

ZAŁĄCZNIK 3
do Wniosku o wszczęcie postępowania habilitacyjnego

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

AUTOREFERAT

Rzeszów, 12.01.2026 r.

Spis treści

1. Dane osobowe.....	5
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	6
3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych	7
4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (dz. U. Z 2021 r. Poz. 478 z późn. zm.)	8
4.1. Monografia	8
4.2. Aktualność podjętej tematyki badawczej.....	8
4.3. Zdefiniowanie i uzasadnienie wyboru obszaru badawczego.....	10
4.4. Charakterystyka celu naukowego, zakresu badań, warunków badań, wyników oraz oryginalnego wkładu.....	12
4.4.1. Zaproponowana metodyka określania właściwości dynamicznych kompozytów	13
4.4.2. Konfiguracja stanowisk badawczych stosowanych w badaniach	17
4.4.3. Wpływ parametrów skrawania na przebieg obróbki.....	21
4.4.4. Ekonomiczna i wydajnościowa obróbka kompozytów drewnopochodnych	29
4.4.5. Skrawalność kompozytów drewnopochodnych	34
4.4.6. Wpływ zastosowanych powłok ostrzy narzędzi skrawających na wybrane wskaźniki technologiczne	45
4.4.7. Monitorowanie procesu obróbki kompozytów drewnopochodnych	52
4.4.8. Wirtualny układ monitorowania zużycia ostrza skrawającego.....	70
4.4.9. Podsumowanie	82
4.5. Literatura.....	86
5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej	90
6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.....	94
7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. I-VI wnioskodawca może podać inne informacje ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.....	100

1. Dane osobowe

Imię i nazwisko	Krzysztof Sz wajka
Stopień naukowy	Doktor nauk technicznych
Miejsce i adres zatrudnienia	Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza Wydział Mechaniczno-Technologiczny Zakład Zintegrowanych Systemów Projektowania i Tribologii 37-450 Stalowa Wola ul. Kwiatkowskiego 4
telefon PRz	17 743 26 04
e-mail	kszwajka@prz.edu.pl

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

2002	<p>doktor nauk technicznych, specjalność mechanika i budowa maszyn Wydział Inżynierii Produkcji, Politechnika Warszawska</p> <p>Temat rozprawy: „<i>Automatyczna diagnostyka ostrzy narzędzi skrawających przy toczeniu</i>”</p> <p>Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Jemielniak Recenzent: prof. dr inż. Maciej Szafarczyk Recenzent zewnętrzny: prof. dr hab. inż. Jan Kosmol</p>
1997	<p>mgr inż. kierunku mechanika i budowa maszyn, w zakresie pojazdy samochodowe Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie</p> <p>Temat pracy magisterskiej: „<i>Analiza dokładności wykonania przekładni głównej hipoidalnej</i>”</p> <p>Promotor: dr inż. Marian Krawczyk</p>

3. Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych

2016 - nadal	Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie Wydział Mechaniczno-Technologiczny adiunkt w grupie pracowników badawczo–dydaktycznych
2013-2016	Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie Wydział Budowy Maszyn i Lotnictwa adiunkt w grupie pracowników badawczo–dydaktycznych
2005-2013	Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie Wydział Technologii Drewna adiunkt w grupie pracowników badawczo–dydaktycznych (Załącznik_6_1)
2003-2011	Uniwersytet Rzeszowski w Rzeszowie Wydział Matematyczno-Przyrodniczy adiunkt w grupie pracowników badawczo–dydaktycznych (Załącznik_6_2)
2002-2003	Politechnika Warszawska w Warszawie Wydział Inżynierii Produkcji adiunkt w grupie pracowników badawczo–dydaktycznych (Załącznik_6_3)

4. Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (dz. U. Z 2021 r. Poz. 478 z późn. zm.)

Moim osiągnięciem naukowym, uzyskanym po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiącym znaczny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna określonym w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.), jest autorska monografia habilitacyjna.

4.1. Monografia

Naukowe osiągnięcie zostało przedstawione w monografii pt.: „Analiza wybranych metod monitorowania procesu skrawania kompozytów drewnopochodnych w aspektach oceny stanu narzędzia i jakości powierzchni obrobionej”.

Autor: Krzysztof Sz wajka

Recenzenci wydawniczy monografii:
prof. dr hab. inż. Sebastian Skoczypiec (Załącznik_6_4)
dr hab. inż. Piotr Niestony, prof. PO (Załącznik_6_5)

Wydawnictwo:
Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej 2025, ISBN 978-83-7934-821-3

4.2. Aktualność podjętej tematyki badawczej

Podstawowym obszarem moich zainteresowań naukowych bezpośrednio związanych z tematyką stanowiącą mój wkład w dziedzinę inżynieria mechaniczna są badania dotyczące trwałości narzędzi skrawających i powiązana z tym zjawiskiem jakość powierzchni obrobionej materiału. Doniosłość i aktualność powyższej problematyki naukowej stała się dla mnie oczywista już gdy byłem jednym z głównych wykonawców grantów (KBN 3 P06L 025 24 oraz MNiSzW Nr N309 007537) dotyczących skrawalności kompozytów drewnopochodnych oraz skrawności narzędzi skrawających. Podczas realizacji ww. grantu okazało się, że obróbka podstawowych kompozytów drewnopochodnych stosowanych w przemyśle stwarza wiele poważnych problemów. Związane jest to chociażby z przedwczesnym i, co bardzo istotne, nieprzewidywalnym zużyciem ostrzy narzędzi. Rosnące zapotrzebowanie na automatyzację procesów obróbki, napędzane rosnącymi kosztami pracy i rygorystycznymi wymaganiami jakościowymi, sprawiło, że monitorowanie procesów stało się nieuniknioną koniecznością. Zastosowanie automatyzacji w obróbce kompozytów drewnopochodnych wiąże się z zapewnieniem układów monitorujących stan zużycia ostrza narzędzi skrawających jak i jakość powierzchni obrobionej.

Kompozyty drewnopochodne od dawna stanowią integralną część branż takich jak budownictwo, przemysł motoryzacyjny i przemysł meblarski [1]. Pomimo ich powszechnego zastosowania, branża przetwórstwa kompozytów drewnopochodnych pozostaje w tyle pod względem wdrażania zaawansowanych technologii monitorowania w procesach skrawania, szczególnie w porównaniu

z postępowaniem obserwowanym w obróbce metali [2]. Kompozyty drewnopochodne zazwyczaj są przetwarzane poprzez frezowanie i wiercenie. Obróbka kompozytów drewnopochodnych różni się znacząco od obróbki skrawaniem metali, stawiając przed operatorami obrabiarek i narzędziami skrawającymi wyzwania.

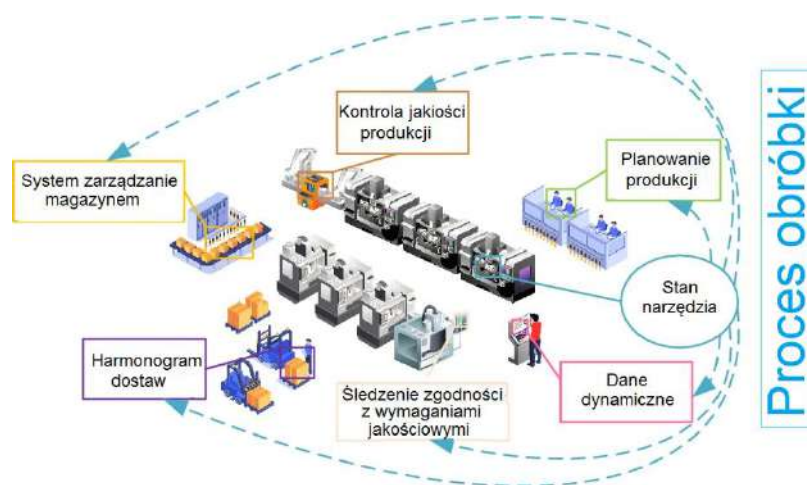
W ostatnich latach rozwój Przemysłu 4.0 i dążenie do gospodarki niskoemisyjnej pobudziły znaczącą transformację w branży przetwórstwa kompozytów drewnopochodnych, podkreślając potrzebę stosowania rozwiązań monitorujących proces skrawania [3]. Jednak szersze wdrożenie tych technologii w przetwórstwie kompozytów drewnopochodnych pozostaje ograniczone, co podkreśla pilną potrzebę ukierunkowanych badań. Jednocześnie inne sektory przetwórstwa kompozytów 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 kompozytów 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.

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 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 kompozytów drewnopochodnych dodatkowo komplikuje akwizycję sygnałów 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 kompozytów 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 włókien drzewnych i właściwości kleju powodują wahania siły 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 ścinanie, co wymaga precyzyjnego doboru parametrów skrawania w celu zapewnienia wydajności narzędzia i jakości powierzchni obrobionej [15].

Branża przetwórstwa kompozytów drewnopochodnych przechodzi znaczącą transformację, zgodną z trendem informatyzacji przemysłu [16]. W regionach, w których przemysł obróbki kompozytów drewnopochodnych jest kluczowym motorem napędowym gospodarki, istnieje pilna potrzeba, zarówno z perspektywy ekonomicznej, jak i środowiskowej, wdrożenia nowych technologii poprawiających wydajność [17]. Integracja systemów monitorujących proces obróbki kompozytów 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 zużycia 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) [18]. Systemy te odpowiadają na zapotrzebowanie rynku na personalizację i elastyczność produkcji. Przepływ danych przedsiębiorstwa zachodzący w czasie rzeczywistym w ramach tych systemów ma kluczowe znaczenie dla zwiększenia efektywności operacyjnej [19]. Monitorowanie stanu narzędzi wykracza poza prostą redukcję defektów i marnotrawstwa narzędzi [20]. Jest ono również kluczowe dla minimalizacji przestoju produkcyjnych i zapewnienia płynnego przepływu danych w czasie rzeczywistym. Jak pokazano na rys. 1 powiązania między monitorowaniem stanu narzędzi, a innymi procesami produkcyjnymi są wyraźne. Przykładowo firmy mogą wykorzystać dane o stanie narzędzi skrawających do udoskonalenia ich harmonogramowania, eliminując opóźnienia i nieefektywne zarządzanie nimi. Jest to szczególnie ważne dla przedsiębiorstw zajmujących się obróbką kompozytów drewnopochodnych, zaangażowanych w elastyczne systemy produkcyjne [21, 22].



Rys. 1. Połączenie informacji o stanie procesu obróbki w czasie rzeczywistym z ogólnym systemem informacji produkcyjnej

4.3. Zdefiniowanie i uzasadnienie wyboru obszaru badawczego

Ocena skrawalności i skrawności jest kluczowym zagadnieniem zarówno z praktycznego, jak i naukowego punktu widzenia. Podstawą do ich wyznaczania może być wiele kryteriów i wskaźników dotyczących m.in. oporów skrawania, jakości obróbki czy trwałości narzędzi. Szczególnie ten ostatni wskaźnik się istotny z praktycznego punktu widzenia. Podczas realizacji badań własnych okazało się, że obróbka powszechnie stosowanych kompozytów drewnopochodnych stwarza wiele poważnych problemów. Związane jest to chociażby z przedwczesnym i, co bardzo istotne, nieprzewidywalnym zużyciem ostrzy narzędzi.

Rozwój monitorowania narzędzi w obróbce kompozytów drewnopochodnych opiera się w dużej mierze na badaniach pierwotnie przeprowadzonych w kontekście skrawania metali [23, 24]. Podczas gdy technologie monitorowania koncentrowały się przede wszystkim na skrawaniu metali, przeprowadzono niewiele badań poświęconych ich zastosowaniu w obróbce kompozytów drewnopochodnych. Tę lukę można przypisać kilku czynnikom, w tym inherentnym ograniczeniom samych technologii monitorowania [25]. 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.

Te postępy uitorowały drogę do wdrożenia systemów monitorowania procesu w obróbce kompozytów drewnopochodnych. Istniejące obecnie wyzwania związane ze stosowaniem monitorowania procesów obróbki kompozytów drewnopochodnych wynikają głównie z niestabilności sygnału

wynikającej ze szczególnych właściwości kompozytów 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 można rozwiązać. Jest to możliwe poprzez zastosowanie przetwarzania wielosygnałowego, ukierunkowanej redukcji szumów i dostosowanym algorytmem podejmowania decyzji.

Jednak pomimo tych postępów, istniejące podejścia do zastosowania systemów monitorowania procesu skrawania kompozytów drewnopochodnych nadal napotykać kilka ograniczeń [26]. Po pierwsze, badania ukierunkowane konkretnie na systemy monitorowania procesów obróbki kompozytów drewnopochodnych pozostają skąpe i nie uwzględniają w pełni praktycznych wyzwań rzeczywistych środowisk produkcyjnych. Po drugie, obecne systemy monitorowania w obróbce metali są często projektowane do konkretnych procesów obróbki, takich jak frezowanie lub wiercenie, co ogranicza ich generalizację [27].

Przedstawione przeze mnie badania mają na celu uzupełnienie luk między mechanizmami skrawania kompozytów 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 kompozytów drewnopochodnych jak i możliwości implementacji systemów monitorowania z branży obróbki metali. W porównaniu ze skrawaniem metali, przeprowadzono niewiele badań nad monitorowaniem obróbki skrawaniem kompozytów 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 diagnostycznego stwarza kilka ograniczeń pod względem zarówno dokładności, jak i stabilności [28]. W kontekście monitorowania skrawania kompozytów 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 [29].

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 stanu procesu w obróbce kompozytów drewnopochodnych, zwłaszcza w złożonych warunkach skrawania i rzeczywistych warunkach produkcyjnych.

Na podstawie analizy wcześniejszych badań własnych nad tymi systemami **zidentyfikowałem luki badawcze w rozwoju systemów monitorowania procesów obróbki kompozytów drewnopochodnych:**

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

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

3. Wybór ekonomicznych, odpornych na zakłócenia czujników: Opracowanie metodyki instalacji na obrabiarkę czujników ma kluczowe znaczenie dla ograniczenia przypadkowych zakłóceń na dokładność sygnału podczas obróbki kompozytów 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 stanu narzędzi skrawających.

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 kompozytów drewnopochodnych w trakcie obróbki, utrzymując adaptacyjność systemu w dynamicznych środowiskach produkcyjnych.

4.4. Charakterystyka celu naukowego, zakresu badań, warunków badań, wyników oraz oryginalnego wkładu

Rosnące zapotrzebowanie na automatyzację procesów obróbki, napędzane rosnącymi kosztami pracy i rygorystycznymi wymaganiami jakościowymi, sprawiło, że monitorowanie procesów stało się nieuniknioną koniecznością. Zastosowanie automatyzacji w obróbce kompozytów drewnopochodnych wiąże się z zapewnieniem układów monitorujących stan zużycia ostrza narzędzi skrawających jak i jakość powierzchni obrobionej.

Moje zainteresowania naukowe i z tym związane badania, łączą tradycyjną teorią obróbki materiałów metalowych i kompozytów drewnopochodnych, stanowi podstawę do opracowania podstaw systemów monitorowania, które przyczynią się zarówno do modernizacji branży meblarskiej, jak i osiągnięcia celów zrównoważonego rozwoju. W pracy zaproponowałem autorską koncepcję i metodykę monitorowania procesu skrawania kompozytów drewnopochodnych, porównując konkretne dane empiryczne i studia przypadków z przeprowadzonych przeze mnie badań. Przeprowadziłem analizę badań związanych ze specyfiką materiałów występującą w obróbce kompozytów drewnopochodnych. Przeprowadziłem analizę możliwości implementacji przemysłowych czujników i ocenę sygnałów diagnostycznych pod kątem ich zastosowania w układach monitorujących proces skrawania. Dokonałem eksploracji technik akwizycji i metod przetwarzania sygnałów diagnostycznych dostosowanych do specyficznych warunków obróbki kompozytów drewnopochodnych. Aby wzmocnić argumentację na rzecz tych systemów, określiłem również potencjalne korzyści ekonomiczne wynikające z wdrożenia monitorowania w procesach skrawania kompozytów drewnopochodnych.

