowi ostrza (kryterium stopienia  $VB_B = 0,2$  mm). Następnie przeprowadzono nadzór nad pozostałymi próbami trwałościowymi (K6, K7 i K8).

Przy korzystaniu z czujnika sił skrawania, zastosowano strategię opartą na wartości średniej. Na rysunkach 8.26-8.28 przedstawiono wyniki nadzoru zużycia ostrza wykorzystujące tylko odchylenie standardowe sygnału siły na kierunku  $F_x$  i  $F_y$ . Charakterystyczne jest utrzymywanie się zaniżonych wskazań układu dla niskich wartości zużycia ostrza. Wynika ono ze słabego wzrostu zarówno sygnału siły  $F_x$  i  $F_y$  w tym okresie pracy ostrza. Tym niemniej, pod koniec trwałości ostrza, wskazania układu bardzo mocno nabierają dynamiki wzrostowej, aż do chwili założonej wartości wskaźnika stopienia ostrza.

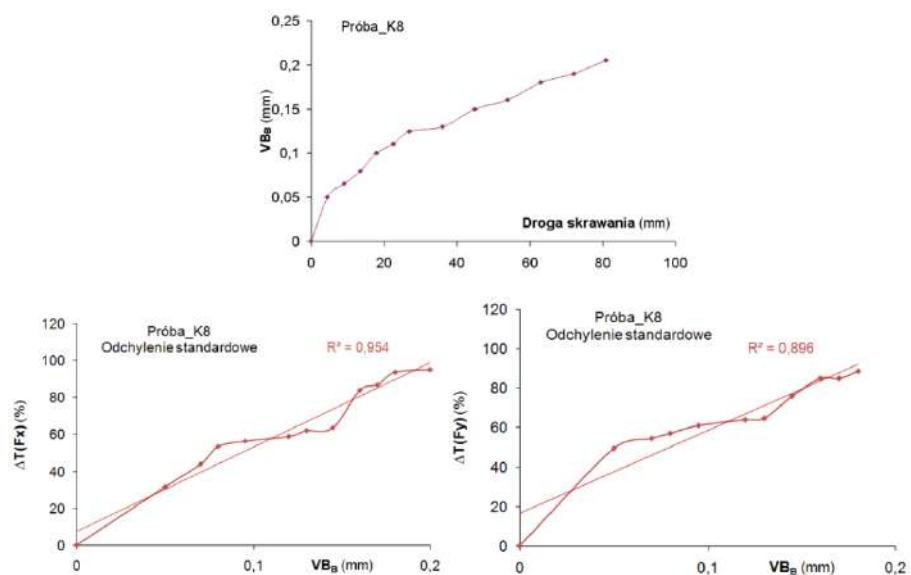
Podkreślić jednak należy, że dla takiej operacji, jaką zastosowano w badaniach, zalecaną strategią jest wartość średnia w całej operacji.



Rys. 8.26. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K6



Rys. 8.27. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbce K7



Rys. 8.28. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbce K8

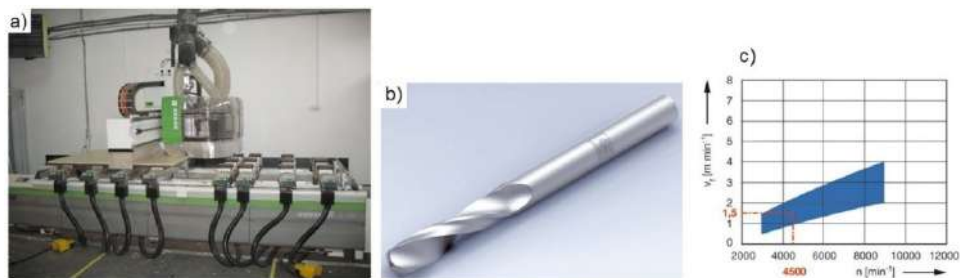
Przedstawione wyniki wskazują na poprawność i przydatność przyjętej strategii nadzoru zużycia ostrza. Wyświetlana informacja w postaci wykorzystanej części okresu trwałości ostrza znacznie ułatwia operatorowi ocenę tego zużycia,

w stosunku do układów dostępnych handlowo, w których podawana jest jedynie wartość mierzonego sygnału (miary sygnału).

## 8.8. Weryfikacja poprawności działania układu w warunkach produkcyjnych

Celem sprawdzenia poprawności działania opracowanej strategii w oparciu o sygnały pochodzące z rzeczywistych, przemysłowych czujników siły skrawania, momentu skrawania i przyspieszeń przeprowadzono badania w warunkach produkcyjnych (w firmie „STEL-MAZ” zajmującej się produkcją mebli pokojowych, biurowych, kuchennych), co czyni je bardziej miarodajnymi. Miary sygnałów nie były wyznaczane innymi programami i podawane jako wejścia do układu monitorującego proces (tak czyni się w bardzo wielu pracach rozpoznawczych), lecz określane przez sam program, a niedostępne z zewnątrz.

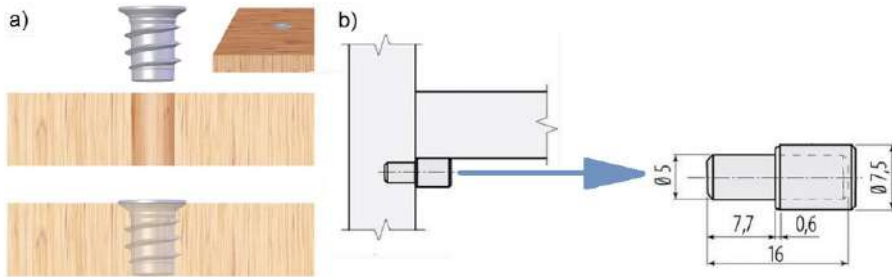
Badania prowadzono na centrum obróbczym CNC ROVER B4.35 – BIESSE (rys. 8.29a). Zastosowano dwa wiertła kręte o średnicy 5 mm, kącie wierzchołkowym  $120^\circ$ , dwustrzowe z węglika spiekane HW, firmy Leitz (rys. 8.29b), które mogą pracować z parametrami przedstawionymi na rys. 8.29c. Są to wiertła do uniwersalnego wiercenia otworów przelotowych i nieprzelotowych, przeznaczone do płyt wiórowych i pilśniowych. Pomiar wskaźnika zużycia narzędzi ( $VB_{\max}$ ) na zakończenie okresu trwałości ostrza przeprowadzono metodami wizyjnymi. Stawisko pomiarowe składało się z aparatu cyfrowego Canon EOS 40D o rozdzielczości matrycy CMOS 10,1 MPx (22,2 x 14,8 mm). Zastosowano również obiektyw Canon EF 100 mm f/2,8 Macro USM. Obrabiane detale oświetlano czterema lampami F&V 85/400 WATT o temperaturze barwowej 5500 K. Uzyskane w ten sposób obrazy cyfrowe analizowano następnie za pomocą własnego programu komputerowego utworzonego w środowisku LabVIEW.



Rys. 8.29. Centrum CNC Biesse Rover B4.35 (a), wiertło (b), parametry skrawania (c)

Ponieważ założeniem tego etapu badań była weryfikacja opracowanego algorytmu w warunkach przemysłowych, przedmiot obrabiany, parametry skrawania i inne elementy technologii nie były specjalnie dobierane, lecz przyjęte takie, jakie w danym momencie były realizowane w zakładzie produkcyjnym.

W ramach prowadzonych testów dotyczących naturalnego zużycia ostrza wiercono otwory o średnicy 5mm w przygotowanych wcześniej formatkach meblowych. W ramach realizowanej obróbki wykonywane otwory przelotowe i nieprzelotowe. Otwory te przeznaczone były pod kołki o średnicy 5 mm, które są powszechnie stosowane jako wsporniki półek (rys. 8.30b) oraz mufy meblowe (rys. 8.30a) o średnicy 5 mm, które są wkręcane w płytę meblową, tworząc gwint metryczny, do którego można przykręcić np. stopkę meblową lub regulator wysokości.



Rys. 8.30. Mufa meblowa (a), kołek podporowy (b)

Materiałem obrabianym była płyta wiórowa obustronnie laminowana. W badaniach zastosowano parametry:  $a_p = 5$  mm,  $v_f = 1,5$  m/min  $v_c = 71$  m/min.

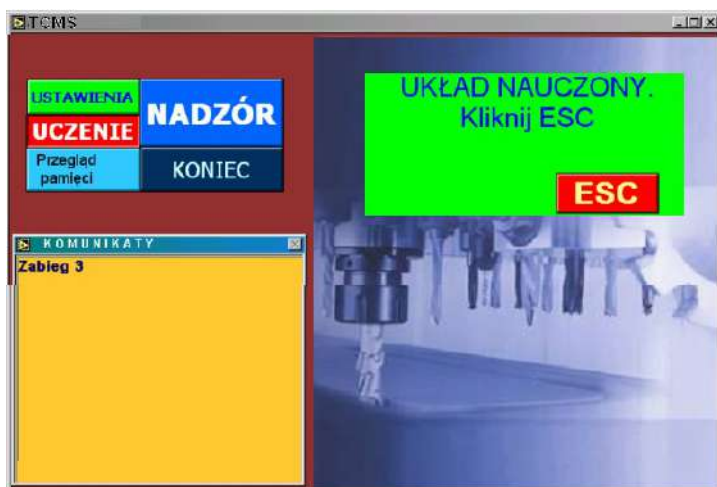
Wykonano dwa pełne testy, w których ostrza wykonywały opisane operacje od początku do stępienia. Pierwszy z nich P1 wykorzystano do uczenia układu, tzn. przebieg pierwszej wykonanej operacji posłużył do nauczenia układu przebiegu operacji oraz wartości sygnałów odpowiadających ostremu narzędziu. Po wykonaniu dwunastu operacji ostrze osiągnęło wartość zużycia  $VB = 0,31$  mm, a więc tę operację uznano za odpowiadającą stępieniu ostrza (kryterium stępienia  $VB_{max} = 0,30$  mm). Próbę kontynuowano, co doprowadziło do katastroficznego stępienia ostrza w czternastej operacji. Tak więc do badań układu wykorzystano jedynie przebiegi sygnału w pierwszej, dwunastej i czternastej operacji.

Do pomiaru sygnałów siły i momenty skrawania przy wierceniu zastosowano piezoelektryczny czujnik Kistler 9345B, który zamontowany na belce obrabiarki służącej do mocowania materiału obrabianego. Do pomiaru przyspieszenia stosowano czujnik Kistler 8763B, który zamocowano na przedmiocie obrabianym. W uchwycie czujnika umieszczano przygotowane wcześniej próbkach o wymiarach  $130 \times 30 \times 18$  mm, wycięte z płyty wiórowej, tej samej którą stosowano w produkcji.

Przed rozpoczęciem procesu produkcyjnego (dla nowego narzędzia) przeprowadzono procedurę uczenia układu monitorującego proces skrawania. Wywiercono 3 otwory w próbkach materiału zamocowanym w uchwycie czujnika. Pozwoliło to uzyskać informację o wartości miar sygnałów diagnostycznych odpowiadających ostremu narzędziu. Następnie wiercono otwory w płytach

meblowych. Realizacja otworów trwała do chwili, w której operator stwierdził, że narzędzie skrawające należy wymienić na nowe. Wówczas wywiercono 3 otwory w próbkach materiału zamocowanym w uchwycie czujnika, pozwoliło to na wyznaczenie wartości miar sygnałów odpowiadających narzędziu stępienemu. Na podstawie pomiarów sygnałów dla nowego i stępionego narzędzia układ monitorujący proces wyznaczył wartość dopuszczalnego przyrostu wartości miary. Wartość ta, wprowadzana automatycznie do układu monitorującego, pozwoli w procesie nadzoru określić procentowy przyrost wartości miary sygnału.

Układ monitorujący proces przyjmuje osiągnięty przyrost sygnałów za odpowiadający stępieniu ostrza, a aktualne wykorzystanie ostrza za 100%. Wygląd panelu czołowego pokazano na rys. 8.31.



Rys. 8.31. Panel programu po zakończeniu przez operatora uczenia

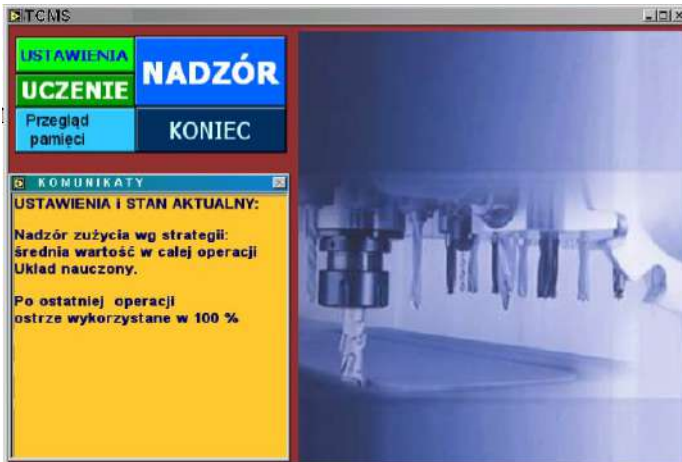
Pierwsze po uczeniu uruchomienie nadzoru powinno być wykonywane z wykorzystaniem ostrego narzędzia. Informuje o tym odpowiedni komunikat pokazujący się na panelu czołowym (rys. 8.32). Dzięki takiemu rozwiązaniu, układ może zapamiętać wartości sygnałów odpowiadające ostremu narzędziu. Tymczasem podkreślić należy ważną zasadę – raz uruchomiony nadzór trwa do chwili, gdy zostanie przerwany przez operatora. Oznacza to, że nie są potrzebne żadne ingerencje operatora w czasie wykonywania kolejnych operacji (obróbki kolejnych przedmiotów).

Po procesie uczenia układu rozpoczęto proces nadzoru. Podobnie jak w przypadku uczenia, nadzór rozpoczęto od pomiaru sygnałów diagnostycznych, które pozwoliły do określenia wartości miar sygnałów diagnostycznych odpowiadających ostremu narzędziu. Po wykonaniu 40 otworów w płytach meblowych wywiercono 3 otwory w próbkach materiału mocowanego w uchwycie czujnika. Wykonane pomiary sygnałów diagnostycznych posłużyły do wyznaczenia przez układ wartości wykorzystanej części okresu trwałości narzędzia.

Powtarzano tą procedurę (wiercenie czterdziestu otworów i pomiar) do chwili uzyskania wartości wykorzystanej części okresu trwałości narzędzia 100% (rys. 8.33). Jeśli operator uzna, że ostrze nie jest jeszcze stępione, ignoruje te komunikaty i pozwala na obróbkę kolejnych przedmiotów. Z drugiej strony, operator może uznać narzędzie za stępione i kliknąć ESC po zakończeniu operacji także wtedy, gdy podawane przez program wykorzystanie ostrza jest nawet znacznie mniejsze od 100%.

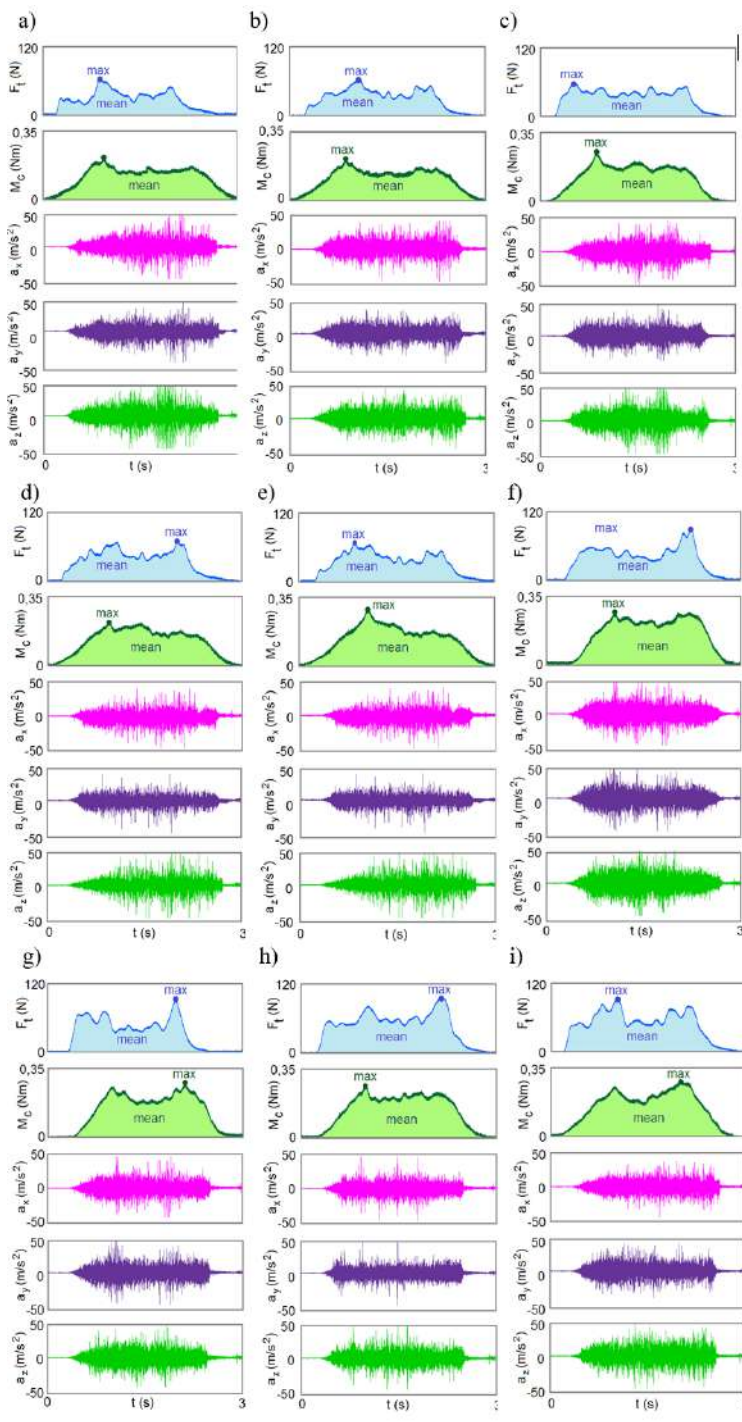


Rys. 8.32. Wygląd panelu czołowego przy pierwszym po uczeniu uruchomieniu nadzoru



Rys. 8.33. Wygląd panelu czołowego w trakcie nadzoru

Przebieg zużycia ostrza w czasie trwania drugiego testu był nadzorowany przez program. Przebiegi siły osiowej, momentu skrawania i przyśpieszenia uzyskane w pierwszej próbie trwałościowej narzędzia przedstawiono na rys. 8.34.



Rys. 8.34. Przebiegi analizowanych sygnałów zarejestrowane w próbie P2 trwałościowej narzędzia

W tabeli 8.1 oraz na rys. 8.35 i 8.36 zestawiono wyniki działania opracowanego algorytmu.

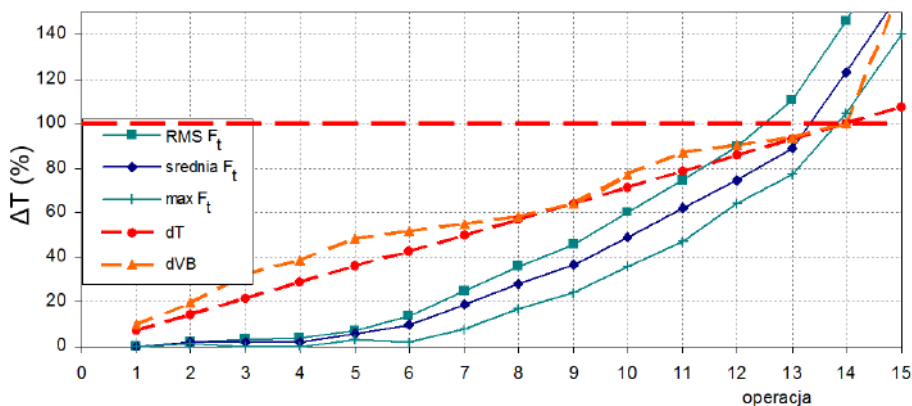
Tabela 8.1. Wyniki badań układu

oper	VB	dVB	dT	Fr			Hp		
				p-ty	śred.	max	ax	ay	az
1	0,03	10	7	0	0	0	0	0	0
2	0,06	19	14	2	2	1	5	0	0
3	0,10	32	21	3	2	0	5	0	0
4	0,12	39	29	4	2	0	5	0	0
5	0,15	48	36	7	6	3	10	6	0
6	0,16	52	43	14	10	2	20	12	14
7	0,17	55	50	25	19	8	39	24	33
8	0,18	58	57	36	28	17	54	42	48
9	0,20	65	64	46	37	24	64	48	57
10	0,24	77	71	60	49	36	79	65	76
11	0,27	87	79	75	62	47	93	77	86
12	0,28	90	86	90	75	64	<b>108</b>	85	<b>110</b>
13	0,29	94	93	<b>111</b>	89	77	133	95	124
<b>14</b>	<b>0,31</b>	<b>100</b>	<b>100</b>	146	<b>123</b>	<b>105</b>	157	<b>131</b>	148
15	0,50	161	107	188	160	140	177	149	171

dVB oznacza tu stosunek aktualnej wartości zużycia ostrza VB do maksymalnej uzyskanej wartości zużycia (0,22 mm)

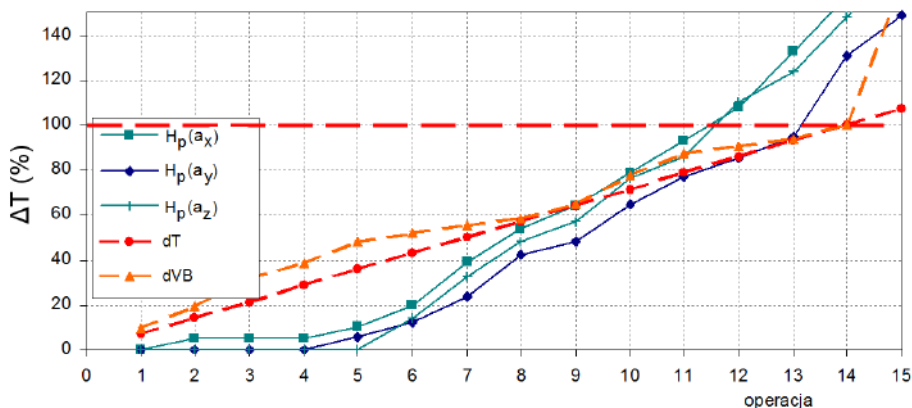
dT oznacza rzeczywistą wykorzystaną część okresu trwałości ostrza, czyli stosunek tego okresu co czasu skrawania, tu numeru operacji do liczby operacji do stopienia ostrza

W kolumnach Fr, Hp i a zawarto wykorzystane części okresu trwałości ostrza wyznaczone przez układ



Rys. 8.35. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem sygnał siły osiowej

Na rysunku 8.35 przedstawiono wyniki nadzoru zużycia ostrza wykorzystujące tylko siłę osiową  $F_t$ . Grubszymi, przerywanymi liniami oznaczono rzeczywisty przebieg wykorzystanej części okresu trwałości ostrza (stosunek czasu skrawania do tego okresu), będącą z natury rzeczy linią prostą oraz wykorzystaną część zużycia ostrza będącą inną miarą jego wykorzystania. Charakterystyczne jest utrzymywanie się zaniżonych wskazań układu dla niskich wartości zużycia ostrza. Wynika ono ze słabego wzrostu siły  $F_t$  w tym okresie pracy ostrza. Tym niemniej, pod koniec trwałości narzędzia, wskazania układu bardzo mocno zbliżają się do właściwych, a po stępieniu ostrza znacznie je przewyższają. Zauważmy, że tylko przy zastosowaniu strategii opartej na wartościach RMS siły, układ wskazał stępienie ostrza o jedną operację za wcześnie.



Rys. 8.36. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem sygnału przyspieszeń

Przy korzystaniu z entropii permutacji sygnałów przyspieszeń (rys. 8.36) wyniki okazały się nieco gorsze – tylko wartość entropii permutacji sygnału  $a_y$  dała poprawne wskazanie, pozostałe zaś dwie strategie wskazały stępienie ostrza o dwie

operacje za wcześnie. Podkreślić jednak należy, że dla takiej operacji, jaką zastosowano w badaniach, zalecaną strategią jest wartość średnia w całej operacji.

Oczywiści te nieliczne badania nie dowodzą słuszności wybranych strategii nadzoru zużycia ostrza. Tu zweryfikowano realizację tych strategii przez opracowany algorytm programu monitorującego proces skrawania.

## 8.9. Podsumowanie

W opracowanej strategii układ monitorowania zdobywa większość niezbędnych informacji (jak liczba zabiegów, czasy skrawania) bezpośrednio w trakcie obróbki pierwszego przedmiotu. Dzięki temu znacznie zredukowano ilość informacji koniecznych do wprowadzenia przez operatora. Opracowana strategia jest przystosowana do nadzorowania jednego narzędzia pracującego przemiennie z różnymi parametrami skrawania (wykonującego kolejne zabiegi). W praktyce operacja jest często wykonywana przez kilka narzędzi. Celowe zatem jest opracowanie rozbudowanej wersji strategii – przystosowanej obsługi kilku narzędzi.

Przydatność zaproponowanej strategii zależy od występowania korelacji między sygnałami sił skrawania a zużyciem ostrza. Nie ma przy tym znaczenia materiał obrabiany, materiał ostrza czy inne warunki skrawania. Strategia będzie skuteczna, jeśli zużyciu się ostrza towarzyszył będzie znaczący (najlepiej liniowy) przyrost sygnałów diagnostycznych. Opracowana strategia układu nadzoru jest przeznaczona do obróbki, w której wykorzystuje się kilka okresów trwałości ostrza. Przyjęcie uproszczonego, liniowego przebiegu miar sygnałów sił w funkcji czasu pociąga za sobą pewne błędy. Nie sposób jednak z góry przewidzieć jaką funkcją można opisać zależność miary od czasu. Pozostawiony zatem zostanie, jako pierwsze przybliżenie, uproszczony liniowy opis zależności miar od czasu skrawania. Nieliniowość przebiegu miary sygnału w funkcji zużycia ostrza w opracowanej strategii można z dużą dokładnością przewidzieć integrując otrzymane wyniki przy pomocy sztucznych sieci neuronowych. Rozwiązania takie nie znalazły jednak dotąd przemysłowego zastosowania.

## WNIOSKI

1. Instalacja przemysłowych czujników nie nastręcza większych trudności. Istotny jest jednak właściwy dobór miejsce instalacji (przy frezowaniu), od którego zależy wpływ trudnych do uniknięcia sprzężeń skrośnych. Zjawisko to można zminimalizować stosując platformę do pomiaru sił lub czujnik zintegrowany z uchwytem narzędzia. Jednak stosując takie rozwiązania, należy liczyć się ze stosunkowo wysokimi kosztami zakupu takich czujników.

2. W przypadku obu materiałów stosowanych na ostrza narzędzi skrawających (HSS i HW) ekonomiczną prędkość skrawania można uzyskać na centrum obróbczym CNC, a prędkość skrawania dla maksymalnej wydajności przekracza zakres prędkości obrabiarek CNC stosowanych przy wierceniu w kompozytach drewnopochodnych. W przypadku wiertła z węglikiem spiekany, trwałość narzędzia odpowiadająca najwyższej wydajności była ponad 20-krotnie mniejsza niż trwałość ekonomiczna  $T_e$ .

3. Zaobserwowano statystycznie istotny wpływ analizowanych czynników, np. zużycia narzędzia, prędkości skrawania i posuwu, na wartość sygnału siły  $F_x$  i  $F_x$  przy frezowaniu narzędziem z ostrzami z HW. Dla freza z ostrzami z HSS, w zakresie małych wartości zużycia, nie zaobserwowano widocznego wpływu zużycia narzędzia na wartość sygnałów siły  $F_x$  i  $F_y$ . Zwiększenie zużycia narzędzia ze stali szybko tnącej powyżej wartości 0,4 mm zwiększyło wpływ zużycia narzędzia na wartość obu analizowanych sygnałów siły. Największy wzrost wartości sygnału związany ze wzrostem zużycia powierzchni przyłożenia narzędzia zaobserwowano dla składowej siły  $F_y$ .

4. Zmniejszenie prędkości skrawania przy frezowaniu zwiększyło obszar rozwarstwienia, co doprowadziło do wzrostu wartości współczynnika  $A_{del}$ . Jest to szczególnie widoczne przy większych wartościach zużycia narzędzia. W przypadku posuwu na ostrze  $f_z$  nie zaobserwowano wyraźnego wpływu na zjawisko rozwarstwienia płyty wiórowej. Wniosek ten nie zgadza się z wynikami większości badań przeprowadzonych i opisanych przez innych autorów. Autorzy ci stwierdzili, że rozwarstwienie wzrasta wraz ze wzrostem wartości posuwu. Nie oznacza to jednak, że wpływ parametru  $f_z$  jest pomijalny, ponieważ w opisanych w niniejszej pracy badaniach wartość  $f_z$  była ograniczona do określonego zakresu wartości. Nie zaobserwowano statystycznie istotnego synergistycznego efektu analizowanych parametrów na wartość powierzchni rozwarstwienia.

5. Prędkość posuwu ma istotny wpływ na wartość siły osiowej  $F_t$  i momentu skrawania  $M_c$ . Wartość siły skrawania  $F_c$  przy wiercenia MDF zależy od wymiarów warstwy skrawającej, właściwości materiału obrabianego i kąta ścinania. Zarówno posuw, jak i prędkość skrawania mają wyraźny wpływ na kąt ścinania przy wierceniu. Wzrost wartości posuwu na ostrze powoduje wzrost kąta ścinania, a wzrost prędkości skrawania zmniejsza kąt ścinania.