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

Za cel osiągnięcia naukowego w zakresie utylitarnym przyjąłem opracowanie założeń, algorytmów funkcjonowania wirtualnego układu monitorowania procesu skrawania kompozytów drewnopochodnych i jego implementacja w warunkach produkcyjnych.

Z kolei za **cel w zakresie naukowo – badawczym** przyjąłem:

- analizę stanu ostrza narzędzia oraz analizę przebiegu zużycia i trwałości ostrza w wybranych odmianach obróbki skrawaniem kompozytów drewnopochodnych,
- analizę oddziaływań pomiędzy parametrami nastawnymi procesu, a wskaźnikami technologicznymi (stan technologicznej warstwy wierzchniej) i fizycznymi (siły i moment skrawania, temperatura skrawania, wióry).

Cele osiągnięcia naukowego zdefiniowałem na podstawie przeprowadzonej analizy literatury oraz wyników dotychczasowych badań własnych. Realizację celów zaplanowałem poprzez przeprowadzenie badań doświadczalnych i symulacyjnych, analizy wyników oraz modelowania empirycznego, analitycznego i numerycznego.

Osiągnięcie celów wymagało określenia właściwego zakresu badań uwzględniającego zarówno techniki pomiarów i archiwizacji danych pomiarowych, jak również podejście technologiczne oraz analizę wskaźników jakościowych procesu i stanu technologicznej warstwy wierzchniej.

4.4.1. Zaproponowana metodyka określania właściwości dynamicznych kompozytów

Z uwagi, że część moich badań dotyczy połączeń hybrydowych materiałów o odmiennych właściwościach mechanicznych opracowałem metodykę pomiaru i analizy wybranych właściwości dynamicznych tego typu połączeń. Do oceny skuteczności zaproponowanej metodyki zastosowałem CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) i sklejkę (dwa skrajnie różne materiały). Chociaż wielu badaczy przeprowadziło badania nad wytrzymałością połączeń hybrydowych kompozytów drewnopochodnych, opublikowana literatura analizująca właściwości dynamiczne takich połączeń jest bardzo ograniczona. Zarówno kompozyty drewnopochodne jak i CFRP są materiałami anizotropowymi, tzn. ich właściwości mechaniczne różnią się w różnych kierunkach przestrzennych.

Znajomość dynamicznych właściwości pozwala na przyjęcie takich parametrów skrawania, które pomogą zapobiec występowaniu drgań w procesie skrawania. Określiłem sztywność statyczną i dynamiczną powstałego połączenia. Większość badań opisanych w literaturze dotyczy poprawy wytrzymałości konstrukcji bez analizy właściwości dynamicznych. Zaproponowałem prostą i przyjazną dla użytkownika metodykę analizy tłumienia drgań układu typu „sandwich”. Wyniki powyższej analizy pozwalają także na jej zastosowanie do określenia modułu sprężystości materiału oraz charakterystyki częstotliwościowej uzyskanego połączenia.

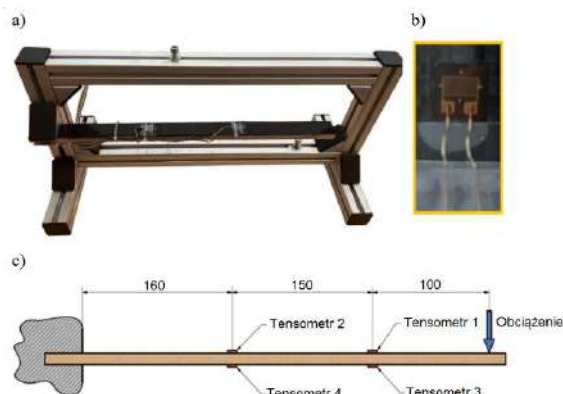
W badaniach określiłem również wpływ zmiany położenia osi obojętnej podczas zginania. Znajomość dokładnego położenia osi obojętnej pozwala na precyzyjne określenie parametrów wytrzymałościowych klejów użytych w procesie łączenia, a także wpływu defektów wewnętrznych na wytrzymałość uzyskanego połączenia. Właściwości mechaniczne kompozytów drewnopochodnych mogą ulec znacznej zmianie w wyniku obecności defektów wewnętrznych. Przesunięcie osi obojętnej znacząco wpływa na zmianę wartości naprężeń rozciągających i ściskających.

Schematyczny diagram konfiguracji toru pomiarowego i systemu archiwizacji danych pomiarowych pokazano na rys. 2.



Rys. 2. Tor pomiarowy do analizy odkształceń i charakterystyki dynamicznej

Wartość odkształceń belki podczas zginania mierzyłem za pomocą tensometrów, które zostały naklejone na belce wg konfiguracji przedstawionej na rys. 3.



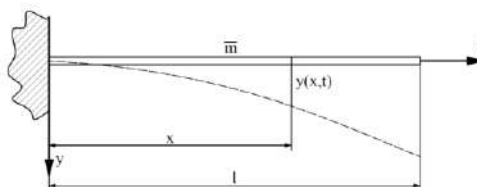
Rys. 3. Pomiar odkształceń belki: a) stanowisko pomiarowe, b) tensometr

Odpowiedź układu na wymuszenie (impuls Diraca) wyznaczyłem na podstawie odkształceń zarejestrowanych przez układu tensometryczny. W tym celu opracowałem w środowisku LabVIEW aplikację pozwalającą na wyznaczenie częstotliwości drgań własnych na podstawie zarejestrowanych sygnałów odkształceń.

Znając sygnał siły wymuszającej oraz odpowiedź układu w postaci odkształcenia, dokonałem analizy modalnej umożliwiającej wyznaczenie częstotliwości drgań własnych belki (rys. 3a).

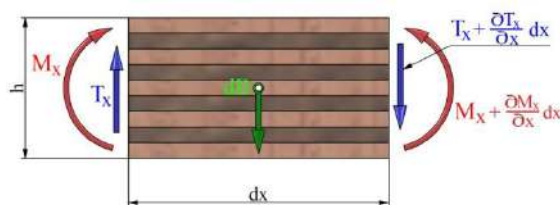
Podczas ruchu drgającej belki pokazanej na rys. 4 przemieszczenia y jej dowolnego punktu są funkcjami dwóch zmiennych niezależnych: odciętej x oraz czasu t (1):

$$y = f(x, t) \quad (1)$$



Rys. 4. Belka wspornikowa o masie m rozłożonej równomiernie wzdłuż całej rozpiętości l

Podczas ruchu drgającej każdy element belki podlega działaniu sił bezwładności powodowanych zmianami prędkości (przyspieszenia) ruchu. Siły zastępujące działanie odciętych części belki na rozpatrywany element, o nieskończenie małej długości dx pokazano na rys. 5.



Rys. 5. Siły zastępujące działanie odciętych części pręta na rozpatrywany element o nieskończenie małej długości dx

Ponadto na element działa siłą bezwładności równa (2):

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

gdzie: $m = m / l$.

Po wprowadzeniu zgodnie z zasadą d'Alemberta siły bezwładności korzysta się z równań równowagi. W zawiązku z tym możemy opisać warunek sumy rzutów sił na oś pionową (3):

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} dx + dB = 0 \quad (3)$$

Po podstawieniu wartości (2) otrzymuje się (4):

$$\frac{\partial T_x}{\partial x} - \bar{m} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (4)$$

Następnie stosujemy zależność między siłą poprzeczną a momentem zginającym (5):

$$\frac{\partial M_x}{\partial x} = T_x \quad (5)$$

oraz równanie różniczkowe osi odkształconej belki zginanej (6):

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = - \frac{M_x}{EJ} \quad (6)$$

Po wprowadzeniu przytoczonych zależności do (3) i uporządkowaniu uzyskamy cząstkowe różniczkowe równanie liniowe czwartego rzędu (7):

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{EJ}{\bar{m}} \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = 0 \quad (7)$$

Jest to równanie swobodnych drgań poprzecznych belki o masie równomiernie rozłożonej, przy pominięciu wpływu sił poprzecznych oraz sił bezwładności w ruchu obrotowym.

Ograniczyłem się do poszukiwania tylko takich rozwiązań równania (7), które określają tzw. „falę stojącą”. W takim przypadku rozwiązanie szczególne 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 (8):

$$y = X(x) T(t) \quad (8)$$

przy czym funkcja $X(x)$ określa typ drgań własnych i nosi nazwę funkcji własnej postaci drgań danego układu, natomiast $T(t)$ jest funkcją czasu. Cząstkowe pochodne równania (8) zapisać można w postaci (9) i (10):

$$\frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = X(x) \frac{d^2 T(t)}{dt^2} \quad (9)$$

$$\frac{\partial^4 y}{\partial x^4} = T(t) \frac{d^4 X(x)}{dx^4} \quad (10)$$

Cząstkowe pochodne funkcji y zostały wyrażone przez pochodne zwyczajne, podstawiając zależności (9) i (10) do równania (7):

$$X(x) \frac{d^2 T(t)}{dt^2} + \frac{EJ}{\bar{m}} T(t) \frac{d^4 X(x)}{dx^4} \quad (11)$$

stąd (12):

$$\frac{EJ}{\bar{m}} \frac{d^4 X(x)}{dx^4} = - \frac{d^2 T(t)}{dt^2} \quad (12)$$

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 (12) ostatecznie nie zależy od zmiennych x oraz t , czyli że każda z nich jest równa stałej licznie, którą oznaczymy ω^2 . Wniosek ten wynika również z tego, że równość (12) 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 (13) i (14):

$$\frac{d^2T(t)}{dt^2} + \omega^2 T(t) = 0 \quad (13)$$

$$\frac{d^2X(x)}{dx^2} - \omega^2 \frac{\bar{m}}{EJ} X(x) = 0 \quad (14)$$

Równania te mają następujące rozwiązania:

$$T(t) = A \sin(\omega t + \lambda_0) \quad (15)$$

świadczące o tym, że rozpatrywany ruch jest ruchem drgającym o częstotliwości ω ,

$$X(x) = C_1 \sin \alpha x + C_2 \cos \alpha x + C_3 \sinh \alpha x + C_4 \cosh \alpha x \quad (16)$$

opisujące formy drgań.

W równaniu (16) wprowadziłem oznaczenie (17):

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{\bar{m} \omega^2}{EJ}} \quad (17)$$

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 ψ_x są równe zero, natomiast dla swobodnego końca belki ($x=l$) moment zginający M_x oraz siła poprzeczna T_x są równe zero:

$$x = 0, y_x = X(x) = 0, \psi_x = \frac{dX(x)}{dx} = 0 \quad (18)$$

$$x = l, M_x = -EJ \frac{d^2X(x)}{dx^2} = 0, T_x = -EJ \frac{dX^3(x)}{dx^3} = 0 \quad (19)$$

Po podstawieniu równania (16) do warunków (18) i (19) otrzymałem zależność pomiędzy stałymi (20):

$$C_2 + C_4 = 0, C_1 + C_3 = 0 \quad (20)$$

które podstawione do rozwiązania (16) dadzą dla trzeciego i czwartego warunku (18) i (19) dwa równania jednorodne.

Z kolei przyrównanie do zera wyznacznika tych równań, jako warunku koniecznego i wystarczającego istnienia rozwiązania, doprowadzi do następującej zależności (21):

$$\cos \alpha l \cdot \cosh \alpha l = -1 \quad (21)$$

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 α (22):

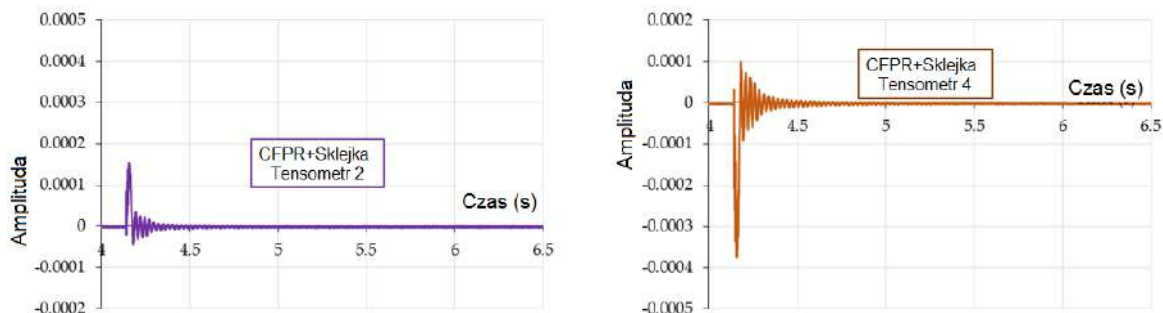
$$\alpha_1 = \frac{1.875}{l}, \alpha_2 = \frac{4.694}{l}, \alpha_3 = \frac{7.855}{l}, \text{ itd.} \quad (22)$$

Zależność między częstotliwością drgań własnych a wielkością α określić można wzorem (17).

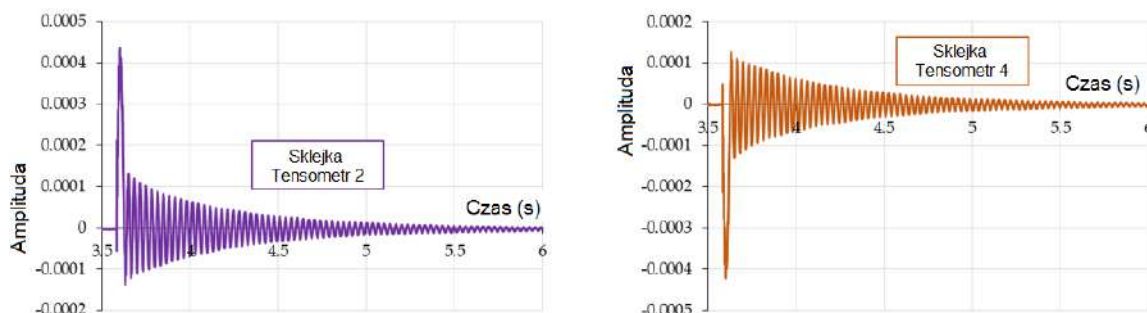
Obliczone na tej podstawie częstotliwości drgań omawianej belki, licząc od najniższej podstawowej, przedstawiają się następująco (23):

$$\omega_1 = \frac{3.516}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \omega_2 = \frac{22.034}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \omega_3 = \frac{61.701}{l^2} \sqrt{\frac{EJ}{m}}, \text{ itd.} \quad (23)$$

Rysunki 6 i 7 przedstawiają przykłady przebiegów czasowych amplitudy wychylenia ze stanu równowagi badanych połączeń hybrydowych.



Rys. 6. Przebiegi czasowe amplitudy odkształcenia sklejki wzmocnionej CFRP



Rys. 7. Przebiegi czasowe amplitudy odkształcenia sklejki

Znając sygnał siły wymuszającej oraz odpowiedź układu w postaci przyspieszenia, dokonałem analizy modalnej umożliwiającej wyznaczenie częstotliwości drgań własnych badanych materiałów.

Znając wartość pierwszej częstotliwości własnej belki ω_1 oraz geometrię możemy z zależności (23) wyznaczyć moduł sprężystości ($E = MoE$). Wyznaczony za pomocą metody dynamicznej moduł sprężystości dla sklejki wzmocnianej laminatem CFRP wyniósł $MoE = 401 \text{ MPa}$. Natomiast wartość modułu sprężystości sklejki odnotowano jako wartość $MoE = 2348 \text{ MPa}$. 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 sklejki wzmocnionej CFRP i $MoE = 2238 \text{ MPa}$ dla sklejki.

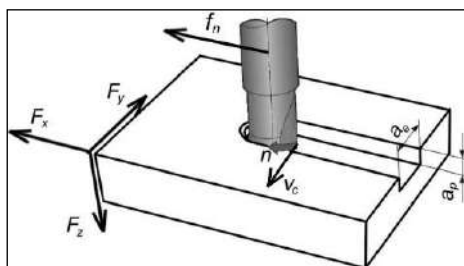
4.4.2. Konfiguracja stanowisk badawczych stosowanych w badaniach

W badaniach trwałościowych narzędzi skrawających dotyczących obróbki frezowania zastosowałem frezy ze stali szybko tnącej o średnicy 14 mm (rys. 8a) i frezy z ostrzami z węgla spiekane go o średnicy 12 mm (rys. 8b).