6. W analizie wartości siły osiowej  $F_t$ , momentu skrawania  $M_c$  i parametru chropowatości powierzchni  $R_a$  przy wierceniu należy uwzględnić warstwową strukturę płyty MDF, która składa się z warstw o różnej gęstości i twardości.

7. Zaobserwowano dominujący wpływ zarówno posuwu na obrót  $f$ , jak i rodzaju powłoki narzędzia na siłę osiową  $F_t$ , moment skrawania  $M_c$  i temperaturę narzędzia skrawającego przy wierceniu płyty MDF. Najwyższe wartości momentu skrawania  $M_c$  i siły osiowej  $F_t$  zarejestrowane w eksperymentach uzyskano przy użyciu wiertła z powłoką TiAlN. Natomiast najniższe wartości  $M_c$  i  $F_t$  uzyskano przy użyciu wiertła niepowlekanego. Można tłumaczyć to zjawisko różnymi co do wartości współczynnikami tarcia między narzędziem a przedmiotem obrabianym wynikającymi z rodzaju powłoki wiertła. Powlekanie powierzchni wiertel charakteryzują się stosunkowo wyższym współczynnikiem tarcia niż powierzchnia niepowlekanego narzędzia z węglika spiekane. Dlatego powłoka zwiększa siłę tarcia między narzędziem a przedmiotem obrabianym, zgodnie z diagramem koła Marchanta. Wzrost siły tarcia powoduje wzrost oporu skrawania.

8. Uzyskane wyniki badań wskazują, że temperatura przy wierceniu rośnie wraz ze wzrostem prędkości skrawania  $v_c$ , ale maleje wraz ze wzrostem wartości posuwu na obrót  $f$ . Zmiany temperatury, w zależności od rodzaju powłoki, różnią się średnio o około 20%. Najwyższe wartości temperatury narzędzia zaobserwowano w przypadku wiertła pokrytego ZrN, a najniższe w przypadku wiertła niepokrytego. Podobnie, jak w przypadku Wynikać może to z faktu, że powłoka ZrN ma znacznie niższą wartość współczynnik przewodzenia ciepła w porównaniu z powłoką TiAlN i narzędziem niepokrytym. Powoduje to, że powłoka ZrN stanowi barierę dla odprowadzania ciepła ze strefy skrawania.

9. Posuw na obrót  $f$  i rodzaj zastosowanej powłoki wiertła miały istotny statystycznie wpływ na wartość parametru średniej chropowatości  $R_a$ . Zaobserwowano, że w zewnętrznych warstwach płyty wartość parametru  $R_a$  ma niższą wartość w porównaniu do zmierzonej w warstwie środkowej. Najniższą wartość średniego parametru chropowatości  $R_a$  zaobserwowano w przypadku obróbki wiertłem z powłoką ZrN, a najwyższą w przypadku obróbki wiertłem bez powłoki. Powiązane może to być niższą wartością współczynnika tarcia i niższą wartością współczynnika przewodności cieplnej powłoki ZrN w porównaniu z narzędziem niepokrytym. Niższa wartość zarówno współczynnika przewodności cieplnej, jak i współczynnika tarcia powoduje wzrost ciepła generowanego w obszarze styku narzędzia skrawającego z przedmiotem obrabianym. W przypadku płyty MDF znacznie poprawia to połączenie włókien drewna z klejem formaldehydowym. Powoduje to zagęszczenie wiązań między włóknami.

10. Z analizy przedstawionych wyników wynika, że zastosowana w badaniach sieć neuronowa RBF oraz logika rozmyta TSK doskonale nadają się do automatycznej oceny chropowatości powierzchni w oparciu o pomiary sygnałów przyspieszenia i parametrów kinematycznych przy frezowaniu płyt MDF. Pod względem implementacji metody te stanowią najłatwiejsze narzędzia do mapowa-

nia pomiarów i parametrów skrawania w przestrzeni wielowymiarowej. Sieć neuronowa nie wymaga szczególnych zabiegów w odniesieniu do danych wejściowych. Wystarczy określić miary sygnałów diagnostycznych i strukturę sieci, a następnie wytrenować ją w celu uzyskania oczekiwanego odwzorowania.

11. Aproksymacja zużycia na podstawie tych samych danych jest różna dla każdej z użytych sieci neuronowych i dla logiki rozmytej. W przypadku sieci wynika to z odmiennych funkcji aktywacji neuronów i struktur połączeń międzykomórkowych. Sieć FFBP, w stosunku do sieci radialnej RBF lepiej uogólnia dane, do tego stopnia, że bardzo dobrze odpowiada na wartości nawet spoza przedziału, na którym była uczona. Sieć RBF wymaga większej liczby wektorów uczących równomiernie rozłożonych w przestrzeni. Zaletą sieci RBF jest natomiast czas jej tworzenia – dużo krótszy niż w przypadku pełnego treningu sieci perceptronowej.

12. Tworząc bazę reguł wnioskowania dla układu rozmytego, konieczna jest staranna analiza przebiegów sygnałów diagnostycznych. Reguły układu rozmytego są proste, a ich konstrukcja polega na przeniesieniu, niemal „bezpośrednio”, obserwacji zmian pomiarów na język logiki rozmytej. Zarówno sieci RBF, jak i układ rozmyty dobrze reagują na zmienne wejściowe. Za pomocą fuzji tych dwóch narzędzi sztucznej inteligencji możliwe jest oszacowanie chropowatości powierzchni przedmiotu obrabianego z niewielkim błędem. Przy zastosowaniu sieci neuronowej RBF, RMSE oszacowania wartości parametru  $S_q$  wyniósł 0,379  $\mu\text{m}$ , podczas gdy błąd oszacowania oparty na logice rozmytej wyniósł 0,198  $\mu\text{m}$ . Wyniki eksperymentów potwierdzają skuteczność logiki rozmytej i stanowią satysfakcjonujące porównanie z innymi metodami sztucznej inteligencji. Błąd w ocenie parametru  $S_q$  wynika nie tyle z niedoskonałości narzędzi mapujących, co z rozproszenia pomiarów, spowodowanego głównie błędami pomiaru wartości parametru  $S_q$  oraz niejednorodnością materiału obrabianego przedmiotu. Zaletą sieci RBF jest jej czas uczenia – znacznie krótszy niż w przypadku uczenia wielowarstwowej sieci neuronowej perceptronu.

13. Identyfikacja materiału poddawanego obróbce w trakcie wiercenia możliwa jest na podstawie składowej siły skrawania  $F_c$ , momentu skrawania  $M_c$  oraz sygnałów przyspieszenia. Identyfikacja oparta jest na wartości jednostkowego oporu skrawania  $k_{c1,1}$  oraz na podstawie zmiany wartości entropii permutacji. Okazało się, że metoda ta jest niewrażliwa na kombinacje parametrów wiercenia zastosowane w badaniach. Proponowana metoda umożliwi wiarygodne wykrycie kontaktu narzędzia z materiałem przedmiotu obrabianego oraz identyfikację materiału przy wierceniu.

14. Identyfikacja materiału oparta na analizie STFT sygnałów przyspieszenia w określonych kierunkach X, Y i Z wykorzystuje ocenę dominujących amplitud częstotliwości w zależności od przetwarzanego materiału. Znajomość historii sygnału nie jest konieczna do identyfikacji przetwarzanego materiału.

15. Nie zaobserwowano wyraźnych różnic w rejestrowanych sygnałach wibroakustycznych w dziedzinie czasu od rodzaju obrabianego materiału. Jednak po

przetworzeniu sygnału do dziedziny częstotliwości można zauważyć charakterystyczne pasma częstotliwości o dominującej amplitudzie, zależne od obrabianego materiału. Zaproponowano metodologię, która może być wykorzystana jako inteligentna technika wspomagająca proces wiercenia, w celu wykrywania obrabianego materiału za pomocą danych z czujników zainstalowanych na obrabiarce.

16. Opracowano wirtualny układ monitorowania procesu skrawania wyposażony w szereg alternatywnych strategii nadzoru zużycia ostrza, a także możliwość wykrywania kolizji i przeciążenia, mogący współpracować z czujnikami sił i wielkości pochodnych oraz czujnikami do pomiaru przyspieszenia.

17. Opracowany układ monitorowania procesu skrawania przetestowano w oparciu o zarejestrowane wcześniej sygnały pochodzące z przemysłowych czujników do pomiaru siły i momentu skrawania oraz czujnika do pomiaru przyspieszenia. Wyniki tych testów wykazały właściwą realizację algorytmu i założonych strategii.

18. Wyniki testowania skuteczności działania wirtualnego układu monitorowania procesu skrawania w warunkach produkcyjnych dowodzą, że występuje duża łatwość obsługi układu od strony użytkownika. Ocena stanu narzędzia dokonana przez układ w trakcie prowadzonego nadzoru była zbieżna ze stanem faktycznym zużycia ostrza narzędzia. Miary sygnałów nie były wyznaczane innymi programami i podawane jako wejścia do układu monitorującego proces (tak czyni się w bardzo wielu pracach rozpoznawczych), lecz określane przez sam układ.

19. Zastąpienie bezpośrednich wartości miar sygnałów wykorzystaną częścią okresu trwałości ostrza (w procentach) pozwoliło na znaczne zbliżenie informacji podawanych przez układ monitorowania procesu skrawania do potrzeb użytkownika. Wydaje się celowe, by w następnych wersjach układu rozważyć możliwość podawania także spodziewanego wykorzystania ostrza po następnej operacji.

20. W opracowanym wirtualnym układzie zdobywa on większość niezbędnych informacji (jak liczba zabiegów, czasy skrawania) bezpośrednio w trakcie obróbki. Dzięki temu znacznie zredukowano ilość informacji koniecznych do wprowadzenia przez operatora. Wraz ze wspomnianą wyżej wykorzystaną częścią okresu trwałości ostrza uczyniło to zbudowany układ znacznie bardziej przyjaznym użytkownikowi niż układy znane dotychczas.

# LITERATURA

- [1] Kanayama K.: Deformation processing of wood-based materials and present situation and prospects, *Mokuzai Gakkaishi* 61(3), 2015, p. 136-140.
- [2] Haddouche M., Ilinca A.: Energy efficiency and industry 4.0 in wood industry: a review and comparison to other industries, *Energies* 15(7), 2022, p. 2384.
- [3] Müller F., Jaeger D., Hanewinkel M.: Digitization in wood supply—a review on how Industry 4.0 will change the forest value chain, *Comput Electron Agric* 162, 2019, p. 206–218.
- [4] Yang Y., Kang X.L., Yang Y.F., Ye H.R., Jiang J.X., Zheng G.Y., et al: Research progress in green preparation of advanced wood-based composites, *Adv Compos Hybrid Mater* 6(6), 2023, p. 202.
- [5] Lazarević A., Glavonjić B., Oblak L., Kalem M., Čomić D.: Analysis of operational efficiency of wooden chair manufacturing companies in Serbia using DEA, *Drvna Industrija* 73, 2022, p. 81–90.
- [6] Gogolewski P., Klimke J., Krell A., Beer P.: Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> tools towards effective machining of wood-based materials, *J Mater Process Technol* 209(5), 2009, p. 2231–2236.
- [7] Miyamoto K.: Importance of research on wood adhesion for wood-based materials, *Mokuzai Gakkaishi* 61(3), 2015p. 191–195.
- [8] Warcholinski B., Gilewicz A.: Surface Engineering of Woodworking Tools, a Review, *Appl Sci* 12, 2022, p. 10389.
- [9] Fischer A., Richter K., Emmenegger L., Künniger T.: PM10 emissions caused by the woodworking industry in Switzerland, *Holz Als Roh-und Werkstoff* 63, 2005, p. 245–25.
- [10] Pangestu K.T.P., Nandika D., Wahyudi I., Usuki H., Darmawan W.: Innovation of helical cutting tool edge for eco-friendly milling of wood-based materials, *Wood Mat Sci Eng* 17(6), 2022, p. 607–616.
- [11] Jiang G., Jianguo Z., Yanan P., Renke K., Yoshiharu N., Paul S., et al: A critical review on the chemical wear and wear suppression of diamond tools in diamond cutting of ferrous metals, *Int J Extreme Manuf* 2(1), 2020, p. 012001.
- [12] Li B.X., Zhang S., Du J., Sun Y.J.: State-of-the-art in cutting performance and surface integrity considering tool edge micro-geometry in metal cutting process, *J Manuf Process* 77, 2022, p. 380–411.
- [13] Porankiewicz B.: A method to evaluate the chemical properties of particleboard to anticipate and minimize cutting tool wear, *Wood Sci Technol* 37(1), 2003, p. 47–58.
- [14] Szwajka K., Trzepieciński T.: Effect of tool material on tool wear and delamination during machining of particleboard, *J Wood Sci* 62(4), 2016, p. 305–315.

- [15] Teng Y., Ding J., Wang B., Guo X., Cao P.: Cutting forces and chip morphology in medium density fiberboard orthogonal cutting, *BioResources* 9(4), 2014, p. 5845–5857.
- [16] Costa D., Serra J., Quinteiro P., Dias A.C.: Life cycle assessment of wood-based panels: A review, *J. Clean. Prod* (444), 2024, p. 140955.
- [17] Kristak L., Kubovský I., Réh R.: New Challenges in Wood and Wood-Based Materials, *Polymers* (13), 2021, p. 2538.
- [18] Zhuang B., Cloutier A., Koubaa A.: Physical and Mechanical Properties of Oriented Strand Board Made from Eastern Canadian Softwood Species, *Forests* 13, 2022, p. 523.
- [19] Borysiuk P., Wilkowski J.: Selected properties and applications of particleboards, *Biul. Inf.* 1–2, 2015, p. 17–41.
- [20] Ayrilmis N., Buyuksari U., As N.: Bending strength and modulus of elasticity of wood-based panels at cold and moderate temperatures, *Cold Reg. Sci. Technol.* 63, 2010, p. 40–43.
- [21] Sydor M., Waszkiewicz K., Potok Z.: Influence of Drill Bit Wear on Screw Withdrawal Resistance in Pinewood, *Materials* 17, 2024, p. 5729.
- [22] Motyka M.: Titanium Alloys and Titanium-Based Matrix Composites, *Metals* 11, 2021, p. 1463.
- [23] Gisip J., Lemaster R., Saloni D.: Enhancing tool life through innovative process control in wood-based machining, *Wood Mater. Sci. Eng.* 19, 2024, p. 1–11.
- [24] Barlak M., Wilkowski J.: The lifetime of cemented carbide blades during wood-based panels milling, *Biul. Inf. OB-RPPD* 3–4, 2018, p. 118–128.
- [25] Trzepieciński T., Najm S.M., Lemu H.G.: Current Concepts for Cutting Metal-Based and Polymer-Based Composite Materials, *J. Compos. Sci.* 6, 2022 p. 150.
- [26] Chen Y.t., Tian J.h., Guo X.l., et al: Tool condition monitoring strategies from metal cutting: insights for optimizing wood-based material processing, *Eur. J. Wood Prod.* 83, 2025, p. 46.
- [27] Silva R.G., Baker K.J., Wilcox S.J., Reuben R.L.: The adaptability of a tool wear monitoring system under changing cutting conditions, *Mech. Syst. Signal Process.* 14, 2000, p. 287–298.
- [28] Jemielniak K., Urbański T., Kossakowska J., Bombiński S.: Tool condition monitoring based on numerous signal features, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 59, 2012, p. 73–81.
- [29] Wilkowski J., Wieloch G.: Durability of tool blades during wood processing—The concept of durability, durability period testing, factors influencing durability, *Biul. Inf.* 1–2, 2015, p. 63–78.
- [30] Jaworski J., Trzepieciński T.: Research on durability of turning tools made of low-alloy high-speed steels, *Kov. Mater. –Met. Mater.* 54, 2016, p. 17–25.
- [31] Sujová E., Vysloužilová D., Koleda P., Gajdzik B.: Research on the evaluation of the efficiency of production processes through the implementation of key performance indicators, *Manag. Syst. Prod. Eng.* 31, 2023, p. 404–410.

- [32] Chladil J., Sedlák J., Rybářová E.R., Kučera M., Dado M.: Cutting conditions and tool wear when machining wood-based materials, *BioRes* 14, 2019, p. 3495–3505.
- [33] Czarniak P., Szymanowski K., Kucharska B., Krawczyńska A., Sobiecki J.R., Kubacki J., Panjan P.: Modification of tools for wood based materials machining with TiAlN/a-CN coating, *Mater. Sci. Eng. B* 257, 2020, p. 114540.
- [34] Balyts'kyi O.I., Kolesnikov V.O., Elias J.: Study of the wear resistance of high-nitrogen steels under dry sliding friction, *Mater. Sci.* 48, 2013, p. 642–646.
- [35] Demir A., Cakiroglu E.O., Aydin I.: Effects of CNC Processing Parameters on Surface Quality of Wood-Based Panels Used in Furniture Industry, *Drv. Ind.* 73, 2022, p. 363–371.
- [36] Gurau L.: Testing the Processing-Induced Roughness of Sanded Wood Surfaces Separated from Wood Anatomical Structure, *Forests* 13, 2022, p. 331.
- [37] Novák V., Rousek M., Kopecký Z.: Assessment of wood surface quality obtained during high speed milling by use of non-contact method, *Drv. Ind.* 62, 2011, p. 103–115.
- [38] Barcik Š., Gašparík M.: Effect of tool and milling parameters on the size distribution of splinters of planed native and thermally modified beech wood, *BioResources* 9, 2014, p. 1346–1360.
- [39] Górski J.: The Review of New Scientific Developments in Drilling in Wood-Based Panels with Particular Emphasis on the Latest Research Trends in Drill Condition Monitoring, *Forests* 13(2), 2022, p. 242.
- [40] Kurek J., Antoniuk I., Świdorski B., Jegorowa A., Bukowski M.: Application of Siamese Networks to the Recognition of the Drill Wear State Based on Images of Drilled Holes, *Sensors* 20, 2020, p. 6978.
- [41] Bukowski M., Kurek J., Antoniuk I., Jegorowa A.: Decision Confidence Assessment in Multi-Class Classification, *Sensors* 21, 2021, p. 3834.
- [42] Świdorski B., Antoniuk I., Kurek J., Bukowski M., Górski J., Jegorowa A.: Tool condition monitoring for the chipboard drilling process using automatic, signal-based tool state evaluation, *BioResources* 17, 2022, p. 5349–5371.
- [43] Bedelea B., Ispas M., Răcășan S.: Optimizing Wood Composite Drilling with Artificial Neural Network and Response Surface Methodology, *Forests* 15, 2024, p. 1600.
- [44] Tiryaki S., Malkoçoğlu A., Özşahin Ş.: Artificial Neural Network Modeling to Predict Optimum Power Consumption in Wood Machining, *Wood Res. Pap. Rep. Announc.* 58, 2015, p. 109–125.
- [45] Jegorowa A., Kurek J., Antoniuk I., Krupa A., Wiczorek G., Świdorski B., Bukowski M., Kruk M.: Automatic Estimation of Drill Wear Based on Images of Holes Drilled in Melamine Faced Chipboard with Machine Learning Algorithms, *Forests* 14, 2023, p. 205.
- [46] Özşahin Ş., Singer H.: Prediction of noise emission in the machining of wood materials by means of an artificial neural network, *New Zealand J. For. Sci.* 52, 2022, p. 1–10.

- [47] Panda S.S., Singh A.K., Chakraborty D.D., Pal S.K.: Drill wear monitoring using back propagation neural network, *J. Mater. Process. Technol.* 172, 2006, p. 283–290.
- [48] Sydor M., Potok Z., Pędzik M., Hitka M., Rogoziński T.: The influence of feed rate during pilot hole drilling on screw withdrawal resistance in particleboard, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 82, 2024, p. 5–13.
- [49] Duntschew J., Eschelbacher S., Schluchter I., Möhring H.C.: Discrete wavelet transformation as a tool for analysing the borehole quality when drilling carbon fibre reinforced plastic aluminium stack material, *J. Mach. Eng.* 21, 2021, p. 78–88.
- [50] Jęgorowa A., Kurek J., Antoniuk I., Dołowa W., Bukowski M., Czarniak P.: Deep learning methods for drill wear classification based on images of holes drilled in melamine faced chipboard, *Wood Sci. Technol.* 55, 2021, p. 271–293.
- [51] Guo X., Zhu Z., Ekevad M., Bao X., Cao P.: The cutting performance of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> ceramic cutting tools in the milling plywood, *Adv Appl Ceram* 117(1), 2017, p. 16–22.
- [52] Kurokochi Y., Hasegawa W., Sato M.: The effects of wetting and scratching pretreatment of veneers on shear strength of binderless plywood made from sugi (Japanese cedar, *Cryptomeria japonica*), *J Wood Sci* 65(1), 2019, p. 15.
- [53] Durkovic M., Mladenovic G., Tanovic L., Danon G.: Impact of feed rate, milling depth and tool rake angle in peripheral milling of oak wood on the cutting force, *Maderas-Ciencia y Tecnologia* 20(1), 2018, p. 25–34.
- [54] Becker T.M., Trinkaus K.M., Buckley D.I.: Tool-related injuries among amateur and professional woodworkers, *J Occup Environ Med* 38, 1996, p. 1032–1035.
- [55] Bai Q., Yao Y., Chen S.: Research and development of polycrystalline diamond woodworking tools, *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials* 20(5-6), 2002, pp. 395-400.
- [56] Hao Z.P., Gao D., Fan Y.H., Han R.D.: New observations on tool wear mechanism in dry machining Inconel718, *Int J Mach Tools Manuf* 51, 2011, p. 973–979.
- [57] Kazlauskas D., Jankauskas V.: Woodworking tools: tribological problems and directions of solutions, *Proceedings of 9th International Scientific Conference on BALTRIB Dedicated to 100th Anniversary of Restitution of Lithuania*, 2017, p. 178–187.
- [58] Kuntoğlu M., Aslan A., Pimenov D.Y., Usca U.A., Salur E., Gupta M.K., et al: A review of indirect tool condition monitoring systems and decision-making methods in turning: critical analysis and trends, *Sensors* 21, 2021, p. 108.
- [59] Li H.Z., Zeng H., Chen X.Q.: An experimental study of tool wear and cutting force variation in the end milling of Inconel 718 with coated carbide inserts, *J Mater Process Technol* 180, 2006, p. 296–304.
- [60] Sz wajka K.: Laboratory versus industrial cutting force sensor in tool condition monitoring system, *Proceedings of 7th Symposium on Measurement Technology and Intelligent Instruments*, vol. 13, 2005, p. 377–380.

- 
- [61] Liu T.S., Zhu K.P., Wang G.: Micro-milling tool wear monitoring under variable cutting parameters and runout using fast cutting force coefficient identification method, *Int J Adv Manuf Tech* 111(11–12), 2020, p. 3175–3188.
- [62] Wang P., Chen G.W., Tong X.P., Piao Y.S.: Relationship between wood cutting-force and wood mechanics characters, *J Northeast for Univ* 30, 2002, p. 32–35.
- [63] Costes J.P., Ko P.L., Ji T., Decès-Petit C., Altintas Y.: Orthogonal cutting mechanics of maple: modeling a solid wood-cutting process, *J Wood Sci* 50(1), 2004, p. 28–34.
- [64] Huang Y., Liang S.Y.: Modeling of cutting forces under hard turning conditions considering tool wear effect, *J Manuf Sci Eng-Trans ASME* 127, 2005, p. 262–270.
- [65] Liu T.S., Wang Q., Wang W.S.: Micro-milling tool wear monitoring via nonlinear cutting force model, *Micromachines* 13(6), 2022, p. 943.
- [66] Abellan-Nebot J.V., Subiron F.R.: A review of machining monitoring systems based on artificial intelligence process models, *Int J Adv Manuf Technol* 47, 2010, p. 237–257.
- [67] Teti R., Jemielniak K., O'Donnell G., Dornfeld D.: Advanced monitoring of machining operations, *CIRP Ann*, 59, 2010, pp. 717-739.
- [68] Zhou Y., Liu C, Yu X., Liu B., Quan Y.: Tool wear mechanism, monitoring and remaining useful life (RUL) technology based on big data: a review, *SN Appl Sci*, 4, 2022, p. 232.
- [69] Korkmaz M.E., Gupta M.K., Li Z., Krolczyk G.M., Kuntoğlu M., Binali R., et al.: Indirect monitoring of machining characteristics via advanced sensor systems: a critical review, *Int J Adv Manuf Technol* 120, 2022, p. 7043-7078.
- [70] Qiang B.Y., Shi K.N., Liu N., Zhao P., Ren J.X.: Application of cutting power consumption in tool condition monitoring and wear prediction based on Gaussian process regression under variable cutting parameters, *Int J Adv Manuf Technol* 124, 2023, p. 37–50.
- [71] Shao H., Wang H.L., Zhao X.M.: A cutting power model for tool wear monitoring in milling, *Int J Mach Tools Manuf* 44, 2004, p. 1503–1509.
- [72] Zhuo R.J., Deng Z.H., Chen B., Liu G.Y., Bi S.H.: Overview on development of acoustic emission monitoring technology in sawing, *Int J Adv Manuf Technol* 116, 2021, p. 1411–1427.
- [73] Willberry J.O., Papaalias M., Fernando G.F.: Structural health monitoring using fibre optic acoustic emission sensors, *Sensors* 20(21), 2020, p. 6369.
- [74] Chockalingam P., Ervina E.M.N., Prabhu C.M.R.: Tool condition monitoring in turning using acoustic emission, *AIP Conf. Proc.* 2030, 2018, p. 020310.
- [75] Krishnan P.S., Rameshkumar K., Krishnakumar P.: Hidden Markov modelling of high-speed milling (HSM) process using acoustic emission (AE) signature for predicting tool conditions, *Advances in materials and manufacturing engineering, icamme*, 2019, p. 573–580.

- [76] Anahid M.J., Heydarnia H., Niknam S.A., Mehmanparast H.: Evaluating the sensitivity of acoustic emission signal features to the variation of cutting parameters in milling aluminum alloys: Part A: frequency domain analysis, *Proc Inst Mech Eng Part B J Eng Manuf* 235(10), 2020, p. 1558–1568.
- [77] Feng Y.B.: Research on tool condition monitoring method based on multi-source signal feature fusion, Xi'an University of Technology, Xi'an, 2021.
- [78] Mukhopadhyay C.K., Jayakumar T., Raj B., Venugopal S.: Statistical analysis of acoustic emission signals generated during turning of a metal matrix composite, *J Braz Soc Mech Sci Eng* 34(2), 2012, p. 145–154.
- [79] Ribeiro Filho L.M., de Oliveira J.A., Lauro C.H., Brandão L.C.: Monitoring of microturning process using acoustic emission signals, *J Braz Soc Mech Sci Eng* 41(6), 2019, p. 271.
- [80] Murase Y., Matsumoto K., Ohuchi T.: Acoustic emission and cutting resistance in cutting of solid wood, MDF and particleboard, *J Faculty Agric Kyushu Univ* 53, 2008, p. 485–490.
- [81] Cui D., Zhang D.H., Wu B.H., Luo M.: An investigation of temperature and heat partition on tool-chip interface in milling of difficult-to-machine materials, *Proceedings of 16th CIRP Conference on Modelling of Machining Operations*, 2017, p. 49–54.
- [82] Ajayi O.O., Abiola A., Ogbonnaya M., Michael A.: Development of thermomechanical model for the analysis of effects of friction and cutting speed on temperature distribution around AISI 316L during orthogonal machining, *Proceedings of 1st International Conference on Sustainable Materials Processing and Manufacturing*, 2017, p. 682–687.
- [83] Mishra R., Dubey V., Singh R.K., Sharma A.K., Katiyar J.K.: A novel conjugate heat transfer approach to determine the temperature distribution in single-point cutting tool under different conditions, *Proce Inst Mech Eng Part E-J Process Mech Eng* 55(1), 2022, p. 271–293.
- [84] Basti A., Obikawa T., Shinozuka J.: Tools with built-in thin film thermocouple sensors for monitoring cutting temperature, *Proceedings of 1st Tehran International Congress on Manufacturing Engineering*, 2005, p. 793–798.
- [85] Kim S.W., Lee C.M., Lee D.W., Kim J.S., Jung Y.H.: Evaluation of the thermal characteristics in high-speed ball-end milling, *J Mater Process Technol* 113, 2001, p. 406–409.
- [86] Liu Z.Q., Zhang S.J.: Development of a thermocouple sensor using tool coating and its substrate to measure metal turning temperatures, *Int J Mater Prod Technol* 46, 2013, p. 71–80.
- [87] Sato M., Ueda T., Tanaka H.: An experimental technique for the measurement of temperature on CBN tool face in end milling, *Int J Mach Tools Manuf* 47, 2007, p. 2071–2076.
- [88] Dessoly V., Melkote S.N., Lescalier C.: Modeling and verification of cutting tool temperatures in rotary tool turning of hardened steel, *Int J Mach Tools Manuf* 44, 2004, p. 1463–1470.