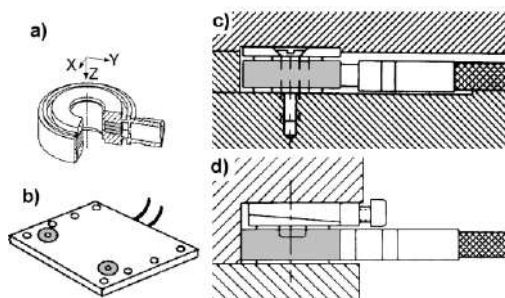
Rys. 8. a) b) Narzędzia skrawające i c) centrum obróbcze

Badania przeprowadziłem na centrum obróbczym CNC Busellato Jet 100 (rys. 8c). Jako kryterium zużycia przyjęto maksymalne zużycie powierzchni przyłożenia ostrza VB_{max} . Zgodnie z normą ISO 8688-1:1996 [30], w przypadku ostrzy ze stali szybko tnącej, jako wartość graniczną tego wskaźnika zużycia przyjęto wartość $VB_{max} = 1$ mm. Dla węgla spiekane go 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. 9) przyjęto poniższy rozkład składowych siły.



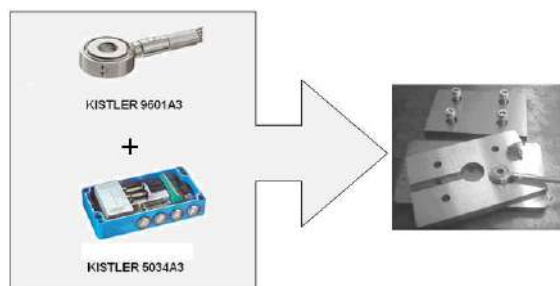
Rys. 9. Rozkład składowych siły przy frezowaniu

W badaniach zastosowałem przemysłowy piezoelektryczny czujnik pomiaru sił. Czujniki te typowo instaluje się tak, by przenosiły jedynie niewielką część obciążenia, (do 10%), co zasadniczo odróżnia je od klasycznych siłomierzy laboratoryjnych. Dzięki temu sztywność czujnika jest ok. dziesięciokrotnie większa niż w siłomierzu, a sam czujnik jest zabezpieczony przed zniszczeniem przez przeciążenie. Z drugiej strony instalacja czujnika nie wpływa na sztywność obrabiarki. Zalecane są trzy główne konfiguracje instalacji czujnika (rys. 10):



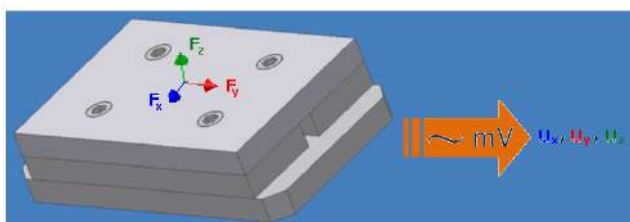
Rys. 10. Trójskładowy czujnik sił skrawania

Czujnik zabudowano wg konfiguracji „płyta pomiarowa” (rys. 10c i 11).



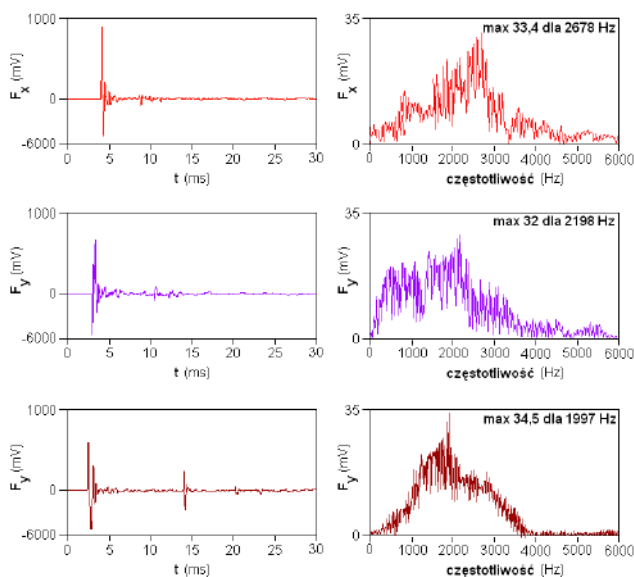
Rys. 11. Platforma pomiarowa wraz z zainstalowanym czujnikiem siły skrawania

Chcąc określić zależność pomiędzy siłą działającą na układ pomiarowy (wejście), a sygnałem w postaci napięcia uzyskanym na wyjściu z układu (rys. 12) wyznaczyłem charakterystykę statyczną zbudowanego układu do pomiaru siły skrawania.



Rys. 12. Zależność pomiędzy siłą na wejściu a sygnałem pochodzącym z czujnika na wyjściu

Dokładność przedstawionego układu do pomiaru sił 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. Widma otrzymanych sygnałów (rys. 13) 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. 13. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa układu do pomiaru sił

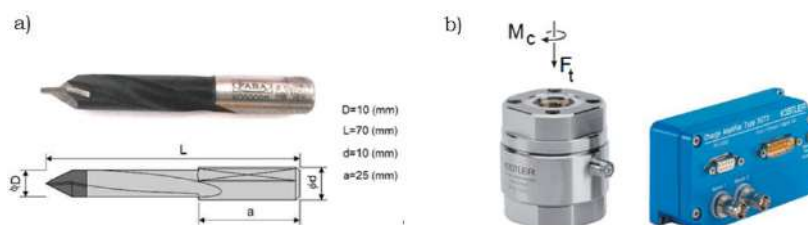
Badania trwałości ostrzy freza ze stali szybko tnącej wykonywane były na płycie wiórowej laminowanej z głębokością skrawania $a_p = 6$ mm i szerokością frezowania $a_e = 14$ mm. Wykonywano

próby dla pięciu wartości prędkości obrotowych freza n : 6000, 9000, 12000, 15000, 18000 obr/min. Dla każdej wartości prędkości obrotowej wykonywano trzy pełne próby trwałościowe.

W ramach badań prowadzonych na surowej płycie wiórowej również wykonywano pięć prób trwałościowych ostrzy narzędzi skrawających, wykonanych z węgliku spiekane go. 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 .

Do analizy zarejestrowanych wyników badań przygotowałem 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 .

W badaniach trwałościowych narzędzi skrawających dotyczących obróbki wiercenia materiałem obrabianym była płyta wiórowa laminowana. Eksperymenty przeprowadzono z użyciem wiertel z ostrzami z węgliku spiekane go (rys. 14a) gatunku K20, średnicy 10 mm, kącie pochylenia linii śrubowej 20° i kącie wierzchołkowym 60° .

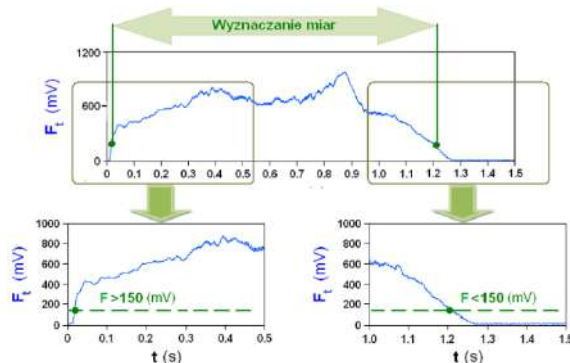


Rys. 14. a). narzędzie skrawające, b). czujnik siły osiowej i momentu skrawania typu 9345B2 wraz z przedwzmacniaczem ładunku 5073A211

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

Do analizy uzyskanych zarejestrowanych sygnałów opracowałem 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, wyznaczane 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. 15.



Rys. 15. Sposób wyznaczania miar sygnału siły F_t i momentu skrawania M_c

Oprócz przyjętego wskaźnika zużycia ostrza zdecydowano się na zastosowanie kolejnego wskaźnika zużycia, tj. długości cięciwy naroży VBK_E.

W badaniach dotyczących skrawalności jako materiał obrabiany zastosowano płytę MDF. Jako narzędzie skrawające zastosowano wiertło o średnicy 9,3 mm z nasadzonym ostrzem. Ostrza wykonane z węgla spiekane P15 o kącie przystawienia $\kappa_r=90^\circ$ i kącie natarcia $\gamma_o=15^\circ$.

Na rysunku 16 przedstawiono schemat toru pomiarowego stosowanego w badaniach. Ponadto, po każdym wywierconym otworze, przeprowadzano pomiar grubości uzyskiwanego wióra. Pomiary te realizowano na mikroskopie optycznym wyposażonym w kamerę cyfrową.



Rys. 16. Tor pomiarowy

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.

W badaniach dotyczących oporów skrawania zastosowano typowe narzędzie skrawające przeznaczone do materiałów drewnopochodnych wiertło jednoostrzowe o średnicy 10 mm z ostrzami z Polycrystalline Diamond (PCD). Proces wiercenia przeprowadzono na frezarce CNC. Schematyczny diagram konfiguracji toru pomiarowego i systemu archiwizacji danych pomiarowych przedstawiono na rys. 17. 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.



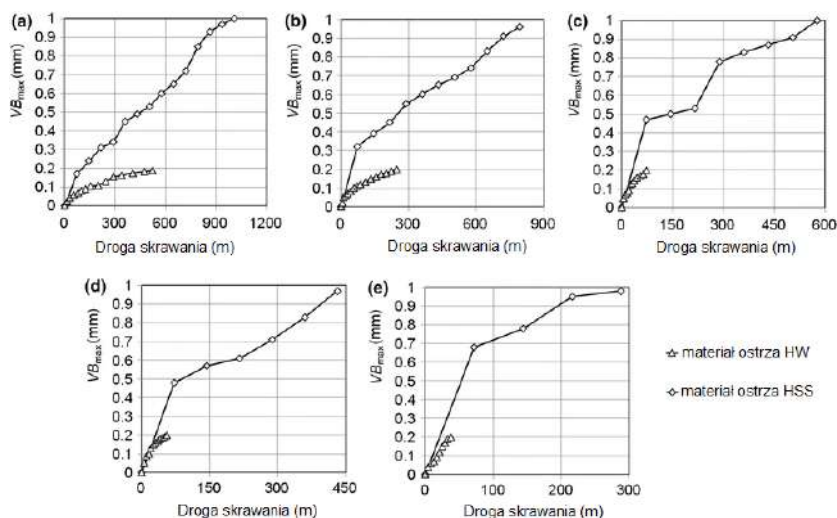
Rys. 17. Konfiguracja eksperymentalna i schemat systemu akwizycji danych

4.4.3. Wpływ parametrów skrawania na przebieg obróbki

Frezowanie

Analizę statystyczną wyników z wykorzystaniem wielowymiarowej analizy wariancji przeprowadzono za pomocą programu STATISTICA. 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. 18. 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) $n = 12000$ obr/min, d) $n = 15000$ obr/min, e) $n = 18000$ obr/min

Zaobserwowano istotny wpływ prędkości skrawania na trwałość ostrza (rys. 18). 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 węgliką 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 węgliką spiekanego przy prędkości wynoszącej 18000 obr/min wynosiła 290 m.

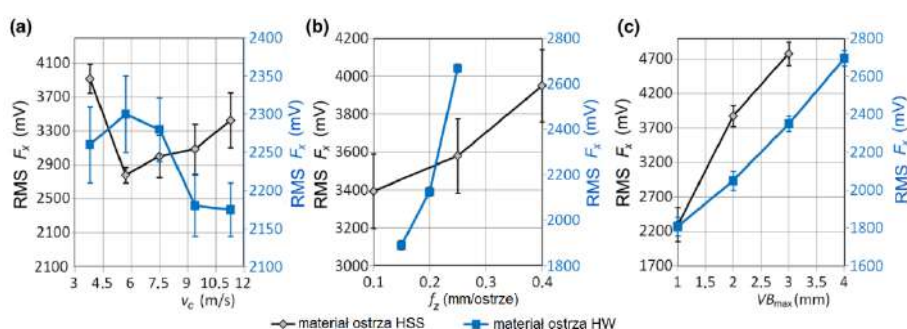
Rozpatrując obróbkę przy najwyższej wartości prędkości obrotowej, droga skrawania ostrza freza z węgliką spiekanego dla osiągnięcia założonej wartości VB_{max} była około ośmiokrotnie większa niż w przypadku freza ze stali szybko tnącej. Jednocześnie założona wartość przyjętego wskaźnika zużycia ostrza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

Jak stwierdzili Porankiewicz i in. [31], zużycie ostrzy ze stali szybko tnącej w procesie skrawania materiałów drewnopochodnych jest intensywniejsze od zużycia ostrzy z węgliką spiekanego. Zastosowanie narzędzi z ostrzami z węgliką spiekanego mogłoby dać lepsze rezultaty, jednak występują duże przypadkowe wykruszenia krawędzi skrawającej znacznie obniżając jego wydajność [32]. Plastov [33] stwierdził, że jakość frezowania płyt wiórowych laminowanych maleje wraz ze wzrostem zużycia ostrza.

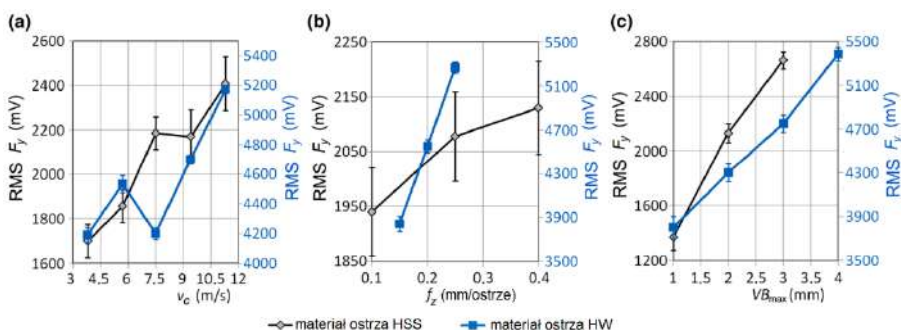
Zmiana zużycia ostrza w trakcie skrawania jest procesem ciągłym, dlatego w analizie przyjęto następujące zakresy zmian zużycia ostrza narzędzia ze stali szybko tnącej: $VB_1 = 0 - 0,04$ mm, $VB_2 = 0,405 - 0,7$ mm i $VB_3 = 0,705 - 1$ mm. W przypadku freza z węgliką spiekanego przyjęto następujące zakresy zmian zużycia ostrza: $VB_1 = 0 - 0,05$ mm, $VB_2 = 0,055 - 0,1$ mm, $VB_3 = 0,105 - 0,15$ mm i $VB_4 = 0,155 - 0,2$ mm.

Wyniki analizy dla obu materiałów frezów 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 spiekane go zaobserwowano statystycznie istotne interakcje między parametrami VB_{max} i f_z (przy $p = 0,027$) oraz VB_{max} i v_c (przy $p = 0,042$).

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 y 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 skutkowa ł wzrostem wartości średniokwadratowych sygnałów F_x (rys. 19) i F_y (rys. 20).



Rys. 19. 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

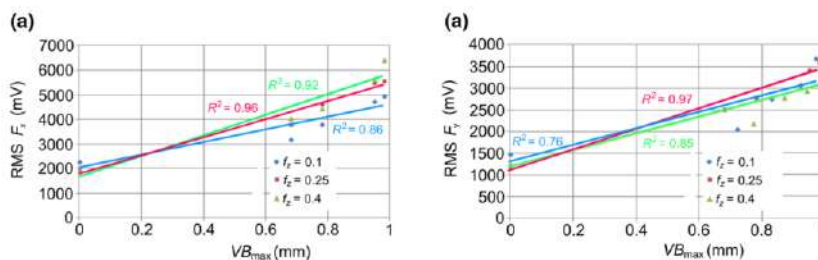


Rys. 20. Wpływ parametrów skrawania a) prędkości skrawania v_c i b) posuwu na ostrze f_z oraz c) zużycia ostrza na wartość średniokwadratową (RMS) sygnałów siły F_y

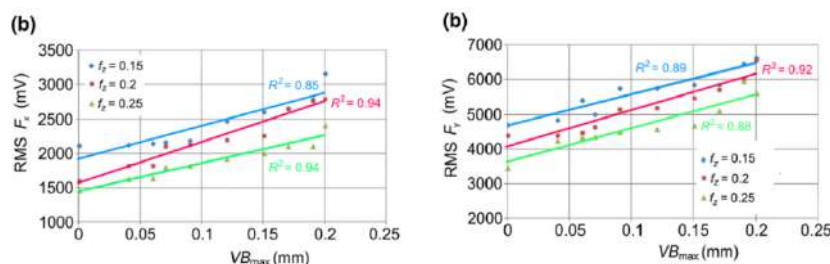
Gaitonde i in. [34] stwierdzili, że do skrawania materiału potrzebna jest mniejsza siła skrawania, co skutkuje minimalną delaminacją. Palmqvist i in. [35] opisali bardzo istotny wpływ zmian siły skrawania podczas obróbki rotacyjnej. Co więcej, według Kowaluka i in. [36] podstawowym parametrem, który pomaga skutecznie diagnozować operację frezowania, jest siła normalna do kierunku posuwu.