- [89] Cao K.W., Han J.H., Xu L., Shi T.L., Liao G.L., Liu Z.Y.: Real-time tool condition monitoring method based on in situ temperature measurement and artificial neural network in turning, *Front Mech Eng* 17, 2022b, p. 5.
- [90] Bagavathiappan S., Lahiri B.B., Saravanan T., Philip J., Jayakumar T.: Infrared thermography for condition monitoring—a review, *Infrared Phys Technol* 60, 2013, p. 35–55.
- [91] Wang R.C., Zhan X.B., Bai H.J., Dong E.Z., Cheng Z.H., Jia X.S.: A review of fault diagnosis methods for rotating machinery using infrared thermography, *Micromachines* 13, 2022, p. 1644.
- [92] Bombiński S., Kossakowska-Skajster J., Jemielniak K.: New developments and future prospects in commercial tool condition monitoring systems, *Measurement* 255, 2025, p. 118037.
- [93] Panda A., Sahoo A.K., Panigrahi I., Rout A.K.: Prediction models for on-line cutting tool and machined surface condition monitoring during hard turning considering vibration signal, *Mech Ind* 21, 2020, p. 520.
- [94] Swain S., Panigrahi I., Sahoo A.K., Panda A., Kumar R.: Effect of tool vibration on flank wear and surface roughness during high-speed machining of 1040 steel, *J Fail Anal Prev* 20, 2020b, p. 976–994.
- [95] Jia F., Lei Y.G., Lu N., Xing S.B.: Deep normalized convolutional neural network for imbalanced fault classification of machinery and its understanding via visualization, *Mech Syst Signal Process* 110, 2018, p. 349–367.
- [96] Szwajka K., Gorski J.: Evaluation tool condition of milling wood on the basis of vibration signal, *Proceedings of 4th International Symposium on Instrumentation Science and Technology*, 2006, p. 205–1209.
- [97] Kilundu B., Dehombreux P., Chiementin X.: Tool wear monitoring by machine learning techniques and singular spectrum analysis, *Mech Syst Signal Process* 25, 2011, p. 400–415.
- [98] Mohapatra S., Panda A., Kumar R., Sahoo A.K.: Recent Trends and Future Perspectives on Vibration Assisted Turning: A Brief Review, *IOP Confe Ser Mater Sci Eng* 653, 2019, p. 012037.
- [99] Zhang J.Z., Chen J.C.: Tool condition monitoring in an end-milling operation based on the vibration signal collected through a microcontroller-based data acquisition system, *Int J Adv Manuf Technol* 39, 2008, p. 118–128.
- [100] Prasad B.S., Sarcar M.M.M., Ben B.S.: Development of a system for monitoring tool condition using acousto-optic emission signal in face turning—an experimental approach, *Int J Adv Manuf Technol* 51, 2010, p. 57–67.
- [101] Prasad B.S., Sarcar M.M.M., Ben B.S.: Surface textural analysis using acousto optic emission- and vision-based 3D surface topography—a base for online tool condition monitoring in face turning, *Int J Adv Manuf Technol* 55, 2011, p. 1025–1035.
- [102] Swain S., Panigrahi I., Sahoo A.K., Panda A.: Adaptive tool condition monitoring system: a brief review, *Mater Today-Proc* 23, 2020a, p. 474–478.
- [103] Saljé E., Drückhammer J.: Qualitätskontrolle bei der Kantenbearbeitung, *Holz Als Roh-Und Werkst.* 42, 1984, p. 187–192.

- [104] Kowaluk G., Szymański W., Beer P.: Preliminary Identification of the Feed Speed Influence on Chosen Effects of Laminated Particleboard Drilling, *Drewno. Pr. Naukowe. Doniesienia. Komun.* 51, 2008, p. 55–62.
- [105] Fuchs I.: Maschinennaher Einsatz von Sensorsystemen, *Holz Als Roh-Und Werkst.* 50, 1992, p. 2–4.
- [106] Pałubicki B.: Badania nad Jakością Obróbki Elementów Meblowych z płyt Wiórowych Laminowanych Ph.D. Thesis, Ph.D. Thesis, WTD AR, Poznań, 2006.
- [107] Szymanowski K., Szymona K., Morek R., Górski J., Podziewski P., Cyrankowski M., Auriga R.: Influence of coatings on edge milling quality, *Ann. Wars. Univ. Life Sci.* 92, 2015, p. 444–447.
- [108] Górski J., Podziewski P., Borysiuk P.: The Machinability of Flat-Pressed, Single-Layer Wood-Plastic Particleboards while Drilling—Experimental Study of the Impact of the Type of Plastic Used, *Forests* 13, 2022, p. 584.
- [109] Chung-Chen T., Wen-Chou Ch.: Prediction of the location of delamination in the drilling of composite laminates, *Journal of Materials Processing Technology* 70(1), 1997, p. 185–189.
- [110] Davim J.P., Campos Rubio J., Abrão A.M.: A novel approach based on digital image analysis to evaluate, *Composites Science and Technology* 67(9), 2007, p. 1939–1945.
- [111] Davim J.P., Reis P.: Study of delamination in drilling carbon fiber reinforced plastics (CFRP) using design experiments, *Composite Structures* 59(4), 2003a, p. 481–487.
- [112] Davim J.P., Reis P.: Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study, *Materials & Design* 24(5), 2003b, p. 315–324.
- [113] Mehta M., Reinhart T.J., Soni A.H.: Effect of fastener hole drilling anomalies on structural integrity of PMR-15/gr composite laminates, *Proceedings of the Machining Composite Materials Symposium*, 1992.
- [114] Romoli L., Dini G.: Experimental study on the influence of drill wear in CFRP drilling process, *Proceedings of the 6th CIRP International Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering*, 2008.
- [115] Dias L.R.M., Diniz A.E.: Effect of the gray cast iron microstructure on milling tool life and cutting force, *J. Braz. Soc. Mech. Sci. Eng.* 35 (1) 2013, p. 17–29.
- [116] Su J.C., Huang C.K., Tarn Y.S.: An automated flank wear measurement of microdrills using machine vision, *J. Mater. Process. Technol.* 180(1-3), 2006, p. 328–335.
- [117] Zhu K., Yu X.: The monitoring of micro milling tool wear conditions by wear area estimation, *Mech. Syst. Signal Process.* 93, 2017, p. 80–91.
- [118] Jemielniak K.: Obróbka Skrawaniem—Podstawy, Dynamika, Diagnostyka, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2018.

- [119] Reddy C.K.K., Doss S., Pamulaparty L., Lippert K., Doshi R.: *Industry 6.0. Technology, Practices, Challenges, and Applications*, CRC Press: Boca Raton, 2024.
- [120] Kurek J., Kruk M., Osowski S., Hoser P., Wieczorek G., Jegorowa A., Górski J., Wilkowski J., Śmietańska K., Kossakowska J.: Developing automatic recognition system of drill wear in standard laminated chipboard drilling process, *Bull. Pol. Acad. Sci. Tech. Sci.* 64, 2016, p. 633–640.
- [121] Świdorski B., Kurek J., Osowski S., Kruk M., Jegorowa A.: Diagnostic System of Drill Condition in Laminated Chipboard Drilling Process, *MATEC Web Conf.* 125, 2017, p. 6.
- [122] Nasir V., Cool J.: Characterization, optimization, and acoustic emission monitoring of airborne dust emission during wood sawing, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 109, 2020, p. 2365–2375.
- [123] Lemaster R., Lu L., Jackson S.: The use of process monitoring techniques on a CNC wood router. Part 1. Sensor selection, *For. Prod. J.* 50, 2000, p. 31–64.
- [124] Sieradzki A., Bednarek J., Jegorowa A., Kurek J.: Explainable AI (XAI) Techniques for Convolutional Neural Network-Based Classification of Drilled Holes in Melamine Faced Chipboard, *Appl. Sci.* 14, 2024, p. 7462.
- [125] Ispas M., Gurău L., Răcășan S.: The influence of the tool point angle and feed rate on the delamination at drilling of pre-laminated particleboard, *Pro Ligno* 11, 2015, p. 494–500.
- [126] Bedeleian B., Ispas M., Răcășan S., Baba M.N.: Optimization of Wood Particleboard Drilling Operating Parameters by Means of the Artificial Neural Network Modeling Technique and Response Surface Methodology, *Forests* 13, 2022, p. 1045.
- [127] Ispas M., Gurău L., Răcășan S.: Study regarding the variation of the thrust force, drilling torque and surface delamination with the feed per tooth and drill tip angle at drilling pre-laminated particleboard, *Pro Ligno* 10, 2014, p. 40–52.
- [128] Kumar A.M., Jayakumar K.: Drilling studies on particle board composite using HSS twist drill and spade drill, *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 402, 2018, p. 012029.
- [129] Palanikumar K., Prakash S., Manoharan N.: Experimental Investigation and Analysis on Delamination in Drilling of Wood Composite Medium Density Fiber Boards, *Mater. Manuf. Process.* 24, 2009, p. 1341–1348.
- [130] Prakash S., Palanikumar K., Manoharan N.: Optimization of delamination factor in drilling medium-density fiberboards (MDF) using desirability-based approach, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 45, 2009, p. 370–381.
- [131] Gaitonde V.N., Karnik S.R., Davim J.P.: Taguchi multiple-performance characteristics optimization in drilling of medium density fibreboard (MDF) to minimize delamination using utility concept, *J. Mater. Process. Technol.* 196, 2008, p. 73–78.
- [132] Bedeleian B., Ispas M., Răcășan S.: Combining Artificial Neural Network and Response Surface Methodology to Optimize the Drilling Operating Parameters of MDF Panels, *Forests* 14, 2023, p. 2254.

- [133] Davim J.P., Clemente V.C., Silva S.: Drilling investigation of MDF (medium density fibreboard), *J. Mater. Process. Technol.* 203, 2008, p. 537–541.
- [134] Davim J.P., Gaitonde V.N., Karnik S.R.: An investigative study of delamination in drilling of medium density fibreboard (MDF) using response surface models, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 37, 2008, p. 49–57.
- [135] Davim J.P., Campos Rubio J., Abrão A.: Delamination assessment after drilling medium-density fibreboard (MDF) by digital image analysis, *Holzforschung* 61, 2007, p. 294–300.
- [136] Shirzaei S., Payam S.R.F., Shamsian M., Rahdar H.A., Ghalehno M.D.: Evaluation of delamination defect in drilling process of wood sandwich panels, *Iran. J. Wood Pap. Ind.* 15, 2024, 2024, p. 299–312.
- [137] Jegorowa A., Górski J., Kurek J., Kruk M.: Initial study on the use of support vector machine (SVM) in tool condition monitoring in chipboard drilling, *Eur. J. Wood Prod.* 77, 2019, p. 957–959.
- [138] Kurek J., Antoniuk I., Górski J., Jegorowa A., Świdorski B., Kruk M., Wieczorek G., Pach J., Orłowski A., Aleksiejuk-Gawron J.: Data Augmentation Techniques for Transfer Learning Improvement in Drill Wear Classification Using Convolutional Neural Network, *Mach. Graph. Vis.* 28, 2019, p. 3–12.
- [139] Russakovsky O., Deng J., Su H., Krause J., Satheesh S., Ma S., Huang Z., Karpathy A., Khosla A., Bernstein M., et al: Imagenet large scale visual recognition challenge, *Int. J. Comput. Vis.* 115, 2015, p. 211–252.
- [140] Krizhevsky A., Sutskever I., Hinton G.: Imagenet classification with deep convolutional neural networks, *Commun. ACM* 60, 2017, p. 84–90.
- [141] Kurek J., Antoniuk I., Górski J., Jegorowa A., Świdorski B., Kruk M., Wieczorek G., Pach J., Orłowski A., Aleksiejuk-Gawron J.: Classifiers ensemble of transfer learning for improved drill wear classification using convolutional neural network, *Mach. Graph. Vis.* 28, 2019, p. 13–23.
- [142] Szwajka K., Trzepieciński T.: An examination of the tool life and surface quality during drilling melamine faced chipboard, *Wood Res.* 62, 2017, p. 307–318.
- [143] Trzepieciński T., Szwajka K., Zielińska-Szwajka J., Szewczyk M.: Current Trends in Monitoring and Analysis of Tool Wear and Delamination in Wood-Based Panels Drilling, *Machines* 13(3), 2025, p. 249.
- [144] Arrighi L., Barbon Junior S., Pellegrino F.A., Simonato M., Zulich M.: Explainable Automated Anomaly Recognition in Failure Analysis: Is Deep Learning Doing it Correctly?, *World Conference on Explainable Artificial Intelligence; Communications in Computer and Information Science* 1902, 2023, p. 420–432.
- [145] Afonso C., Matta A., Matos L.M., Gomes M.B., Santos A., Pilastris A., Cortez P.: Machine Learning for Predicting Production Disruptions in the Wood-Based Panels Industry: A Demonstration Case, *Artificial Intelligence Applications and Innovations; Maglogiannis* 676, 2023, p. 340–351.
- [146] Bukowski M., Kurek J., Świdorski B., Jegorowa A.: Custom Loss Functions in XGBoost Algorithm for Enhanced Critical Error Mitigation in Drill-Wear Analysis of Melamine-Faced Chipboard, *Sensors* 24, 2024, p. 1092.

- [147] Valarmathi T.N., Palanikumar K., Latha B.: Measurement and analysis of thrust force in drilling of particle board (PB) composite panels, *Measurement* 46, 2013, p. 1220–1230.
- [148] Valarmathi T.N., Palanikumar K., Sekar S., Parametric analysis on delamination in drilling of wood composite panels, *Indian J. Sci. Technol.* 6, 2013, p. 1–10.
- [149] Prakash S., Mercy J.L., Salugu M.K., Vineeth K.S.M.: Optimization of Drilling Characteristics using Grey Relational Analysis (GRA) in Medium Density Fiber Board (MDF), *Mater. Today Proc.* 2, 2015, p. 1541–1551.
- [150] Prakash S., Palanikumar K.: Modeling for prediction of surface roughness in drilling MDF panels using response surface methodology, *J. Compos. Mater.* 45, 2011, p. 1639–1646.
- [151] Ayyildiz E.A., Ayyildiz M., Kara F.: Optimization of Surface Roughness in Drilling Medium-Density Fiberboard with a Parallel Robot, *Adv. Mater. Sci. Eng.* 2021, 2021, p. 6658968.
- [152] Rabiei F., Yaghoubi S.: A comprehensive investigation on the influences of optimal CNC wood machining variables on surface quality and process time using GMDH neural network and bees optimization algorithm, *Mater. Today Commun.* 36, 2023, p. 106482.
- [153] Davim J.P., Clemente V.C., Silva S.: Evaluation of Delamination in Drilling Medium Density Fibre Board, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B-J. Eng. Manuf.* 221, 2007, p. 655–658.
- [154] Zhao H., Ehmann K.F.: Development and performance analysis of new spade bit designs, *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 42, 2002, p. 1403–1414.
- [155] Zielińska-Szwajka J., Szwajka K.: Thrust force and torque in the drilling process laminated chipboard, *Ann. Wars. Univ. Life Sci.* 88, 2014, p. 248–254.
- [156] Szwajka K., Zielińska-Szwajka J., Trzepieciński T.: Experimental Study on Drilling MDF with Tools Coated with TiAlN and ZrN, *Materials* 12, 2019, p. 386.
- [157] Djouadi A., Nouveau C., Beer P., Lambertin M.: CrxNy hard coatings deposited with PVD method on tools for wood machining, *Sur. Coat. Technol.* 133–134, 2000, p. 478–483.
- [158] Lin R., van Houts J., Bhattacharyya D.: Machinability investigation of medium-density fibreboard, *Holzforschung* 60, 2006, p. 71–77.
- [159] Szwajka K., Zielińska-Szwajka J., Trzepieciński T.: Experimental Analysis of Smart Drilling for the Furniture Industry in the Era of Industry 4.0, *Materials* 17, 2024, p. 2033.
- [160] Szwajka K., Trzepieciński T.: On the machinability of medium density fiberboard by drilling, *BioRes* 13, 2018, p. 8263–8278.
- [161] Balyts'kyi O.I., Kolesnikov V.O.: Investigation of wear products of high-nitrogen manganese steels, *Mater. Sci.* 45, 2009, p. 576–581.
- [162] Sydor M., Zasuwik A.: Effect of Wood-based Material Type on Drilled Hole Diameter, *Drewno. Prace Naukowe. Doniesienia. Komun.* 67, 2024, p. 00038.