Dla freza, które ostrza zostały wykonane ze stali szybkotnącej, w zakresie maksymalnego zużycia VB 0 – 0,4 mm, nie zaobserwowano wpływu zużycia ostrza na wartość sygnałów siły F_x i F_y (rys. 21a i 22a). 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. 21b i 22b). 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 .



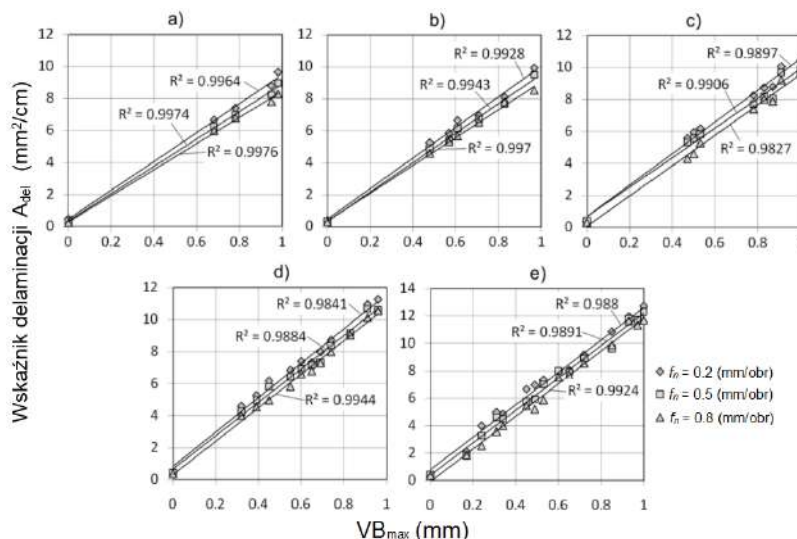
Rys. 21. Zależność średniej kwadratowej (RMS) sygnału siły F_x od zużycia ostrza przy $v_c = 13,9$ m/s dla narzędzia z ostrzami a) ze stali szybko tnącej i b) z węgla spiekane go



Rys. 22. 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

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 przyjąć wskaźnik A_{del} na długości pomiarowej L_p równej 165 mm.



Rys. 23. Zależność współczynnika delaminacji A_{del} od zużycia narzędzia ze stali szybko tnącej

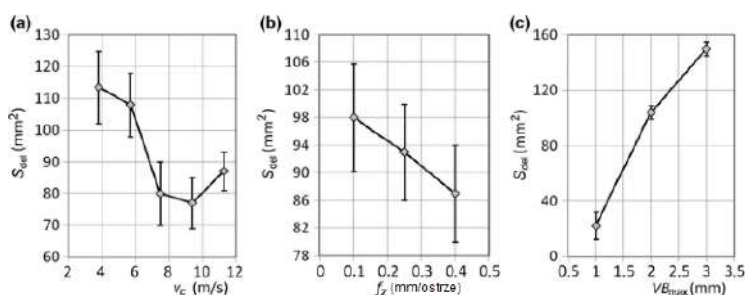
Rysunek 23 przedstawia zależność między współczynnikiem rozwarstwienia A_{del} , a wskaźnikiem zużycia ostrza VB_{max} dla wszystkich prędkości stosowanych w badaniach. Obserwuje się nie tylko wyraźną zależność między zużyciem ostrza VB_{max} , a współczynnikiem delaminacji A_{del} . Zaobserwowano pływ prędkości skrawania, im mniejsza wartość prędkości tym większy obszar delami-

nacji, 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. [37]. Do tego samego wniosku doszli Davim i in. [38], którzy stwierdzili, że dzięki zastosowaniu wyższej prędkości skrawania możliwe jest zmniejszenie tendencji do delaminacji podczas frezowania.

Podobne wyniki uzyskali Gaitonde i in. [39], stwierdzili, że jakość powierzchni płyty MDF obrabianej 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. [40], którzy badali zmianę chropowatości powierzchni podczas frezowania płyt MDF w zakresie prędkości posuwu od 0,5 do 5 m/min. Autorzy ci stwierdzili, że delaminacja 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. 24) potwierdziły, że wartość zużycia ostrza freza ze stali szybkołatającej 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. [41] stwierdzili, że wraz ze wzrostem wartości prędkości skrawania zmniejsza się współczynnik delaminacji. Gaitonde i in. [39] zaobserwowali, że skrawanie z dużą prędkością skrawania odgrywa główną rolę w redukcji uszkodzeń podczas frezowania kompozytów wzmocnionych włóknem węglowym. W kolejnych badaniach Davim i in. [42] wskazują również, że delaminacja wzrasta wraz z posuwem i prędkością skrawania dla obu materiałów narzędziowych, HSS i węgla spiekane.

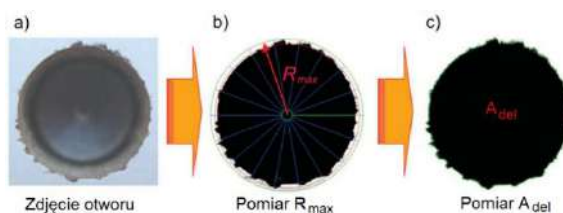
Podsumowując, zmiana zarówno wartości prędkości skrawania, jak i wskaźnika zużycia ostrza ma statystycznie istotny wpływ na pole powierzchni delaminacji. Jednakże zmiana posuwu na ostrze nie ma istotnego wpływu ($p = 0,092$). Nie zaobserwowano statystycznie istotnego synergicznego efektu analizowanych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



Rys. 24. 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 szybkołatającej

Wiercenie

W celu określenia jakości powierzchni wokół otworu w badaniach postanowiłem przyjąć dwa najczęściej stosowane wskaźniki: maksymalny promień wyrwań laminatu R_{max} oraz pole powierzchni wyrwań laminatu A (rys. 25). Obydwa wskaźniki wyznaczone 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} .



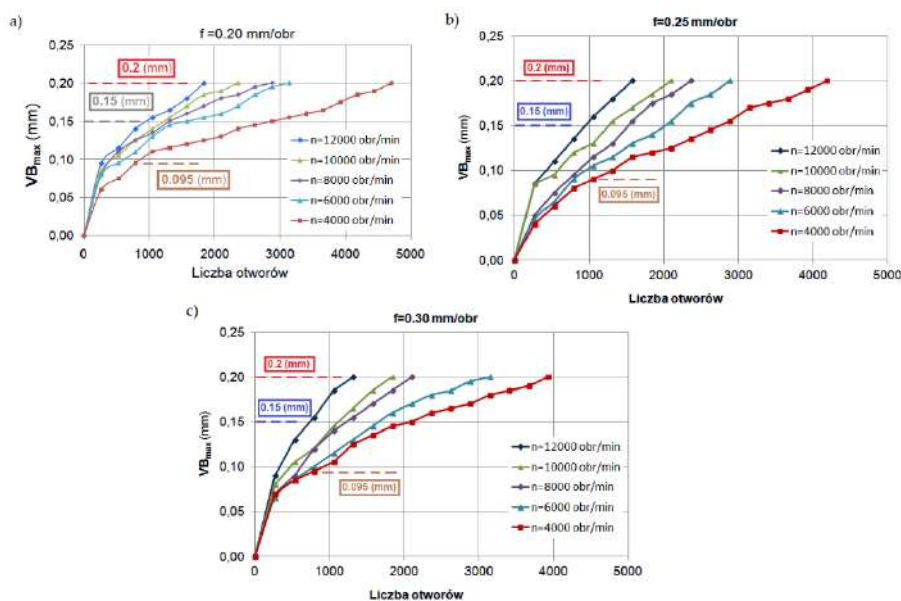
Rys. 25. Cyfrowe przetwarzanie obrazu w środowisku LabView: a) zdjęcie cyfrowe, b) c) zdjęcie po obróbce

Aby wyznaczyć przyjęte wskaźniki zarejestrowane obrazy przetwarzano w środowisku LabView (rys. 25).

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 [34, 43, 44, 45, 46]. 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} .

Zmiany wartości zużycia ostrza VB_{max} w funkcji liczby wywierconych otworów dla 3 prędkości posuwu i 5 prędkości skrawania przedstawiono na rys. 26a-c.

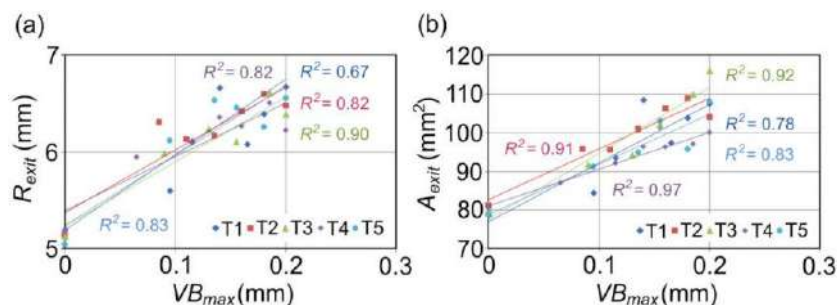


Rys. 26. Przebiegi zużycia narzędzia (VB_{max}) w funkcji liczby wykonanych otworów dla pięciu prędkości skrawania dla stałej wartości posuwu f

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 [39].

Z drugiej strony niskie wartości prędkości posuwu zawsze zapewniają minimalną siłę nacisku w celu zmniejszenia rozwarstwienia [34]. Badania przeprowadzone przez Davim i in. [38, 42] 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. [41]. 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. [37].

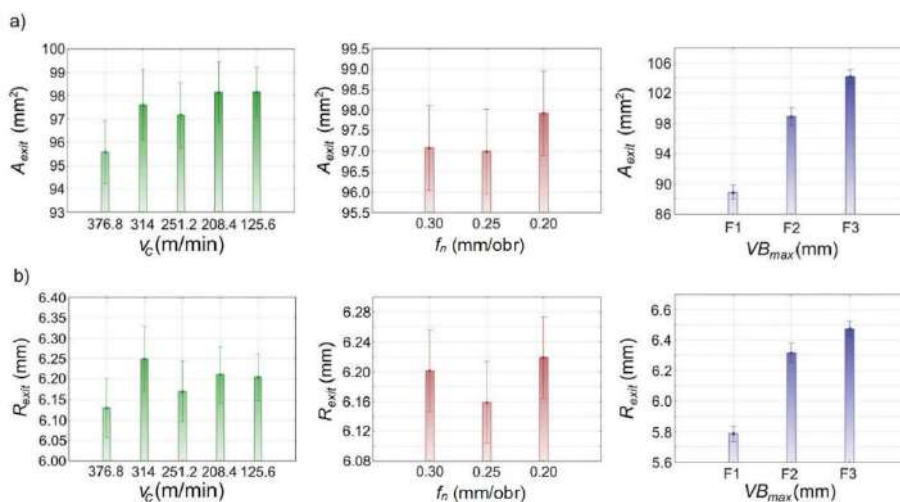
W trakcie analizy wyników badań zaobserwowano, że współczynniki VB_{max} i VB_{KE} są silnie skorelowane ($R^2 = 0,97$), dlatego w dalszych analizach wykorzystany zostanie jedynie wskaźnik VB_{max} . Aby ocenić wpływ zmian wartości parametrów procesu wiercenia i wskaźników zużycia wiertła na jakość powierzchni płyty wiórowej, zbadano ich korelację dla 5 testów trwałościowych. Najwyższą wartość współczynnika determinacji R^2 uzyskano dla zależności wartości VB_{max} i maksymalnego promienia obszaru delaminacji na wyjściu otworu R_{exit} (rys. 27a) oraz obszaru delaminacji na wyjściu otworu A_{exit} (rys. 27b).



Rys. 27. Wpływ zużycia ostrza na wskaźniki delaminacji: a) R_{exit} i b) A_{exit}

Stanowi to matematyczne potwierdzenie wniosków wyciągniętych na podstawie wizualnej analizy cyfrowych zdjęć stref delaminacji otworów. Oczekiwano, że obróbka z dużą prędkością zwiększy tempo zużycia ostrza, co z kolei pogorszy wykończenie powierzchni płyt MDF [47]. Jednakże płyty o niższej gęstości mają bardziej porowatą powierzchnię w porównaniu do płyt o wyższej gęstości [47].

Wyniki analizy (rys. 28a) 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. 28. Wpływ wybranych parametrów na wartość przyjętych wskaźników delaminacji

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. [41] również

potwierdzili istotną rolę prędkości skrawania w ewolucji współczynnika delaminacji. Prakash i Palanikumar [48] 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. [43] wykazała, że wzrost prędkości wrzeciona wpływa na zmniejszenie wartości siły osiowej podczas wiercenia płyt wiórowych MDF, natomiast wzrost prędkości posuwu wpływa na jej zwiększenie.

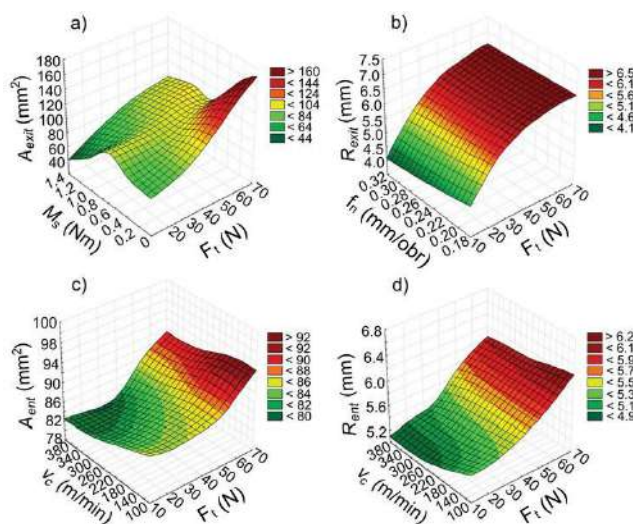
Wartość zużycia ostrza istotnie wpływa (przy $p < 0,001$) na proces delaminacji, wykorzystując do oceny zjawiska maksymalny promień obszaru uszkodzenia laminatu przy wyjściu narzędzia R_{exit} (rys. 28b).

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 [49].

Zmiana wartości prędkości skrawania i posuwu nie wpływa istotnie na maksymalny promień obszaru delaminacji R_{exit} . Nie stwierdzono statystycznie istotnej interakcji między analizowanymi czynnikami.

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} . 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. 29a). 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. [50], którzy wskazali, że wartości siły osiowej i momentu skrawania rosną wraz ze średnicą wiertła i prędkością posuwu, ze względu na wzrost powierzchni ścinania.



Rys. 29. 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}

Wyniki przedstawione na rys. 29b 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. 29b, c). Oczywiście jest, że siła osiowa maleje wraz ze wzrostem prędkości skrawania [34]. Niższe siły skrawania implikują wolniejsze zużycie ostrza, ponieważ oczekuje się, że wielkości sił skrawania będą silnie powiązane z tempem jego zużycia [47].

Trwałość ostrzy wiertel stosowanych w obróbce materiałów drewnopochodnych zależy od wielu kombinacji parametrów skrawania oraz zużycia ostrza wiertła.

Wykazano, że w procesie wiercenia płyty wiórowej wiertłem z węgla spiekanego 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.

4.4.4. Ekonomiczna i wydajnościowa obróbka kompozytów drewnopochodnych

Frezowanie

Ekonomiczna i wydajnościowa obróbka to optymalizacja procesów produkcyjnych, zwłaszcza obróbki skrawaniem CNC, poprzez integrację parametrów kinematycznych (prędkość skrawania, prędkość posuwu), dobór odpowiednich narzędzi skrawających, monitorowanie danych i eliminację "wąskich gardeł", co prowadzi do skrócenia czasów cyklu, redukcji odpadów i obniżenia kosztów, zachowując jednocześnie wysoką precyzję i jakość. Wobec czego, zaproponowałem metodykę wyznaczania ekonomicznej i wydajnościowej trwałości ostrza skrawającego.

Jednostkową wydajność obróbki q (24) można określić jako liczbę operacji wykonywaną w jednostce czasu. Jest ona odwrotnością czasu jednostkowego, który wyraża się zależnością (25).

$$q = \frac{1}{t_j} \quad (24)$$

$$t_j = t_m + \frac{t_z}{n_T} + t_p \quad (25)$$

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 (25) czynniki zależne od okresu trwałości ostrza. Podstawiając do zależności na czas maszynowy zależności (26) oraz (27) otrzymuje się (28):

$$n = \frac{1000v_c}{\pi D} \quad (26)$$

$$v_c = C_v T^{1/k} \quad (27)$$

$$t_m = \frac{\pi DL}{1000fC_v} T^{-1/k} = C_m T^{-1/k} \quad (28)$$

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 (29):

$$n_T = \frac{T}{t_{skr}} = \frac{T}{t_m} = \frac{1}{C_m} T^{1+1/k} \quad (29)$$

Podstawiając równanie (28) i (29) do zależności na czas maszynowy otrzymuje się zależność (30)

$$t_j = C_m T^{-1/k} + C_m T^{-1-1/k} t_z + t_p \quad (30)$$

Pochodna czasu jednostkowego po okresie trwałości wyniesie (31):

$$\frac{\partial t_j}{\partial T} = -\frac{1}{k} C_m T^{-1/k-1} + \left(-1 - \frac{1}{k}\right) C_m T^{-2-1/k} t_z \quad (31)$$

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 (32):

$$-\frac{1}{k} T_q + \left(-1 - \frac{1}{k}\right) t_z = 0 \quad (32)$$

a stąd ostatecznie (33):

$$T_q = (-k - 1) t_z \quad (33)$$

Temu okresowi trwałości ostrza odpowiada prędkość skrawania największej wydajności zgodnie z zależnością (34)

$$v_q = C_v T_q^{1/k} \quad (34)$$

Koszt operacji przedstawić można przy użyciu zależności (35):

$$K = t_m K_O + t_z \frac{K_O}{n_T} + \frac{K_N}{n_T} \quad (35)$$

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

Podstawiając do wzoru (35) zależności (27) i (28) otrzymuje się (36):

$$K = C_m T^{-1/k} K_O + (t_z K_O + K_N) C_m T^{-1-1/k} \quad (36)$$

Poszukuje się minimum kosztu w funkcji okresu trwałości ostrza. Różniczkując równanie (36) względem T otrzymuje się (37):

$$\frac{\partial K}{\partial T} = -\frac{1}{k} C_m T^{-1-1/k} K_O + \left(-\frac{1}{k} - 1\right) C_m (t_z K_O + K_N) T^{-2-1/k} \quad (37)$$

Pochodna ta przyjmuje wartość 0 dla $T=T_e$. Porównując zatem równanie (37) do zera i dzieląc otrzymane równanie przez $K_O C_m T_e^{-2-1/k}$ otrzymuje się (38):

$$-\frac{1}{k} T_e + \left(-\frac{1}{k} - 1\right) \left(t_z + \frac{K_N}{K_O}\right) = 0 \quad (38)$$

a stąd ostatecznie (39)

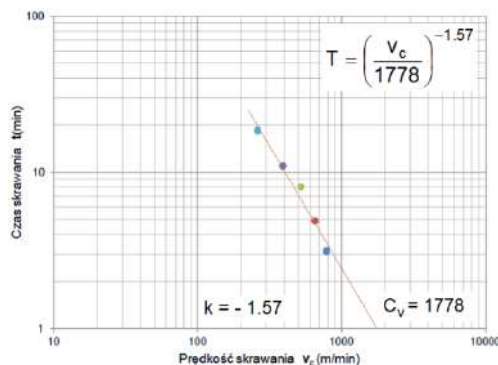
$$T_e = (-k - 1) \left(t_z + \frac{K_N}{K_O}\right) \quad (39)$$

Okresowa prędkość skrawania umożliwiająca uzyskanie tego okresu trwałości ostrza to ekonomiczna prędkość skrawania v_e określona zależnością (40):

$$v_e = C_v T_e^{1/k} \quad (40)$$

Na podstawie wyników przeprowadzonych badań, w postaci zależności prędkości skrawania od okresu trwałości ostrza skrawającego, przeprowadziłem analizę pod kątem określenia prędkości skrawania największej wydajności v_q i ekonomicznej prędkości skrawania v_e . Wartości prędkości ekonomicznej i największej wydajności określiłem zarówno dla narzędzia z ostrzami ze stali szybko-
kotnącej jak i z węgla spiekane go.

Na wykresie podwójnie logarytmicznym (rys. 30) przedstawiono wpływ prędkości skrawania na trwałość ostrza ze stali szybko-
kotnącej dla pięciu prób trwałościowych T1 – T5 prowadzonych z różnymi (przyjętymi) prędkościami skrawania.



Rys. 30. Wpływ prędkości skrawania na okres trwałość ostrza ze stali szybko-
kotnącej

Następnie określono wykładnik potęgowy k oraz stałą C_v w równaniu Taylora. W wyniku czego otrzymano równanie w postaci (41):

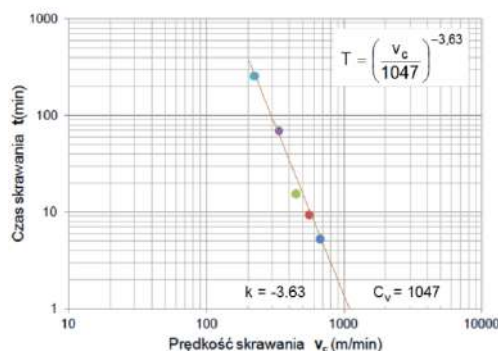
$$T = \left(\frac{v_c}{1778} \right)^{-1.57} \quad (41)$$

Wyniki prób trwałościowych dla freza z ostrzami z węgla spiekane go również naniesiono na wykres podwójnie logarytmiczny (rys. 33), a następnie określono zależność Taylora (42).

$$T = \left(\frac{v_c}{1047} \right)^{-3.63} \quad (42)$$

Na podstawie linii aproksymacji określono wartości parametrów w równaniu Taylora, które są niezbędne do oceny wartości prędkości skrawania v_q (34) i v_e (40):

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



Rys. 31. Wpływ prędkości skrawania na okres trwałość ostrza z węgla spiekane go

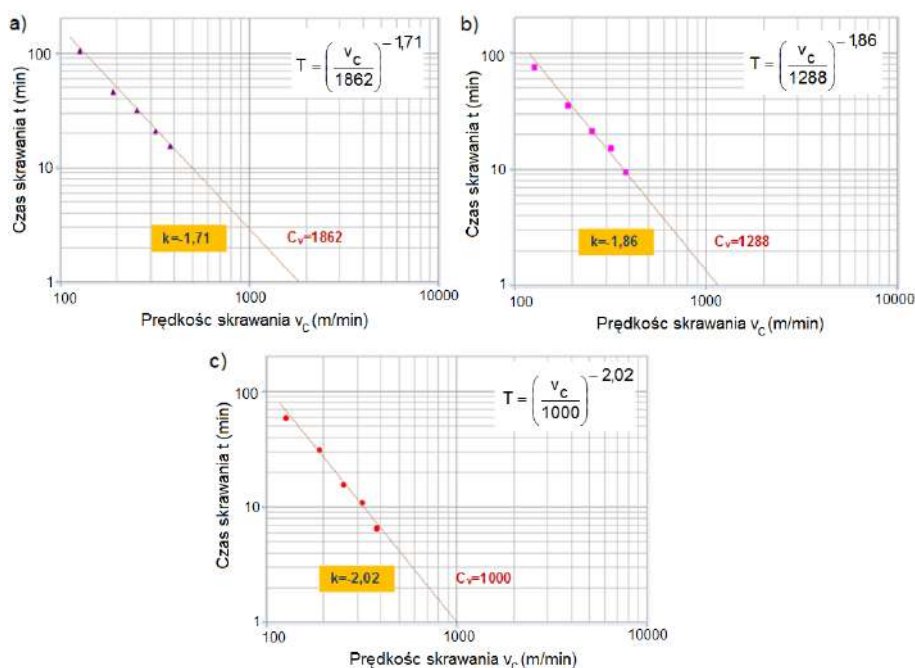
Aby określić prędkość skrawania odpowiadającą maksymalnej wydajności v_q , trwałość ostrza odpowiadającą najwyższej wydajności T_q , ekonomiczną prędkość skrawania v_e i ekonomiczną trwałość ostrza T_e (tab. 1), konieczne było przyjęcie wartości stałych w równaniach (34) i (40): t_z , K_0 , K_N .

Tabela 1. Parametry efektywnej i ekonomicznej obróbki tworzyw drewnopochodnych

Materiał 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		>18000	$T_q = 1,14$
	Ekonomiczny	5,92	11309	$T_e = 12,54$
Węgiel spiekany	Wydajnościowy		>18000	$T_q = 5,26$
	Ekonomiczny	4,7	9123	$T_e = 110,46$

Wiercenie

Na rysunku 32 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. 32. 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

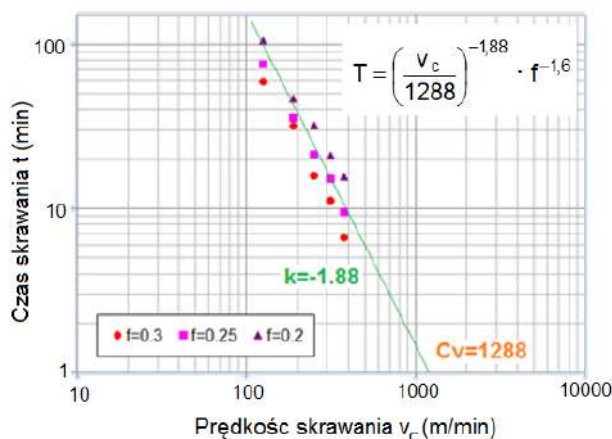
Poniżej przedstawiono uzyskane równania Taylora określające wpływ prędkości skrawania na trwałość ostrzy użytych wiertel. Łącznie uzyskano trzy równania, w zależności od stosowanego posuwu, w trakcie próby trwałościowej narzędzia. Dla wartości posuwu 0,2 mm/obr zależność Taylora opisana jest równaniem (43), dla posuwu 0,25 mm/obr – (44) dla posuwu 0,3 mm/obr – (45).

$$T = \left(\frac{v_c}{1862} \right)^{-1,71} \quad (43)$$

$$T = \left(\frac{v_c}{1288} \right)^{-1.86} \quad (44)$$

$$T = \left(\frac{v_c}{1000} \right)^{-2.02} \quad (45)$$

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. 33), a następnie wyznaczono C_v , a także współczynnik kierunkowy prostej k .



Rys. 33. Zależność okresu trwałości narzędzia od prędkości skrawania na wykresie podwójnie logarytmicznym dla trzech wartości posuwu

Wyznaczenie równania (46) pozwoliło na dokładne określenie wpływu posuwu na trwałość ostrza. Jak można zaobserwować dla zmniejszającej się wartości posuwu rośnie trwałość ostrza.

$$T = \left(\frac{v_c}{1288} \right)^{-1.88} \cdot f^{-1.60} \quad (46)$$

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 (tab. 2-4) 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.

Tabela 2. 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 3. 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. 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

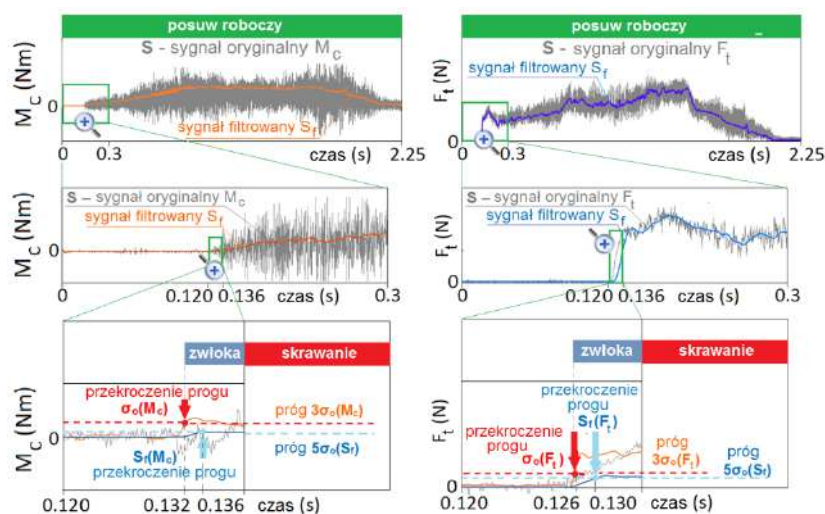
4.4.5. Skrawalność kompozytów drewnopochodnych

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.

W przeprowadzonych przeze mnie badaniach określiłem wartości siły osiowej F_t , momentu skrawania M_c oraz dokonano pomiaru i analizy grubości wiórów uzyskanych w trakcie testów. Uzyskane wyniki posłużyły do określenia indeksu skrawalności w procesie wiercenia w oparciu o pomiar 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.

Do analizy zarejestrowanych sygnałów F_t i M_c opracowałem oryginalny 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. 34. Metodyka wyznaczania początku skrawania

Zaproponowany sposób wykrywania skrawania jest przedstawiony na rys. 34. 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 σ_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 – σ_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 progów wartości wykrywania skrawania.

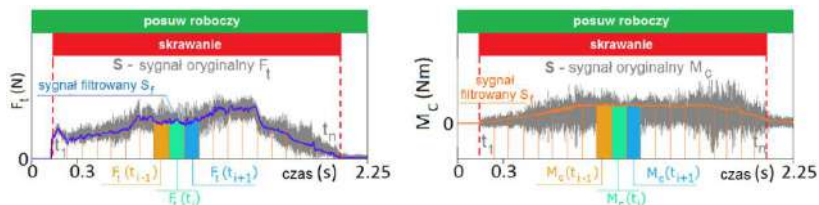
Po usunięciu offsetu, rozpoczyna się wykrywanie rzeczywistego skrawania. Z okresu 5 ms sygnału jest wyznaczane S_f i σ_c . Gdzie S_f - sygnał filtrowany dolnoprzepustowo 1kHz Butterworth II rzędu. Natomiast σ_c – to odchylenie standardowe tego sygnału. Rozpoznanie początku skrawania następuje, jeśli $S_f > 5\sigma_0$ lub $\sigma_c > 3\sigma_0$ dla dowolnego z sygnałów powyżej 25 ms. W przykładzie przedstawionym na rys. 34, 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 miara 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 σ_c zostały ustalone na bazie doświadczeń własnych.