- [163] Barbu M.C., Tudor E.M.: State of the art of the Chinese forestry, wood industry and its markets, *Wood Mat Sci Eng* 17(6), 2022, p. 1030–1039.
- [164] Zainul Armir N.A., Zakaria S., Begum R.A., Chamhuri N., Mohd Ariff N., Harun J.: The readiness of peninsular Malaysia wood-based industries for achieving sustainability, *BioResources* 15(2), 2020, p. 2971–2993.
- [165] Wang S.Q.: Application of product life cycle management method in furniture modular design, *Math Probl Eng* 2022(1), 2022, p. 7192152.
- [166] Mabkhot M.M., Al-Ahmari A.M., Salah B., Alkhalefah H.: Requirements of the smart factory system: a survey and perspective, *Machines* 6, 2018, p. 23.
- [167] Ferreira J., Sarraipa J., Ferro-Beca M., Agostinho C., Costa R., Jardim-Goncalves R.: End-to-end manufacturing in factories of the future, *Int J Comput Integr Manuf* 30, 2016, p. 1–13.
- [168] Wu Z.W., Zong F., Zhang F., Wang J.X., Zhu Z.L., Guo X.L.: Investigation of the customized furniture industry's production management systems, *J Eng Res* 11(3), 2023, p. 164–175.
- [169] Wyeth D.J., Goli G., Atkins A.G.: Fracture toughness, chip types and the mechanics of cutting wood. A review COST Action E35 2004–2008: Wood machining-micromechanics and fracture, *Holzforschung* 63(2), 2009, p. 168–180.
- [170] Zhong Z.W.: Surface roughness of machined wood and advanced engineering materials and its prediction: a review, *Adv Mech Eng* 13(5), 2021.
- [171] Thibaut B., Denaud L., Collet R., Marchal R., Beauchêne J., Mothe F.: Wood machining with a focus on French research in the last 50 years, *Ann for Sci* 73(1), 2016, p. 163–184.
- [172] Chen C., Liu L., Wan S.H., Hui X.Z., Pei Q.Q.: Data dissemination for industry 4.0 applications in internet of vehicles based on short-term traffic prediction, *ACM Trans Internet Technol* 22, 2022, p. 3.
- [173] Eddy S.R.: Profile hidden Markov models, *Bioinformatics* 14(9), 1998, p. 755–763.
- [174] Gottwald S.: Mathematical fuzzy logics, *Bull Symbolic Logic* 14, 2008, p. 210–239.
- [175] Lin J.H., Ansari N., Li J.: Nonlinear filtering by threshold decomposition, *IEEE Trans Image Process* 8, 1999, p. 925–933.
- [176] Robertson D.G.E., Dowling J.J.: Design and responses of Butterworth and critically damped digital filters, *J Electromyogr Kinesiol* 13, 2003, p. 569–573.
- [177] Uddin M.P., Mamun M.A., Afjal M.I., Hossain M.A.: Information-theoretic feature selection with segmentation-based folded principal component analysis (PCA) for hyperspectral image classification, *Int J Remote Sens* 42, 2021, p. 286–321.
- [178] Widodo A., Yang B.S.: Support vector machine in machine condition monitoring and fault diagnosis, *Mech Syst Signal Process* 21, 2007, p. 2560–2574.
- [179] Xie Y.Z., Li J.G., Lu Y.: An integrated wireless vibration sensing tool holder for milling tool condition monitoring, *Int J Adv Manuf Technol* 95, 2018, p. 2885–2896.

- [180] Xu Y.W., Gui L., Xie T.C.: Intelligent recognition method of turning tool wear state based on information fusion technology and BP neural network, *Shock Vib* 2021(1), 2021, p. 7610884.
- [181] Ye G.L., Mak B.: Speaker-ensemble hidden Markov modeling for automatic speech recognition, *8th International Symposium on Chinese Spoken Language Processing*, 2012, p. 6–10.
- [182] Zadeh L.A.: Is there a need for fuzzy logic?, *Inf Sci* 178(13), 2008, p. 2751–2779.
- [183] Wang G.F., Li Z.M., Dong Y.: Recent advances in intelligent monitoring of cutting tool condition, *Aeronaut Manuf Technol* 61(6), 2018, p. 16–23.
- [184] Patsch R., Frömel-Frybort S., Stanzl-Tschegg S.E.: The influence of the recycled wood proportion in particle boards to the tool life of milling tools, *Wood Mat Sci Eng* 17(3), 2022, p. 163–167.
- [185] Siddhpura M., Paurobally R.: A review of chatter vibration research in turning, *Int J Mach Tools Manuf* 61, 2012, p. 27–47.
- [186] Diez-Olivan A., Del Ser J., Galar D., Sierra B.: Data fusion and machine learning for industrial prognosis trends, *Inform Fusion* 50, 2019, pp. 92–111.
- [187] Lauro C.H., Brandao L.C., Baldo D., Reis R.A., Davim J.P.: Monitoring and processing signal applied in machining processes—a review, *Measurement* 58, 2014, p. 73–86.
- [188] Ramage M., Burrige H., Busse-Wicher M., Fereday G., Reynolds T., Shah D., Wu G., Tu L., Fleming P., Densley-Tingley D., et al: he wood from the trees: The use of timber in construction, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 68, 2017, p. 333–359.
- [189] Sandberg D.: Additives in Wood Products—Today and Future Development, *Environmental Impacts of Traditional and Innovative Forest-Based Bioproducts 1st ed.*; Kutnar, A., Muthu, S., Eds.; Springer: Singapore 1, 2016, p. 105–172.
- [190] de la Cruz-Carrera R., Carrillo-Parra A., Prieto-Ruiz J.Á., Fuentes-Talavera F.J., Ruiz-Aquino F., Goche-Télles J.R.: Modulus of Elasticity in Plywood Boards: Comparison between a Destructive and a Nondestructive Method, *Forests* 15, 2024, p. 1596.
- [191] Fateh T., Rogaume T., Luche J., Richard F., Jabouille F.: Kinetic and mechanism of the thermal degradation of a plywood by using thermogravimetry and Fourier-transformed infrared spectroscopy analysis in nitrogen and air atmosphere, *Fire Saf. J.* 58, 2013, p. 25–37.
- [192] Li W., Zhang Z., Zhou G., Leng W., Mei C.: Understanding the interaction between bonding strength and strain distribution of plywood, *Int. J. Adhes. Adhes.* 98, 2020, p. 102506.
- [193] Xu X., Yang X., Lyu J., Chen L., Sun Y., Xu S., Dynamic mechanical characteristics of poplar veneers painted with damping coatings, *J. Nanjing For. Univ.* 59, 2016, p. 125–130.
- [194] Camero A.Á., Castellón D.G., Lazo D.Á., Terrero B.R.: Análisis de la estructura físico-mecánica de muebles a base de tablero de fibras de densidad media y madera contrachapada, *Cienc. For. Y Ambient.* 4, 2019, p. 55–65.

- [195] Ferreira B.S., Arroyo F.N., Kondo M.Y., Santos H.F.d., Barreto R.L., Dias A.M.P.G., Lahr F.A.R., Christoforo A.L., Campos C.I.d.: Physical and Mechanical Properties of Plywood Produced with Thermally Treated Pinus taeda Veneers, *Forests* 13, 2022, p. 1398.
- [196] Saal K., Kallakas H., Tuhkanen E., Just A., Rohumaa A., Kers J., Kalamees T., Lohmus R.: Fiber-Reinforced Plywood: Increased Performance with Less Raw Material, *Materials* 17, 2024, p. 3218.
- [197] Wang Y., Wang T., Crocetti R., Walinder M.: Experimental investigation on mechanical properties of acetylated birch plywood and its angle-dependence, *Construction and Building Materials* 344, 2022, p. 128277.
- [198] Wang Y., Tang Q., Chen X., Luo X., Zhang F., Zhou G., Zhang J., Zhang L., Meng Y., Ren Y., et al: Performance Evaluation of Carbon Fiber Fabric-Reinforced Formaldehyde-Free High-Strength Plywood, *Polymers* 16, 2024, p. 2637.
- [199] Huang B., Ma M., Liu X., Shi Z., Wang A., Xu G., Yue Q.R.: Investigation on the fundamental mechanical properties and probabilistic characteristics of unidirectional carbon fiber reinforced polymer composite plates, *Polym. Test.* 131, 2024, p. 108355.
- [200] Kibrete F., Trzepieciński T., Gebremedhen H.S., Woldemichael D.E.: Artificial Intelligence in Predicting Mechanical Properties of Composite Materials, *J. Compos. Sci.* 7, 2023, p. 364.
- [201] Zhang J., Lin G., Vaidya U., Wang H.: Past, present and future prospective of global carbon fibre composite developments and applications, *Compos. Part B Eng.* 250, 2023, p. 110463.
- [202] Vasiliev V.V., Morozov E.V.: Advanced Mechanics of Composite Materials, 2nd ed, *Elsevier: Oxford, UK*, 53, 2007.
- [203] Li X., Zhang X., Chen J., Huang L., Lv Y.: Effect of marine environment on the mechanical properties degradation and long-term creep failure of CFRP, *Mater. Today Commun.* 31, 2022, p. 103834.
- [204] Hegde S., Shenoy B.S., Chethan K.N.: Review on carbon fiber reinforced polymer (CFRP) and their mechanical performance, *Mater. Today Proc.* 19, 2019, p. 658–662.
- [205] Khan F., Hossain N., Mim J.J., Rahman S.M.M., Iqbal M.J., Billah M., Chowdhury M.A.: Advances of composite materials in automobile applications—A review, *J. Eng. Res.*, 2024, p. in press.
- [206] Newcomb B.: Processing, structure, and properties of carbon fibers, *Compos. A* 91, 2016, p. 262–282.
- [207] Das T., Ghosh P., Das N.: Preparation, development, outcomes, and application versatility of carbon fiber-based polymer composites: A review, *Adv. Compos. Hybrid Mater.* 2, 2019, p. 214–233.
- [208] Li Q., Xie S., Serem W., Naik M., Liu L., Yuan J.: Quality Carbon Fiber from Fractionated Lignin, *Green Chem.* 19, 2017, p. 1628–1634.
- [209] Auriga R., Gumowska A., Szymanowski K., Wronka A., Robles E., Ocipka P., Kowaluk G.: Performance properties of plywood composites reinforced with carbon fibers, *Compos. Struct.* 248, 2020, p. 112533.

- [210] Bal B.C.: Some physical and mechanical properties of reinforced laminated veneer lumber, *Constr. Build. Mater.* 68, 2014, p. 120–126.
- [211] Wang J., Guo X., Zhong W., Wang H., Cao P.: Evaluation of mechanical properties of reinforced poplar laminated veneer lumber, *BioResources* 10, 2015, p. 7455–7465.
- [212] Wei P., Wang B.J., Zhou D., Dai C., Wang Q., Huang S.: Mechanical properties of poplar laminated veneer lumber modified by carbon fiber reinforced polymer, *BioResources* 8, 2013, p. 4883–4898.
- [213] Ovesy H.R., Fazlali J.: Buckling and free vibration finite strip analysis of composite plates with cutout based on two different modeling approaches, *Compos. Struct.* 94, 2012, p. 1250–1258.
- [214] Venkatachari A., Natarajan S., Haboussi M., Ganapathi M.: Environmental effects on the free vibration of curvilinear fibre composite laminates with cutouts, *Compos. B Eng.* 88, 2016, p. 131–138.
- [215] Rajamani A., Prabhakaran R.: Dynamic response of composite plates with cut-outs, part I: Simply-supported plates, *J. Sound Vib.* 54, 1977, p. 549–564.
- [216] Mandal A., Ray C., Haldar S.: Experimental and numerical studies on vibration characteristics of laminated composite skewed shells with cutout, *Compos. B Eng.* 161, 2019, p. 228–240.
- [217] Szwajka K., Zielińska-Szwajka J., Trzepieciński T., Szewczyk M.: Experimental Study on Mechanical Performance of Single-Side Bonded Carbon Fibre-Reinforced Plywood for Wood-Based Structures, *Materials* 18(1), 2025, p. 207.
- [218] Fiorelli J., Dias A.A.: Fiberglass-reinforced glulam beams: Mechanical properties and theoretical model, *Mater. Res.* 9, 2006, p. 263–269.
- [219] Bal B.C.: Flexural properties, bonding performance and splitting strength of LVL reinforced with woven glassfiber, *Constr. Build Mater.* 51, 2014, p. 9–14.
- [220] Guo F., Al-Saadi S., Singh Raman R.K., Zhao X.: Durability of Fibre Reinforced Polymers in Exposure to Dual Environment of Seawater Sea Sand Concrete and Seawater, *Materials* 15, 2022, p. 4967.
- [221] Kunioka M., Shimada T., Hagihara H., Funabashi M., Suda H., Horizono H.: Quick Preparation of Moisture-Saturated Carbon Fiber-Reinforced Plastics and Their Accelerated Ageing Tests Using Heat and Moisture, *Polymers* 8, 2016, p. 242.
- [222] Novosel A., Sedlar T., Čizmar D., Turkulin H., Živković V.: Structural reinforcement of bi-directional oak-wood lamination by carbon fibre implants, *Constr. Build. Mater.* 187, 2021, p. 123073.
- [223] Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP) Laminates for Structural Strengthening, [Online]. Available: <https://docs.lib.purdue.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1022&context=ectfs>.
- [224] İşleyen Ü.K., Kesik H.İ.: Experimental and numerical analysis of compression and bending strength of old wood reinforced with CFRP strips, *Structures* 33, 2021, p. 259–271.