Po określeniu początku skrawania przeprowadziłem 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. 35 oraz został opisany równaniem (47). Im F_L będzie niższa, tym segment lepiej nadaje się do wyznaczenia wartości sygnału.

$$F_L = \left| \frac{MS(t_{i-1})}{MS(t_i)} - 1 \right| + \left| \frac{MS(t_{i+1})}{MS(t_i)} - 1 \right| \quad (47)$$

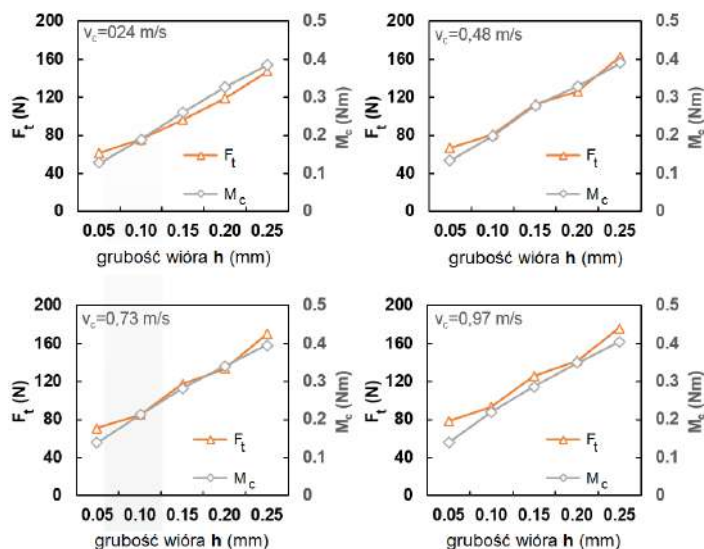
gdzie: $MS(t_{i-1})$ – miara analizowanego sygnału dla czasu t_{i-1} , $MS(t_{i+1})$ – miara analizowanego sygnału dla czasu t_{i+1} .

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. 35). 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.



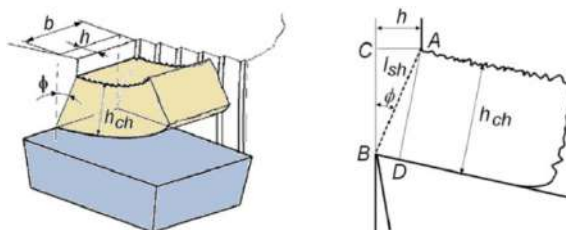
Rys. 35. Metodyka wyznaczania wartości sygnałów

Na rysunku 36 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. 36. Wpływ grubości wióra na wartość siły osiowej i momentu skrawania

Ważnym parametrem procesu skrawania charakteryzującym wielkość odkształceń w strefie ścinania jest kąt ścinania ϕ zawarty między kierunkiem prędkości skrawania, a strefą ścinania. Im jest on mniejszy, tym większa jest długość strefy ścinania (rys. 37), a więc i odkształcenia w strefie ścinania.



Rys. 37. Kąt ścinania i współczynnik spęczenia wióra

Kąt ścinania wpływa także na grubość wióra h_{ch} . Stosunek tej grubości do grubości warstwy skrawanej zwany jest współczynnikiem spęczenia wióra Λ_h . Może on być używany jako miara odkształceń w strefie ścinania (48):

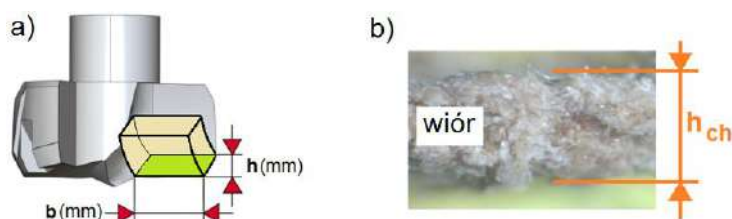
$$\Lambda_h = \frac{h_{ch}}{h} \quad (48)$$

W tabeli 5 przedstawilem kształty wiórów uzyskanych w trakcie przeprowadzonych badań, w zależności od stosowanych parametrów skrawania.

Tabela 5. Uzyskane w trakcie badań kształty wiórów

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 38b przedstawiono przykładowy widok pomiaru grubości wióra uzyskanego w trakcie badań.



Rys. 38. Pomiar grubości wióra

Współczynnik spęczenia wióra (Λ_h) może być wykorzystywany bezpośrednio do wyznaczenia kąta ścinania. Długość strefy ścinania l_{sh} określona jako (49):

$$l_{sh} = \frac{h}{\sin\phi} = \frac{h_{ch}}{\cos(\phi - \gamma_o)} \quad (49)$$

Wyznaczając z powyższego równania Λ_h oraz uwzględniając (50):

$$\cos(\phi - \gamma_o) = \sin\phi \sin\gamma_o + \cos\phi \cos\gamma_o \quad (50)$$

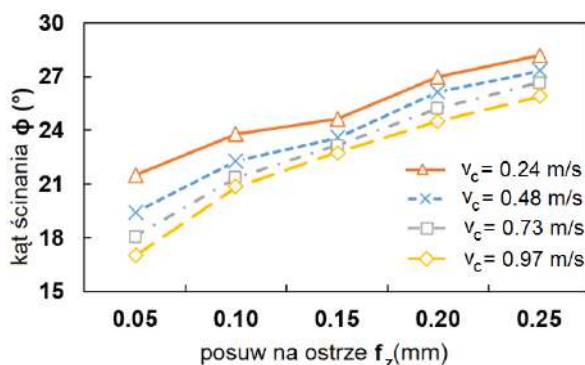
otrzymuje się (51):

$$\Lambda_h = \frac{h_{ch}}{h} = \sin\gamma_o + \frac{1}{\tan\phi} \cos\gamma_o \quad (51)$$

co da się przekształcić do poszukiwanej zależności kąta ścinania od współczynnika spęczenia wióra (52):

$$\tan\phi = \frac{\cos\gamma_o}{\Lambda_h - \sin\gamma_o} \quad (52)$$

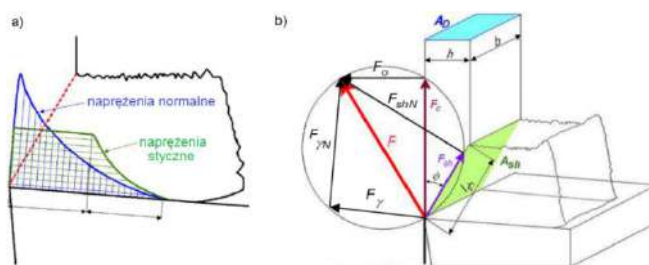
Rysunek 39 przedstawia przebiegi zmienności kąta ścinania w zależności od prędkości skrawania i posuwu. Na wartość kąta ścinania istotny wpływ ma wartość posuwu jak i prędkości skrawania. Ze wzrostem wartości posuwu wzrasta wartość kąta ścinania. Natomiast wpływ prędkości skrawania na ten kąt jest odwrotny w odniesieniu do wpływu wartości posuwu.



Rys. 39. Zależność kąta ścinania od wartości posuwu na ostrze

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. 40b).

Na rysunku 40a przedstawiono schematycznie rozkład naprężeń normalnych i stycznych na powierzchni natarcia przy skrawaniu swobodnym (w płaszczyźnie ortogonalnej).



Rys. 40. Rozkład sił w strefie skrawania

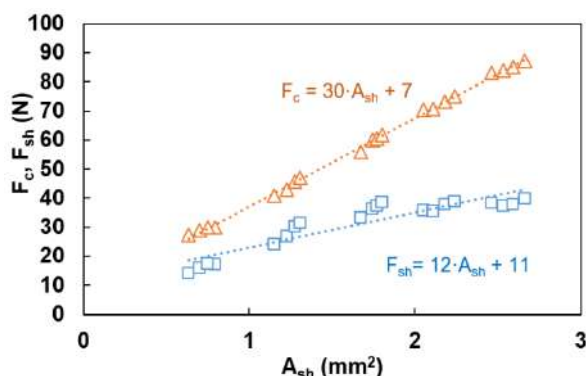
Naprężenia normalne, najwyższe w pobliżu krawędzi skrawającej, opadają wykładniczo wraz z oddalaniem się od tej krawędzi. Naprężenia styczne są w przybliżeniu jednakowe wzdłuż strefy wtórnego ścinania, a następnie opadają wzdłuż strefy poślizgu. Można je umownie zastąpić siłami skupionymi na krawędzi skrawającej: styczną do powierzchni natarcia F_{γ} , 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 siłą 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. 40b).

Szczególnie interesujące jest przeanalizowanie zależności siły ścinania F_{sh} od pola powierzchni ścinania. Siła ta jest związana z siłami działającymi w układzie narzędzia zależnością (53):

$$F_{sh} = F_c \cos \phi - F_o \sin \phi \quad (53)$$

Obserwując wyniki pomiarów siły ścinania F_{sh} w funkcji pola powierzchni ścinania A_{sh} można zauważyć, że układają się one wzdłuż prostej (rys. 41).



Rys. 41. Zależność głównej siły skrawania i siły ścinania od pola powierzchni ścinania

Współczynnik nachylenia tej prostej określa się jako tzw. opór ścinania k_{sh} , który w tym przypadku wynosi 12 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. 41) nie wychodzi jednak z początku układu współrzędnych. Oznacza to występowanie siły 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 (54):

$$F_{sh} = F_{shk} + k_{sh}A_{sh} \quad (54)$$

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 (55):

$$F_c = F_{ck} + k_{shc}A_{sh} \quad (55)$$

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/mm^2 .

Można zaobserwować że, główny opór ścinania (k_{shc}), który w analizowanym przypadku wynosi 30 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 ϕ (rys. 40b).

Można je zatem opisać zależnością (56):

$$A_{sh} = b l_{sh} = b \frac{h}{\sin\phi} \quad (56)$$

Podstawiając (56) do (55) otrzymuje się (57):

$$F_c = F_{ck} + \frac{A_D k_{shc}}{\sin\phi} \quad (57)$$

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.

Jednym ze wskaźników skrawalności jest jednostkowy opór skrawania $k_{c1.1}$. Zaproponowałem 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. Takie podejście pozwala na wyznaczenie 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.

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 [51] 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 (58) i (59) [52]:

$$F_s = F_{sw} + F_{sk} = k_{sw}A_s + K_{sk}b \quad (58)$$

$$F_c = F_{cw} + F_{ck} = k_{cw}A_s + K_{ck}b \quad (59)$$

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 mm² 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 mm² 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 [53].

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 (60) [52]:

$$D = \frac{k_{cw}}{k_{sw}} = \text{const} \quad (60)$$

Pole płaszczyzny ścinania zależy od pola przekroju poprzecznego warstwy skrawanej (grubości i szerokości tej warstwy) oraz kąta ścinania ϕ (56) [52]. Podstawiając (56) do (59), otrzymujemy wzór fizyczny na siłę skrawania (61):

$$F_c = F_{cw} + F_{ck} = bh \frac{k_{cw}}{\sin\phi} + bK_{cw} \quad (61)$$

Siła ortogonalna jest zgodnie z modelem Dasa i Tobiasa opisana zależnością (62) [52]:

$$F_o = \frac{D \cos\phi - 1}{D \sin\phi} \quad (62)$$

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 (63):

$$k_c = \frac{F_c}{A_D} \quad (63)$$

Aby zrozumieć zależność oporu właściwego skrawania od grubości warstwy skrawanej należy podstawić wzór fizyczny na siłę skrawania (61). Jak widać opór właściwy skrawania składał się będzie z dwóch składowych (64):

$$k_c = \frac{K_{ck}}{h} + \frac{k_{cw}}{\sin\phi} = k_{c1} + k_{c2} \quad (64)$$

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 (64), lecz doświadczalnie, bezpośrednio z zależności (63), wraz z aproksymacjami funkcją potęgową. Funkcja potęgowa, jaką zastosowano do aproksymacji zależności $k_c(h)$ ma ogólnie postać (65):

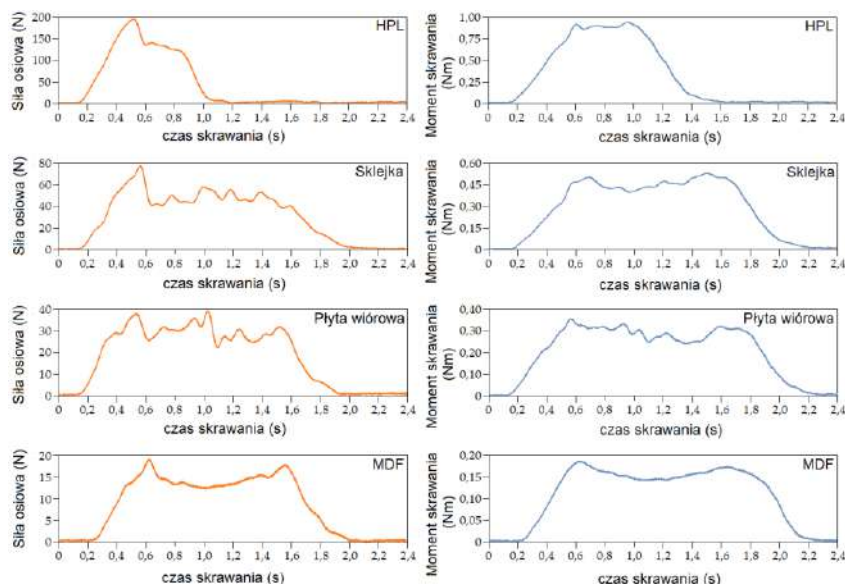
$$k_c = k_{c1.1} h^{-m_c} \quad (65)$$

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 (65) do (63) otrzymuje się inżynierską zależność na siłę skrawania, tzw. równanie Kienzle (66) [54]:

$$F_c = k_{c1.1} b h^{1-m_c} = k_{c1.1} b h^{y_c} \quad (66)$$

Wzór ten może być stosowany niezależnie od rodzaju obróbki i geometrii ostrza, co stanowi o jego uniwersalności i przydatności.



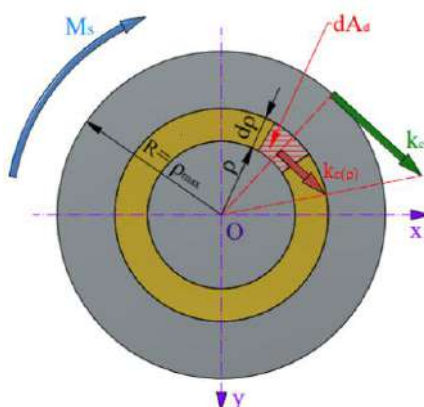
Rys. 42. Przykładowe przebiegi sygnałów siły osiowej i momentu skrawania dla czterech obrabianych materiałów

Analizując przebieg siły osiowej F_t i momentu skrawania M_c zarejestrowane w trakcie przeprowadzonych badań (rys. 42), 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.

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 (67):

$$A_D = hb \quad (67)$$

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. 43).



Rys. 43. Rozkład oporu skrawania wzdłuż krawędzi skrawającej wiertła

Jak wynika z rys. 43, 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 (68):

$$dM_s = k_{c(\rho)} \rho dA_d \quad (68)$$

gdzie: $k_{c(\rho)}$ – pór skrawania na promieniu ρ , ρ – 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 (69):

$$M_s = \int_{A_d} dM_s = \int_{A_d} k_{c(\rho)} \rho dA_d \quad (69)$$

Uwzględniając rozkład oporu skrawania wzdłuż krawędzi skrawającej wiertła (70):

$$\frac{k_{c(\rho)}}{k_c} = \frac{\rho}{\rho_{\max}} \quad (70)$$

wyznaczą się $k_{c(\rho)}$ i po podstawieniu do wzoru (69) otrzymujemy (71):

$$M_s = \int_{A_d} k_c \frac{\rho}{\rho_{\max}} \rho dA \quad (71)$$

Promień R jako stały dla całego obszaru całkowania oraz maksymalny opór skrawania k_c można wynieść przed znak całki, a wówczas (72):

$$M_s = \frac{k_c}{\rho_{\max}} \int_{A_d} \rho^2 \cdot dA \quad (72)$$

Elementarne pole powierzchni dA_d można wyrazić jako (73):

$$dA_d = d\rho \cdot h \quad (73)$$

Podstawiając zależność (73) do wyrażenia (72) otrzymuje się (74):

$$M_s = \frac{k_c \cdot h}{\rho_{\max}} \int_r^R \rho^2 \cdot d\rho \quad (74)$$

Promień ρ_{\max} równy jest w analizowanym przypadku promieniowi wiertła, a wówczas (75):

$$M_s = \frac{k_c \cdot h}{R} \int_r^R \rho^2 \cdot d\rho \quad (75)$$

Całkując wyrażenie (75) otrzymuje się (76):

$$M_s = \frac{k_c \cdot h}{3 \cdot R} (R^3 - r^3) \quad (76)$$

Po przekształceniu wyrażenia (76), otrzymuje się zależność określającą opór skrawania (77):

$$k_c = \frac{3 \cdot M_s \cdot R}{h \cdot (R^3 - r^3)} \quad (77)$$

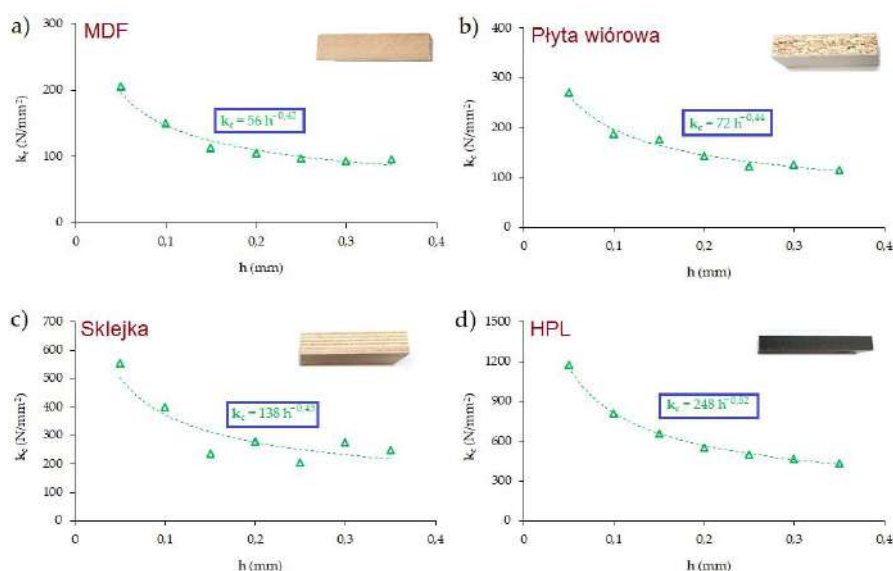
Procedura wyznaczania oporu skrawania z równania (77) została powtórzona dla wszystkich badanych materiałów. W takim wypadku możliwe, było uzyskanie dla każdego badanego materiału, wartości jednostkowego oporu skrawania $k_{c1.1}$ oraz wykładnika m_c (65).

Tabela 6. Wartość jednostkowego oporu skrawania $k_{c1.1}$ oraz wykładnika m_c

Materiał obrabiany	$k_{c1.1}$ N/mm ²	m_c
MDF	56	-0,42
Płyta wiórowa	72	-0,44
Sklejka	138	-0,43
HPL	248	-0,52

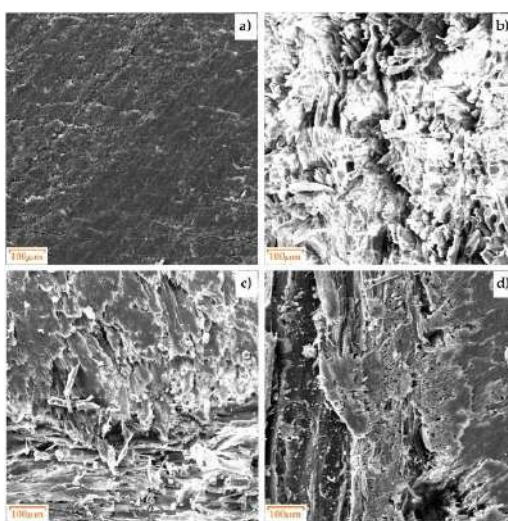
W tabeli 6 przedstawiono uzyskane wartości jednostkowego oporu skrawania wyznaczone w przeprowadzonych badaniach. Jak można zaobserwować, wartość jednostkowego oporu skrawania jest silnie zależna od materiału obrabianego. Na rysunku 44 przedstawiono wykresy wraz z uzyskanymi wynikami.

Znajomość wartości jednostkowego oporu skrawania pozwala na wyznaczenia wartości siły F_c na podstawie równanie Kienzle (66).



Rys. 44. Jednostkowy opór skrawania w procesie wiercenia wyznaczony dla: a) MDF, b) płyta wiórowa, c) sklejka, d) HPL

Struktura kompozytów zastosowanych w badaniach różni się od siebie. Na rysunku 45 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. 45. Materiał obrabiany SEM: a) HPL, b) MDF, c) płyta wiórowa, d) sklejka

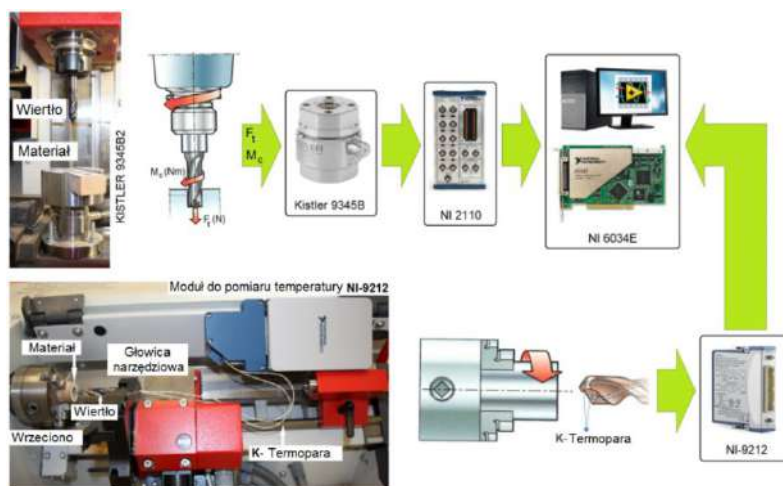
W badaniach dotyczących skrawalności zaobserwowano, że prędkość posuwu ma istotny wpływ na wartość siły osiowej F_t i momentu skrawania M_c . Wartość siły skrawania F_c w procesie wiercenia MDF zależy od wymiarów warstwy skrawającej, właściwości materiału obrabianego i kąta ścinania. Zarówno posuw, jak 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.

4.4.6. Wpływ zastosowanych powłok ostrzy narzędzi skrawających na wybrane wskaźniki technologiczne

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 μm 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 powłoki z azotku cyrkonu (ZrN) oraz azotku tytanu aluminium (TiAlN). W tym celu zastosowano reaktor próżniowy EIFELER VACOTEC PVD Alpha 400. Powłoki te wykonywano na podłożu poddanym uprzednio rozpylaniu wysokoenergetycznymi jonami, wolnym od tlenków i wzbogaconym w pierwiastki tworzące mocne wiązanie adhezyjno – dyfuzyjne.

Proces wiercenia przeprowadzono dwuetapowo: na frezarce CNC oraz tokarce CNC. Schematyczny diagram konfiguracji toru pomiarowego i systemu archiwizacji danych pomiarowych przedstawiono na rys. 46. 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. 46. Konfiguracja toru pomiarowego i schemat systemu akwizycji danych

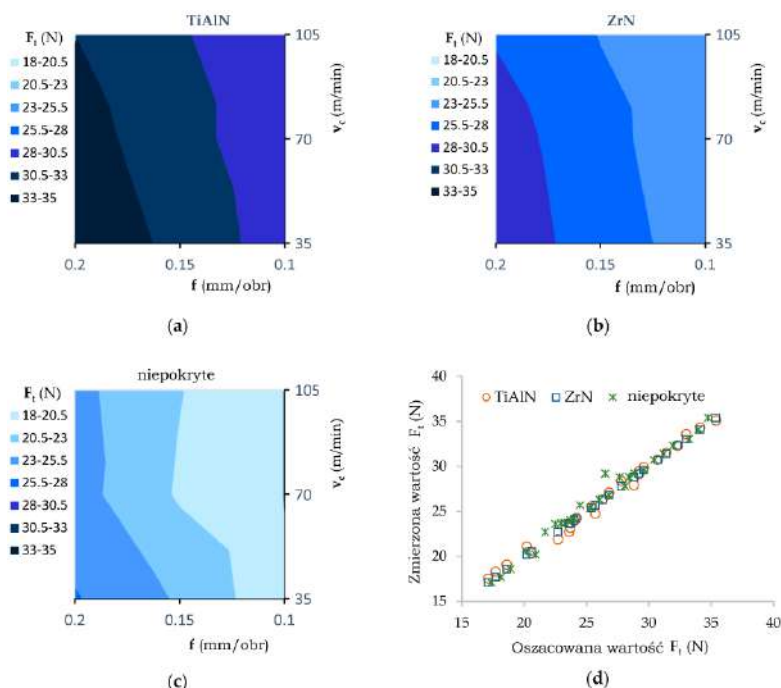
Dla każdego wykonanego otworu, przeprowadzono pomiar uzyskanej topografii powierzchni z wykorzystaniem profilometru CNC Hommel-Etamic T800ORC (rys. 47).



Rys. 47. Pomiar topografii powierzchni

Do pomiaru temperatury zastosowano przewody termoparowe typu K o średnicy 2 x 0,2 mm. Przewody termoparowe zamocowano w kanałach wiertła na ciecz chłodzącą.

Na rysunku 48 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. 48. 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

Na rysunku 48d przedstawiono porównanie wyników pomiędzy wartościami siły osiowej otrzymanymi w trakcie przeprowadzonego eksperymentu z wartościami otrzymanymi na podstawie modelu analitycznego (47). 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 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.

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 (78), dla ostrza z powłoką TiAlN zależność (79), ostrze bez powłoki zależność (80).

$$F_t = 25,139 + 52,333f - 0,021v_c \quad (78)$$

$$F_t = 25,005 + 50,333f - 0,018v_c \quad (79)$$

$$F_t = 13,011 + 66,667f - 0,026v_c \quad (80)$$

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 (81):

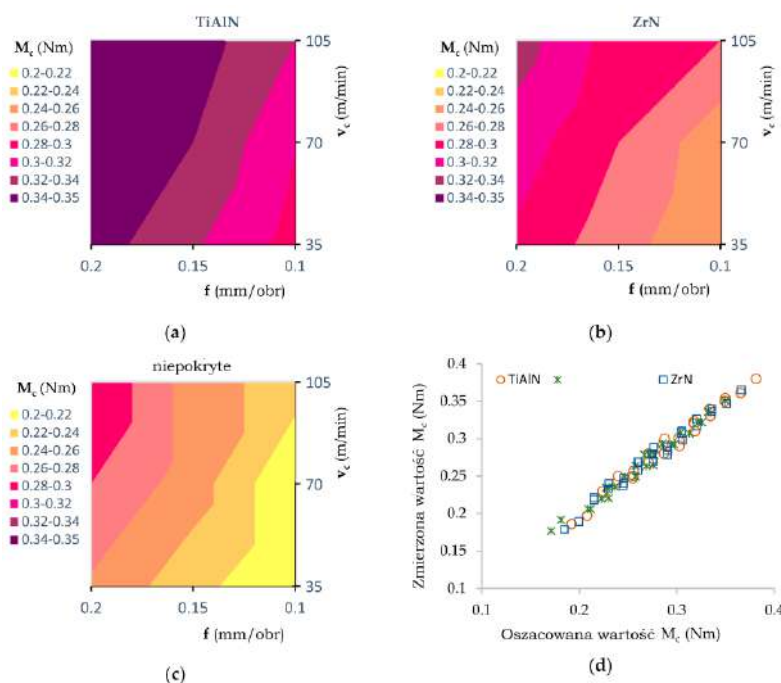
$$F_t = A_1 + B_1 \cdot f + C_1 \cdot v_c \quad (81)$$

Określono ten wpływ dla wyników badań otrzymanych wg zastosowanej powłoki ostrza. Przykładowo, dla powłoki ZrN otrzymano (82):

$$A_1 = 25,139; B_1 = 52,333; C_1 = 0,021 \quad (82)$$

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 49 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. 49. 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

Wyniki przeprowadzonej analizy statystycznej 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.

Jak można zauważyć (rys. 49), 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. Powlekane powierzchnie wiertel charakteryzują się stosunkowo wyższymi współczynnikami tarcia niż powierzchnia niepowlekanego narzędzia z węglika spiekane go. 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 (83), dla ostrza z powłoką TiAlN zależność (84), ostrze bez powłoki zależność (85).

$$M_c = 0,218 + 0,607f - 0,001v_c \quad (83)$$

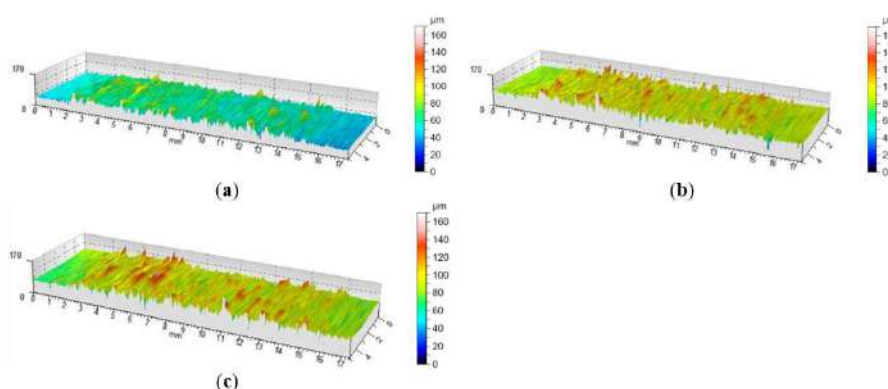
$$M_c = 0,167 + 0,557f - 0,001v_c \quad (84)$$

$$M_c = 0,093 + 0,747f - 0,001v_c \quad (85)$$

Na rysunku 49d przedstawiono porównanie wyników pomiędzy wartościami momentu skrawania otrzymanymi w trakcie przeprowadzonego eksperymentu z wartościami otrzymanymi na podstawie modelu analitycznego (83). Uzyskano współczynnik korelacji $R^2=0,98$. Dla wszystkich zastosowanych pokryć, wartość momentu skrawania wzrasta wraz ze wzrostem wartości posuwu.

Topografia powierzchni jest jedną z głównych cech branych pod uwagę w celu oceny jakości powierzchni obrobionej w procesach obróbki skrawaniem. W trakcie prowadzonych badań mierzono wartość wybranego wskaźnika chropowatości powierzchni otworu na kierunku wzdłużnym. Na rysunku 50 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 μm .

Na przedstawionej mapie topografii powierzchni (rys. 50), 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.

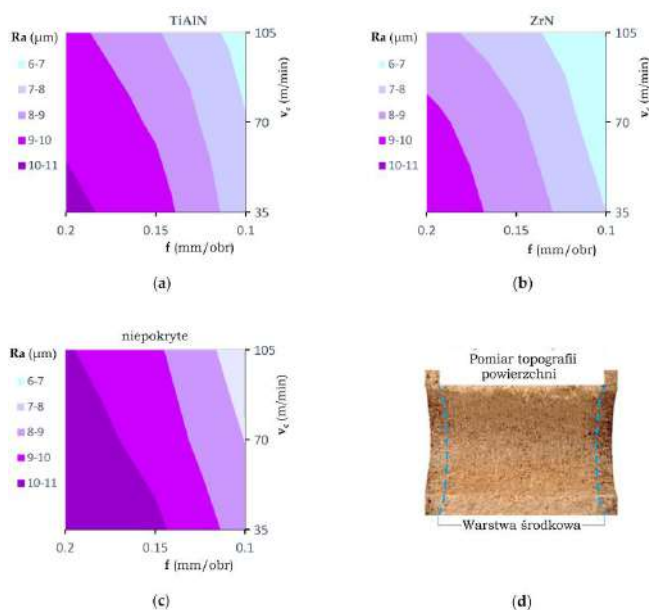


Rys. 50. Topografia powierzchni po obróbce narzędziem z powłoką TiAlN: a) prędkość skrawania 105 m/min i posuw 0,1 mm/obr, b) prędkość skrawania 105 m/min i posuw 0,15 mm/obr, c) prędkość skrawania 105 m/min i posuw 0,2 mm/obr

Pomiar wskaźnika chropowatości R_a realizowano zgodnie z zaleceniami zawartymi w normie ISO-4288: 1998. W przeprowadzonej analizie chropowatości powierzchni, pomiar wskaźnika chro-

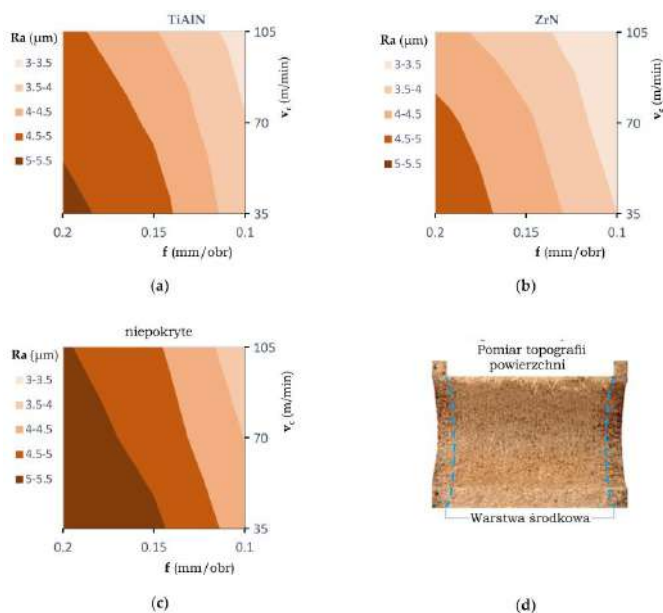
powatości Ra wykonywano dla dwóch obszarów powierzchni otworu z osobna. Dla warstwy zewnętrznej i warstwy środkowej płyty MDF. Miało to na celu określenie dodatkowego wpływu zarówno gęstości jak i twardości materiału obrabianego na analizowany wskaźnik.