- [225] *EN 310 Wood-Based Panels—Determination of Modulus of Elasticity in Bending and of Bending Strength European Committee for Standardization: Brussels, Belgium, 1993.*
- [226] Sz wajka K., Zielińska-Sz wajka J., Trzepieciński T.: The Use of a Radial Basis Function Neural Network and Fuzzy Modelling in the Assessment of Surface Roughness in the MDF Milling Process, *Materials* 16, 2023, p. 5292.
- [227] Li Q., Gong Y., Cai M., Liu M.: Research on surface integrity in milling inconel718 superalloy, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 92(1-4), 2017, p. 1–15.
- [228] Malekian M., Park S.S., Jun M.B.G.: Tool wear monitoring of micro-milling operations, *J. Mater. Process. Technol.* 209(10), 2009, p. 4903–4914.
- [229] Zhang C., Jilin Z.: On-line tool wear measurement for ball-end milling cutter based on machine vision, *Comput. Ind.* 64(6), 2013, p. 708–719.
- [230] Rehorn A.G., Jin J., Orban P.E.: State-of-the-art methods and results in tool condition monitoring: A review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 26(7–8), 2005, p. 693–710.
- [231] *BS EN 323 Wood based panels—determination of density. British Standards Institution, London, p. 3, 1993.*
- [232] *BS EN 311 Wood-based panels—surface soundness—test method. British Standards Institution, London, 4–6, 2002.*
- [233] *BS EN Particleboards and fibreboards—determination of tensile strength perpendicular to the plane of the board. British Standards Institution, London, 3–4, 1993.*
- [234] *BS EN 310 Wood-based panels—determination of modulus of elasticity in bending and of bending strength. British Standards Institution, London, 3, 1993.*
- [235] *ISO 8688-1 Tool life testing in milling—part 1: face milling. International Organization for Standardization, Geneva, 6–16, 1989.*
- [236] Porankiewicz B., Józwiak K., Wieczorek D., Idzikowski I.: Specific wear on the rake face made of sintered carbide cutting edge during milling of laminated wood, *Eur J Wood Prod* 73, 2015, p. 35–41.
- [237] Cristóvão L., Grönlund A., Ekevad M., Siteo R.: Tool wear for some lesser-known tropical wood species, *Wood Mater Sci Eng* 6, 2011, p. 155–161.
- [238] Plastov E.F.: Influence of the carbide tool bluntness on qualitative factors and forces during milling of particleboards, *Driev Prom* 6, 1971, p. 9–10.
- [239] Palanikumar K, Cutting parameter optimization for surface roughness in machining of GFRP composites using Taguchi’s method, *J Reinf Plast Compos* 25, 2006, p. 1739–1751.
- [240] Palmqvist J., Johansson G.: Cutting forces in peripheral milling of wood, *Proceedings of 14th international wood machining seminar*, 1999, p. 751–760.
- [241] Kowaluk G., Szymanski W., Beer P., Sinn G., Gindl M.: Influence of tools stage on particleboards milling, *Wood Res* 52, 2007, p. 75–88.

- [242] Mercy J.L., Prakash S., Vijayalakshmi P., Teja P.V.S.: Multi response optimization of drilling parameters during drilling of particle board using grey relational analysis, *Appl Mech Mater* 592–594, 2014, p. 530–533.
- [243] Gaitonde V.N., Karnik S.R., Davim J.P.: Prediction and optimization of surface roughness in milling of medium density fibreboard (MDF) based on Taguchi orthogonal array experiments, *Holzforsch* 62, 2008, p. 209–214.
- [244] Davim J.P., Clemente V.C., Silva S.: Surface roughness aspects in milling MDF (medium density fibreboard), *Int J Adv Manuf Tech* 40:, 2009, p. 49–55.
- [245] Feito N., Diaz-Alvarez J., Diaz-Alvarez A., Cantero J.L., Miguelez M.H.: Experimental analysis of the drill point angle and wear on the drilling of woven CFRPs, *Materials* 7(6), 2014, p. 4258-4271.
- [246] Hocheng H., Tsao C.C.: Effects of special bits on drilling-induced delamination of composite materials, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46(12-13), 2006, p. 1403-1416.
- [247] Gaitonde V.N., Karnik S.R., Campos Rubio J., Esteves Correia A., Abrão A.M., Davim J.P.: Analysis of parametric influence on delamination in high-speed drilling of carbon fiber reinforced plastic composites, *Journal of Materials Processing Technology* 203, 2008, pp. 431-438.
- [248] Chen W.C.: Some experimental investigations in the drilling of carbon fiberreinforced plastic (CFRP) composite laminates, *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 37(8), 1997, p. 1097-1108.
- [249] El-Sonbaty I., Khashaba U.A., Machaly T.: Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites, *Composite Structures* 63(3-4), 2004, p. 329-338.
- [250] Crnjac M., Veža I., Banduka N.: From concept to the introduction of Industry 4.0, *Int. J. Ind. Eng. Manag.* 8, 2017, p. 21–30.
- [251] Brozzi R., Forti D., Rauch E., Matt D.T.: The advantages of Industry 4.0 applications for sustainability: Results from a sample of manufacturing companies, *Sustainability* 12, 2020, p. 3647.
- [252] Vrchota J., Řehoř P., Maříková M., Pech M.: Critical success factors of the project management in relation to Industry 4.0 for sustainability of projects, *Sustainability* 13, 2020, p. 281.
- [253] Wiśniewska-Sałek A.: Sustainable development in accordance with the concept of Industry 4.0 on the example of the furniture industry, *MATEC Web Conf.* 183, 2018, p. 04005.
- [254] Zhu J., Wang X.: Research on enabling technologies and development path of intelligent manufacturing of wooden furniture, *J. For. Eng.* 6, 2021, p. 177–183.
- [255] Pinzone M., Fantini P., Perini S., Garavaglia S., Taisch M., Miragliotta G.: Jobs and skills in Industry 4.0: An exploratory research, *Springer*, 2017, p. 282–288.
- [256] Szwajka K., Trzepieciński T.: The influence of machining parameters and tool wear on the delamination process during milling of melamine-faced chipboard, *Drewno* 60, 2017, p. 117–131.

- [257] Podziewski P., Szymanowski K., Górski J., Czarniak P.: Relative machinability of wood-based boards in the case of drilling—Experimental study, *BioResources* 13, 2018, p. 1761–1772.
- [258] Podziewski P., Śmietańska K., Górski J.: Experimental verification of a highly simplified, preliminary machinability test for wood-based boards in the case of drilling, *Forests* 12, 2021, p. 1334.
- [259] Das M.K., Tobias S.A.: The relation between the static and the dynamic cutting of metals, *Int. J. Mach. Tool Des. Res.* 7, 1967, p. 63–89.
- [260] Kinzle O.: Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen, *VDI-Z* 94, 1952, p. 299–305.
- [261] Djouadi A., Beer P., Marchal R., Sokolowska A., Lambertin M., Precht W., Nouveau C.: Antiabrasive coatings: Application for wood processing, *Surf. Coat. Technol.* 116–119, 1999, p. 508–516.
- [262] Faga M.G., Settineri L.: Innovative anti-wear coatings on cutting tools for wood machining, *Surf. Coat. Technol.* 201, 2006, p. 3002–3007.
- [263] Nouveau C., Djouadi A., Marchal R., Lambertin M.: Application of CrAlN coatings on carbide substrates in routing of MDF, *Wear* 263, 2007, p. 1291–1299.
- [264] Nouveau C., Jorand E., Deces-Petit C., Labidi C., Djouadi A.: Influence of carbide substrates on tribological properties of chromium and chromium nitride coatings: Application to wood machining, *Wear* 258, 2005, p. 157–165.
- [265] Pinheiro D., Vieira M.T., Djouadi A.: Advantages of depositing multilayer coatings for cutting wood-based products, *Surf. Coat. Technol.* 203, 2009, p. 3197–3205.
- [266] Sedlecký M.: Surface roughness of medium-density fiberboard (MDF) and edge-glued panel (EGP) after edge milling, *BioResources* 12, 2017, p. 8119–8133.
- [267] Tiryaki S., Hamzaçebi C., Malkoçoğlu A.: Evaluation of process parameters for lower surface roughness in wood machining by using Taguchi design methodology, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 73, 2015, p. 537–545.
- [268] Gordon S., Hillery M.T.: A review of the cutting of composite materials, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.* 217, 2003, p. 35–45.
- [269] Gurau L., Mansfield-Williams H., Irle M.: Processing roughness of sanded wood surfaces, *Holz als Roh und Werkstoff* 63, 2005, p. 43–52.
- [270] Thoma H., Peri L., Lato E.: Evaluation of wood surface roughness depending on species characteristics, *Maderas Ciencia y Tecnología* 17, 2015, p. 285–292.
- [271] Akgül M., Korkut S., Çamlıbel O., Candan Z., Akbulut T.: Wettability and surface roughness characteristics of medium density fiberboard panels from rhododendron (*Rhododendron ponticum*) biomass, *Maderas Ciencia y Tecnología* 14, 2012, p. 185–193.
- [272] Taylor J.B., Carrano A.L., Lemaster R.L.: Quantification of process parameters in a wood sanding operation, *For. Prod. J.* 49, 1999, p. 41–46.
- [273] Škaljić N., Beljo-Lučić R., Čavlović A., Obućina M.: Effect of feed rate and wood species on roughness of machined surface, *Drvna Industrija* 60, 2009, p. 229–234.

- [274] Costes J., Larricq P.: Towards high cutting speed in wood milling, *Ann. For. Sci.* 59, 2002, p. 857–865.
- [275] Kvietková M., Gašparík M., Gaff M.: Effect of thermal treatment on surface quality of beech wood after plane milling, *BioResources* 10, 2015, p. 4226–4238.
- [276] Sütçü A.: Investigation of parameters affecting surface roughness in CNC routing operation on wooden EGP, *BioResources* 8, 2013, p. 795–805.
- [277] Clarke P.A.: Panel products—Past, present and future—Developments 1991, *J. Inst. Wood Sci.* 12, 1991, p. 233–241.
- [278] Candan Z., Büyüksarı U., Korkut S., Unsal O., Çakıcıer N.: Wettability and surface roughness of thermally modified plywood panels, *Ind. Crop. Prod.* 36, 2012, p. 434–436.
- [279] Liu D., Tang Y., Cong W.: A review of mechanical drilling for composite laminates, *Compos. Struct.* 94, 2012, p. 1265–1279.
- [280] Deus P.R., de Sampaio Alves M.C., Vieira F.H.A.: The quality of MDF workpieces machined in CNC milling machine in cutting speeds, feed rate, and depth of cut, *Meccanica*, 50 (12), 2015, p. 2899-2906.
- [281] Koc K.H., Erdinler E.S., Hazir E., Öztürk E.: Effect of CNC application parameters on wooden surface quality, *Measurement* 107, 2017, p. 12–18.
- [282] Bal B.C., Akçakaya E.: The effects of step over, feed rate and finish depth on the surface roughness of fiberboard processed with CNC machine, *Furniture Wooden Mater. Res. J.*, 1 (2), 2018, pp. 86-93.
- [283] İşleyen Ü.K., Karamanoğlu M.: The influence of machining parameters on surface roughness of MDF in milling operation, *BioResources* 14, 2019, p. 3266–3277.
- [284] Pinkowski G., Szymański W., Gilewicz A., Warcholiński B.: Surface roughness aspects in machine cutting of medium density fibreboards (MDF) with modified cutters on a CNC woodworking machine, *For. Wood Technol.* 75, 2011, p. 202–209.
- [285] Sedlecký M., Kvietková M.S., Kminiak R.: Medium-density fiberboard (MDF) and Edge-Glued Panels (EGP) after edge milling-surface roughness after machining with different parameters, *BioResources*, 13 (1), 2018, p. 2005-2021.
- [286] Deus P.R., Alves M.C., Vieira F.H., Bilesky L.R.: Analysis of the cutting parameters in front milling for medium density fiberboard, *BioResources*, 13 (2), 2018, p. 3404-3410.
- [287] Aguilera A., Meausoone P.J., Martin P.: Wood material influence in routing operations: the MDF case, *Eur. J. Wood Prod.*, 58 (4), 2000, p. 278-283.
- [288] Jarosz K., Löschner P., Niesłony P., Królczyk G.: Optimization of CNC face milling process of AL-6061-T6 aluminum alloy, *J. Mach. Eng.* 17, 2017, p. 69–77.
- [289] Sugeno M., Tanaka K.: Successive identification of a fuzzy model and its applications to prediction of a complex system, *Fuzzy Sets Syst.* 42, 1991, p. 315–334.

- [290] Chen J., Savage M.A.: Fuzzy-Net-Based Multilevel In-Process Surface Roughness Recognition System in Milling Operations, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 17, 2001, p. 670–676.
- [291] Demir A., Cakiroglu E.O., Aydin I.: Determination of CNC processing parameters for the best wood surface quality via artificial neural network, *Wood Mater. Sci. Eng.* 17, 2022, p. 685–692.
- [292] Takagi T., Sugeno M.: Fuzzy identification of systems and its application to modeling and control, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 15, 1985, p. 116–132.
- [293] Sugeno M., Kang G.T.: Structure identification of fuzzy model, *Fuzzy Sets Syst.* 28, 1988, p. 15–33.
- [294] Aydin I., Demirkir C.: Activation of spruce wood surfaces by plasma treatment after long terms of natural surface inactivation, *Plasma Chem. Plasma Process.* 30, 2010, p. 697–706.
- [295] Esteban L.G., Garcia Fernandez F., de Palacios P., Conde M.: Artificial neural networks in variable process control: Application in particleboard manufacture, *For. Syst.* 18, 2009, p. 92–100.
- [296] Wu H., Avramidis S.: Prediction of timber kiln drying rates by neural networks, *Dry. Technol.* 24, 2006, p. 1541–1545.
- [297] Mansfield S.D., Iliadis L., Avramidis S.: Neural network prediction of bending strength and stiffness in western hemlock (*Tsuga heterophylla* Raf.), *Holzforschung* 61, 2007, p. 707–716.
- [298] Cook D.F., Whittaker A.D.: Neural-network process modeling of a continuous manufacturing operation, *Eng. Appl. Artif. Intell.* 6, 1993, p. 559–564.
- [299] Drake P.R., Packianather M.S.: A decision tree of neural network for classifying images of wood veneer, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 14, 1998, p. 280–285.
- [300] Avramidis S., Iliadis L.: Predicting wood thermal conductivity using artificial neural networks, *Wood Fiber Sci.* 37, 2005, p. 682–690.
- [301] Zhang J., Cao J., Sun L.A.: A novel fusion technique based functional link artificial neural network for LMC measuring, *Proceedings of the Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2007, p. 471–475.
- [302] Samarasinghe S., Kulasiri D., Jamieson T.: Neural networks for predicting fracture toughness of individual wood samples, *Silva Fenn.* 41, 2007, p. 105–122.
- [303] Jemielniak K., Kwiatkowski L., Wrzosek P.: Diagnosis of tool wear based on cutting forces and acoustic emission measures as inputs to neural network, *J. Intell. Manuf.* 9, 1998, p. 447–4553.
- [304] Balazinski M., Jemielniak K.: Tool conditions monitoring using fuzzy decision support system, *Proceedings of the VCIRP*, 1998, p. 115–122.
- [305] Li X.L., Li H.X., Guan X.P., Du R.: Fuzzy estimation of feed-cutting force from current measurement-a case study on intelligent tool wear condition monitoring, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern. Part C Appl. Rev.* 34, 2004, p. 506–512.

- [306] Achiche S., Balazinski M., Baron L., Jemielniak K.: Tool wear monitoring using genetically-generated fuzzy knowledge bases, *Eng. Appl. Artif. Intell.* 15, 2002, p. 303–314.
- [307] Zadeh L.A.: Fuzzy sets, *Inf. Control* 8, 1965, p. 338–353.
- [308] Penman D., Olsson O.J., Bowman C.C.: Automatic inspection of reconstituted wood panels for surface defects, *Proc. Soc. Photo Opt. Instrum. Eng.* 1823, 1993, p. 284–293.
- [309] Bal B.C., Gündeş Z.: Surface roughness of medium-density fiberboard processed with CNC machine, *Measurement* 153, 2020, p. 107421.
- [310] Aguilera A.: Cutting energy and surface roughness in medium density fibreboard rip sawing, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 69, 2011, p. 11–18.
- [311] Podulka P., Macek W., Branco R., Nejad R.M.: Reduction in Errors in Roughness Evaluation with an Accurate Definition of the S-L Surface, *Materials* 16, 2023, p. 1865.
- [312] Salcedo M.C., Coral I.B., Ochoa G.V.: Characterization of surface topography with Abbott Firestone curve, *Contemp. Eng. Sci.* 11, 2018, p. 3397–3407.
- [313] Yager R.R., Filev D.P.: Approximate clustering via the mountain method, *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 24, 1994, p. 1279–1284.
- [314] Chiu S.L.: Fuzzy model identification based on cluster estimation, *J. Intell. Fuzzy Syst.* 2, 1994, p. 267–278.
- [315] Gurau L., Ayrilmis N., Benthien J.T., Chlmeyer M., Kuzman M.K., Racasan S.: Effect of species and grinding disc distance on the surface roughness parameters of medium density fiberboard, *Eur. J. Wood Wood Prod.* 75, 2017, p. 335–346.
- [316] Sharma R., Vashisgt V., Singh U.: Fuzzy modelling based energy aware clustering in wireless sensor networks using modified invasive weed optimization, *J. King Saud Univ. Comput. Inf. Sci.* 34, 2022, p. 1884–1894.
- [317] Zhang X., Huang W., Wu C., Cao S.: Defect measurement in CFRP drilling based on digital image processing, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 127, 2023, p. 5405–5419.
- [318] Szwajka K., Zielińska-Szwajka J., Trzepieciński T.: Damage Identification in CFRP/plywood Laminate Drilling Based on Digital Image Processing, Artificial Neural Network and Fuzzy Modelling, *Lecture Notes in Networks and Systems* 1529, 2025, p. 641–648.
- [319] Li Y., et al: Interfacially reinforced carbon fiber silicone resin via constructing functional nano-structural silver, *Compos. Sci. Technol.* 181, 2019, p. 107689.
- [320] Xu J., et al: A critical review addressing drilling-induced damage of CFRP composites, *Compos. Struct.* 294, 2022, p. 115594.
- [321] Cao S., et al: Bi-directional drilling of CFRPs: from principle to delamination suppression, *Compos. B* 248, 2023, p. 110385.
- [322] Wang X., Wang F., Jin X., Fu R., Shi Y.: Numerical prediction of the chip formation and damage response in CFRP cutting with a novel strain rate based material model, *Compos. Struct.* 294, 2022, p. 115746.

- [323] Weng J., et al: Analytical and experimental investigations of rake face temperature considering temperature-dependent thermal properties, *J. Mater. Process. Technol.* 3142023, p. 117905.
- [324] Bandt C., Pompe B.: Permutation entropy: A natural complexity measure for time series, *Phys. Rev. Lett.* 88, 2002, p. 174102.
- [325] Keller K., Lauffer H., Sinn M.: Ordinal analysis of EEG time series, *Chaos and Complexity Letters, 1st ed.: Orsucci, F.F., Sala, N., Eds., 2007*, p. 247–258.
- [326] Amigó J.: Permutation Complexity in Dynamical Systems: Ordinal Patterns, Permutation Entropy and All That, Berlin/Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2010.
- [327] Rosso O.A., Larrondo H.A., Martin M.T., Plastino A., Fuentes M.A.: Distinguishing noise from chaos, *Phys. Rev. Lett.* 99, 2007, p. 154102.
- [328] Zanin M., Zunino L., Rosso O.A., Papo D.: Permutation entropy and its main biomedical and econophysics applications: A review, *Entropy* 14, 2012, p. 1553–1577.
- [329] Byrne G., Dornfeld D., Inasaki I., Ketteler G., König W., Teti R.: Tool Condition Monitoring (TCM) — The Status of Research and Industrial Application, *CIRP Annals* 44(2), 1995, p. 541-567.
- [330] Choi G.S., Wang Z.X., Dornfeld D.: Monitoring and control of machining process using neural networks., *Progress Report to Omron Electronics*, 1990.
- [331] Zielińska-Szwajka J., Szwajka K.: Application of Artificial Intelligence Methods to Assess the Wear of Drill when Drilling CFRP/Plywood Laminates, *Lecture Notes in Networks and Systems* 1529, 2025, p. 215–224.
- [332] Dornfeld D.A.: Neural network sensor fusion for tool condition monitoring, *CIRP Ann.* 39(1), 1990, p. 101–105.
- [333] Zhou X., et al: Tool wear classification based on convolutional neural network and time series images during high precision turning of copper, *Wear* 522, 2023, p. 204692.
- [334] Wang J., Ma Y., Zhang L., Gao R.X., Wu D.: Deep learning for smart manufacturing: methods and applications, *J. Manuf. Syst.* 48, 2018, p. 144–156.
- [335] Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A.: Data-driven smart manufacturing, *J. Manuf. Syst.* 48, 2018, p. 157–169.
- [336] Xu L., Huang C., Li C., Wang J., Liu H., Wang X.: Estimation of tool wear and optimization of cutting parameters based on novel ANFIS-PSO method toward intelligent machining, *J. Intell. Manuf.* 32, 2021, p. 77–90.
- [337] Saw L.H., et al: Sensitivity analysis of drill wear and optimization using adaptive neuro fuzzy – genetic algorithm technique toward sustainable machining, *J. Clean. Prod.* 172, 2018, p. 3289–3298.
- [338] Cheng Y., Gai X., Guan R., Jin Y., Lu M., Ding Y.: Tool wear intelligent monitoring techniques in cutting: a review, *J. Mech. Sci. Technol.* 37, 2023, p. 289–303.

- [339] Munaro R., Attanasio A., Del Prete A.: Tool wear monitoring with artificial intelligence methods: a review, *J. Manufact. Mater. Process.* 7(4), 2023, p. 129.
- [340] Wang Y., Chang M., Huang X., Li Y., Tang J.: Cutting tool wear prediction based on the multi-stage Wiener process, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 129, 2023, p. 5319–5333.
- [341] Zielińska-Szwajka J., Szwajka K.: Application of Artificial Intelligence Methods to Assess the Wear of Drill when Drilling CFRP/Plywood Laminates, *Lecture Notes in Networks and Systems* 1529, 2025, p. 215–224.
- [342] Teti R., Mourtzis D., D’Addona D.M., Caggiano A.: Process monitoring of machining, *CIRP Ann*, 71, 2022, p. 529-552.
- [343] Lara De Leon M.A., Kolarik J., Byrtus R., Koziorek J., Zmij P., Martinek R.: Tool condition monitoring methods applicable in the metalworking process, *Arch Comput Methods Eng* 31, 2024, p. 221-242.
- [344] Pimenov D.Y., Bustillo A., Wojciechowski S., Sharma V.S., Gupta M.K., Kuntoğlu M.: Artificial intelligence systems for tool condition monitoring in machining: analysis and critical review, *J Intell Manuf* 34, 2023, pp. 2079-2121.
- [345] Downey J., Bombiński S., Nejman M., Jemieliński K.: Automatic multiple sensor data acquisition system in a real-time production environment, *Procedia CIRP* 33, 2015, pp. 215-220.
- [346] Scheffer C., Heyns P.S.: An industrial tool wear monitoring system for interrupted turning, *Mech Syst Signal Process* 18, 2004, p. 1219-1242.
- [347] Thangamuthu M., Kirubakaran E.S., Madheswaran D.K., Naren M.L., Dharshan S.P., Ibrahim M.: Review of advances in tool condition monitoring techniques in the milling process, *Meas Sci Technol* 35, 2024, p. 092002.
- [348] He J., Sun Y., Gao H., Guo L., Cao A., Chen T.: On-line milling tool wear monitoring under practical machining conditions, *Measurement* 222, 2023, p. 113621.
- [349] Tansel I.N., Bao W.Y., Reen N.S., Kropas-Hughes C.V.: Genetic tool monitor (GTM) for micro-end-milling operations, *Int J Mach Tools Manuf* 45, 2005, p. 293-299.
- [350] Sick B.: On-line and indirect tool wear monitoring in turning with artificial neural networks: a review of more than a decade of research, *Mech Syst Signal Process* 16, 2002, p. 487-546.
- [351] Tool monitoring system for metal cutting - collision, tool breakage detection. Digit Way n.d., [Online]. Available: <https://www.digitalway.fr/>.
- [352] CNC Machining Automation Technology. Caron Eng n.d., [Online]. Available: <https://www.caroneng.com/>.
- [353] Cutting Tool Solutions n.d., [Online]. Available: <https://cuttingtools.ceratizit.com/bg/en.html>.
- [354] Techna-Tool: Broken Tool Detection and Process Monitoring Solutions 2024, [Online]. Available: <https://techna-tool.com/>.
- [355] INPIX. KORLOY. KORLOY n.d., [Online]. Available: <http://www.korloy.com/en>.

- [356] Nordmann Tool Monitoring n.d., [Online]. Available: <https://www.toolmonitoring.com/>.
- [357] Montronix GmbH - Monitoring solutions for machine tools n.d., [Online]. Available: <https://www.montronix.com/en/>.
- [358] Isavand J., Kasaei A., Peplow A., Wang X., Yan J., A reduced-order machine-learning-based method for fault recognition in tool condition monitoring, *Measurement* 224, 2024, p. 113906.

# **ANALIZA WYBRANYCH METOD MONITOROWANIA PROCESU SKRAWANIA KOMPOZYTÓW DREWNOPOCHODNYCH W ASPEKTACH OCENY STANU NARZĘDZIA I JAKOŚCI POWIERZCHNI OBROBIONEJ**

## **STRESZCZENIE**

Kompozyty drewnopochodne mają wszechstronne zastosowania konstrukcyjne i stanowią dobrą alternatywę dla płyt z tworzyw sztucznych i materiałów metalowych. Posiadają odpowiednie parametry wytrzymałościowe, zapewniające wymaganą sztywność i wytrzymałość w produktach meblowych i zastosowaniach budowlanych. Płyty drewnopochodne są zazwyczaj przetwarzane poprzez cięcie, frezowanie i wiercenie. Szczególnie w przemyśle meblarskim dokładność obróbki jest kluczowa ze względów estetycznych. Zapewnienie wysokiej jakości powierzchni płyt drewnopochodnych w cyklu produkcyjnym wiąże się z odpowiednim doбором parametrów obróbki i narzędzi skrawających dostosowanych do specyfiki obrabianego materiału (właściwości drewna, kleju, rodzaju żywicy i ewentualnych zanieczyszczeń). Zainteresowanie automatycznym monitorowaniem narzędzi skrawających w zrównoważonej produkcji, zgodnie z koncepcją Przemysłu 4.0, stale rośnie. Zastosowanie elastycznej automatyzacji w obróbce skrawaniem tych materiałów wiąże się z zapewnieniem narzędzi monitorujących stan zużycia narzędzi i jakość powierzchni. Wiercenie i frezowanie są najczęstszymi sposobami obróbki skrawaniem, które przygotowują płyty do operacji montażowych i bezpośrednio wpływają na jakość powierzchni oraz estetyczny wygląd produktów. W pracy przedstawiono wyniki badań dotyczących skrawalności płyt pilśniowych średniej gęstości (MDF) i płyt wiórowych z uwzględnieniem wpływu parametrów obróbki i wskazaniem obszarów przyszłych badań. Przedstawiono również trendy badawcze w zakresie stosowania nowych ogólnych założeń metodologicznych, które pozwalają na zdefiniowanie zarówno stanu narzędzia, jak i monitorowania rozwarstwienia podczas wiercenia i frezowania płyt drewnopochodnych, tj. płyt wiórowych i płyt MDF. Przedstawiono koncepcję autorską i metodyki monitorowania procesu skrawania materiałów drewnopochodnych, porównując konkretne dane empiryczne i studia przypadków z przeprowadzonych przez autora badań. Dokonano oceny poprawności działania opracowanej metodyki monitorowania procesu skrawania w warunkach produkcyjnych.



# **ANALYSIS OF SELECTED METHODS FOR MONITORING THE CUTTING PROCESS OF WOOD-BASED COMPOSITES IN TERMS OF ASSESSING TOOL CONDITION AND MACHINED SURFACE QUALITY**

## **ABSTRACT**

Wood-based composites have versatile structural applications and represent a good alternative to plastic and metal panels. They possess appropriate strength parameters, ensuring the required stiffness and durability in furniture and construction applications. Wood-based panels are typically processed by cutting, milling, and drilling. Particularly in the furniture industry, machining accuracy is crucial for aesthetic reasons. Ensuring high-quality wood-based panel surfaces during the production cycle involves the appropriate selection of machining parameters and cutting tools tailored to the specific characteristics of the material being processed (wood properties, adhesive, resin type, and potential contaminants). Interest in automatic monitoring of cutting tools in sustainable production, in line with the Industry 4.0 concept, is constantly growing. The use of flexible automation in machining these materials involves providing tools that monitor tool wear and surface quality. Drilling and milling are the most common machining processes, preparing panels for assembly operations and directly impacting surface quality and the aesthetic appearance of products. This paper presents research results on the machinability of medium-density fiberboard (MDF) and particleboard, taking into account the influence of machining parameters and identifying areas for future research. Research trends in the application of new general methodological assumptions are also presented, which allow for the definition of both tool condition and delamination monitoring during drilling and milling of wood-based panels, i.e., particleboard and MDF. The author's concept and methodology for monitoring the cutting process of wood-based materials are presented, comparing specific empirical data and case studies from the author's research. The correctness of the developed methodology for monitoring the cutting process under production conditions is assessed.