Na rysunkach 51 i 52 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. 51 odnoszą się do pomiaru chropowatości powierzchni w warstwie środkowej materiału obrabianego.



Rys. 51. 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

Natomiast na rys. 52 zaprezentowano wyniki dotyczące pomiaru chropowatości powierzchni w warstwie zewnętrznej materiału obrabianego.

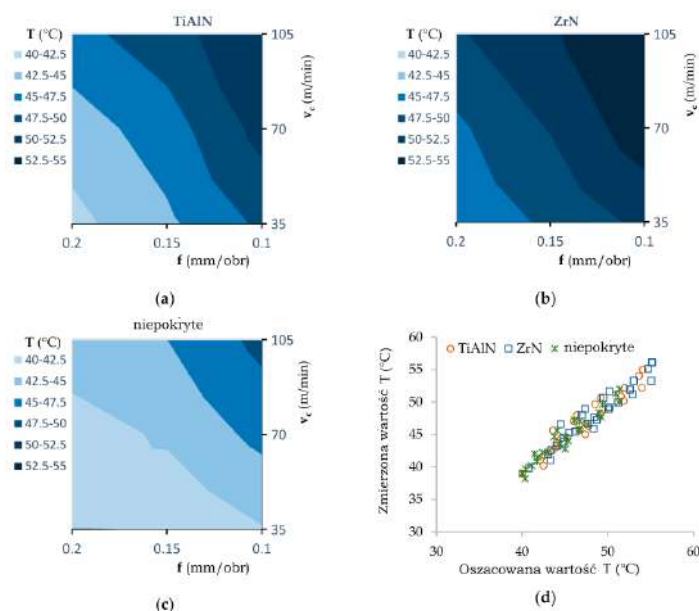


Rys. 52. Wpływ posuwu na wartość chropowatości powierzchni w warstwie zewnętrznej: a) dla prędkości skrawania 35 m/min, b) dla prędkości skrawania 70 m/min, c) dla prędkości skrawania 105 m/min, d) powierzchnia pomiarowa

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 różnicowaniem co do wartości współczynnikiem tarcia jak i współczynnikiem przewodności cieplnej w zależności od zastosowanej powłoki. 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 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.

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.



Rys. 53. 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

Na rysunku 53 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.

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. Wytlumaczyć 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 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.

Wartość temperatury ostrza skrawającego w zależności od zastosowanej powłoki wyrażono w postaci równań. Dla ostrza z powłoką z ZrN wyprowadzono zależność (86), dla ostrza z powłoką TiAlN zależność (87), ostrze bez powłoki zależność (88).

$$T = 53,791 - 62,601f - 0,065v_c \quad (86)$$

$$T = 55,978 - 65,241f - 0,062v_c \quad (87)$$

$$T = 43,991 - 41,801f - 0,078v_c \quad (88)$$

Porównanie wyników pomiędzy wartościami siły osiowej otrzymanymi w trakcie przeprowadzonego eksperymentu z wartościami otrzymanymi na podstawie modeli analitycznych (86-88) przedstawiono na rys. 53. Uzyskano współczynnik korelacji około $R^2 = 0,92$.

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 osiowej 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).

W analizie wartości siły osiowej F_t , momentu skrawania M_c i parametru chropowatości powierzchni R_a należy 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. Natomiast 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 węgla spiekanego. 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.

4.4.7. Monitorowanie procesu obróbki kompozytów drewnopochodnych

Analiza drgań narzędzi skrawających jest kluczowa dla monitorowania tempa zużycia narzędzi i jakości powierzchni podczas różnych operacji obróbki. Analiza ta umożliwia wykrywanie zmian w charakterystyce drgań narzędzi skrawających, co może dostarczyć cennych informacji na temat ich stanu zużycia. Zużycie narzędzi skrawających prowadzi do nieprawidłowych drgań podczas obróbki. Analiza tych drgań umożliwia wczesną identyfikację oznak zużycia narzędzia, zanim wystąpią poważne wady lub obniżą jakość obrabianego elementu. Chociaż analiza drgań okazała się skuteczna w monitorowaniu jakości powierzchni i zużycia narzędzi, wiąże się ona z pewnymi wyzwaniem. Jednym z głównych wyzwań jest scharakteryzowanie sygnałów drgań generowanych podczas obróbki. Spośród licznych rejestrowanych sygnałów drgań kluczowe jest zidentyfikowanie tych, które są bezpośrednio związane ze zużyciem narzędzia. Wobec powyższego istnieje potrzeba opracowania odpowiednich metod ekstrakcji istotnych informacji dotyczących zużycia narzędzia i jakości powierzchni z tych sygnałów. Ponadto, ocena zużycia narzędzia za pomocą analizy drgań stanowi złożone wyzwanie. Konieczne jest opracowanie modeli, podejść i algorytmów umożliwiających dokładne wykrywanie i ilościowe określanie zużycia narzędzia na podstawie fluktuacji sygnałów drgań.

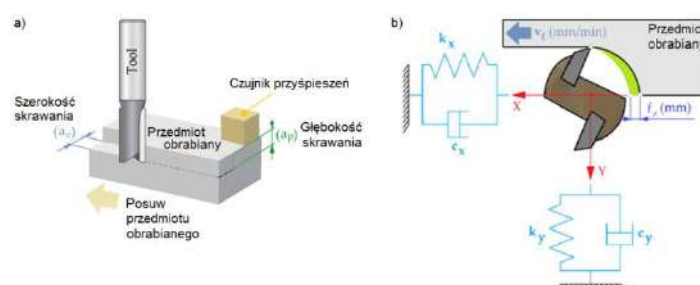
Analiza drgań jest metodą nienaruszającą bezpośrednio procesu obróbki, co ułatwia jej integrację z operacjami bez zakłócania produkcji. W przeciwieństwie do niektórych podejść wymagających wyłączenia maszyny lub przerwania produkcji, analiza drgań może być wykonywana w sposób ciągły podczas obróbki. Biorąc pod uwagę zalety tego podejścia, przyjąłem je w swojej pracy badawczej. W tym kontekście, głównym celem moich badań jest przedstawienie innowacyjnego podejścia do monitorowania i prognozowania jakości powierzchni oraz zużycia narzędzia podczas procesu frezowania. Celem było opracowanie skutecznej metody analizy sygnałów drgań, pozwalającej na uzyskanie maksymalnej ilości istotnych informacji dotyczących zużycia narzędzia i jakości powierzchni. Ponadto, celem tych badań było wprowadzenie wskaźnika skalarnego, który w sposób

bardziej płynny i bezpośredni zapewni silną korelację między sygnałami drgań a jakością powierzchni.

W dziedzinie obróbki skrawaniem monitorowanie i przewidywanie jakości powierzchni oraz zużycia narzędzi skrawających ma kluczowe znaczenie. Aspekty te odgrywają kluczową rolę we wczesnym wykrywaniu zużycia ostrzy narzędzi, obniżaniu kosztów wymiany i zwiększaniu ogólnej wydajności produkcji.

W badaniach zastosowano komercyjnie narzędzie skrawające przeznaczone do obróbki płyt MDF, frez trzpieniowy dwuostrzowy o średnicy 12 mm z ostrzami z węgla spiekanego.

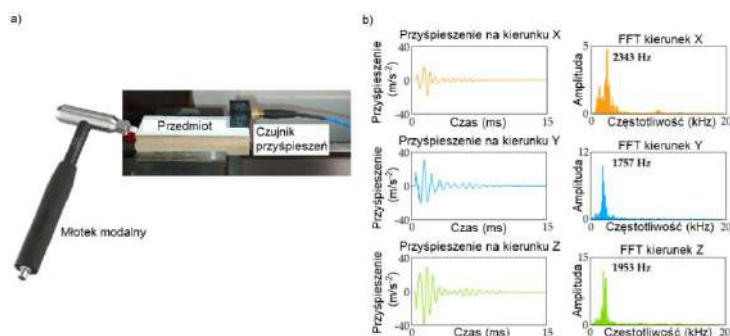
Proces frezowania przeprowadzono na frezarce pionowej CNC. Schematyczny diagram toru pomiarowego przedstawiono na rys. 54. W ramach badań na frezarce CNC rejestrowano sygnały przyspieszeń na kierunkach: a_x , a_y i a_z pochodzące ze strefy skrawania w trakcie obróbki płyty MDF.



Rys. 54. a) parametry geometryczne procesu frezowania, b) dynamika procesu frezowania

Do analizy charakterystyki dynamicznej układu opracowałem oryginalny program własny w środowisku LabVIEW. Pozwala on na prowadzenie automatycznej analizy zarejestrowanych sygnałów pod kątem ich przydatności do określenia charakterystyki dynamicznej układu. Automatyka fragmentacja, zastosowana w programie, opiera się na wykryciu początku pojedynczego uderzenia.

Rysunek 55 przedstawia przykład przebiegów czasowych oraz ich widm wyodrębnionych z całego sygnału.



Rys. 55. a) wymuszenie impulsowe, b) przebiegi czasowe oraz ich widma wyodrębnione z całego sygnału

Powyższa analiza pozwoliła, w efekcie końcowym, na wyznaczenie częstotliwości własnych układu MDS na trzech analizowanych kierunkach: $\omega_{0x} = 2343$ Hz; $\omega_{0y} = 1757$ Hz i $\omega_{0z} = 1953$ Hz. Wiadomo, że częstotliwość przechodzenia kolejnych ostrzy freza wynosi (89) [55]:

$$\omega_{fz} = \frac{n \cdot z}{60} \quad (89)$$

gdzie: n – prędkość obrotowa freza obr/min, z – liczba ostrzy freza.

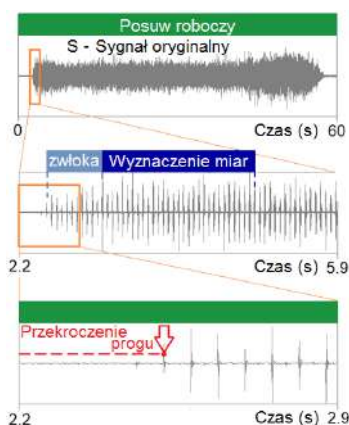
Oznacza to, że wielokrotność częstotliwości przechodzenia ostrzy powinna być różna od częstotliwości drgań własnych w celu uniknięcia częstotliwości rezonansowej. Ponieważ, prowadzi to wprost do wymuszenia drgań w częstotliwości rezonansowej (90), która jest bardzo bliska częstotliwości drgań własnych:

$$\omega_{\text{rez}} = \omega_0 \sqrt{1 - 2d^2} \quad (90)$$

Dla większości obrabiarek współczynnik tłumienia d jest bardzo mały (0,001 – 0,05), więc (91):

$$\sqrt{1 - 2d^2} \approx 1 \quad (91)$$

Do dalszej analizy zarejestrowanych sygnałów przyspieszenia przygotowałem własny program komputerowy umożliwiający w wybranych odcinkach czasu wyznaczenie wybranych wartości miar rejestrowanych sygnałów w dziedzinie czasu jak i częstotliwości (rys. 56). Działanie programu polegało na automatycznym wyznaczaniu wartości rejestrowanych sygnałów w ściśle określonych odcinkach czasowych.



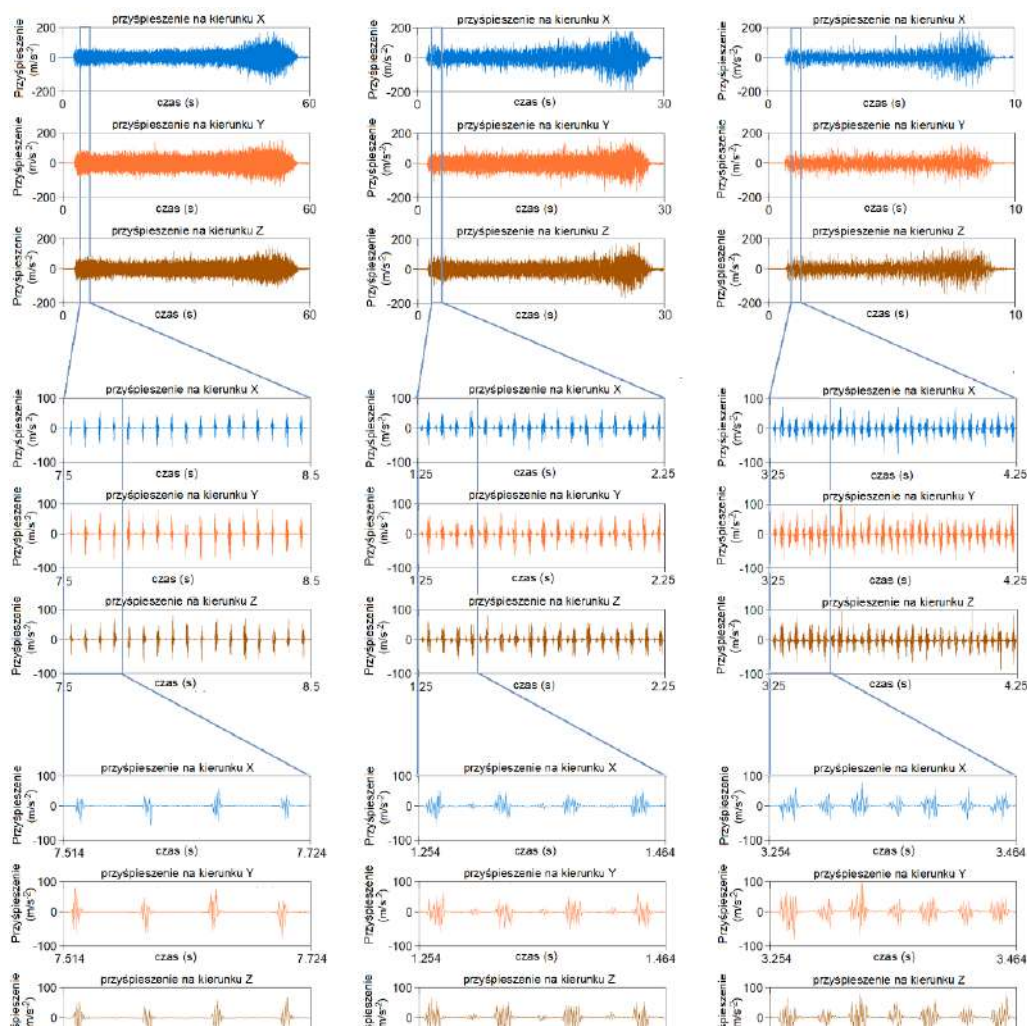
Rys. 56. Metodyka wyznaczania miar sygnałów

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).

Tabela 7. Wyodrębnione cechy z sygnału przyspieszenia

Funkcja sygnału	Wyrażenie matematyczne	Funkcja sygnału	Wyrażenie matematyczne
Maksimum	$\max(x_i) \quad i = 1, \dots, n$	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	$\frac{\max(x_i) \quad i = 1, \dots, n}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i }$

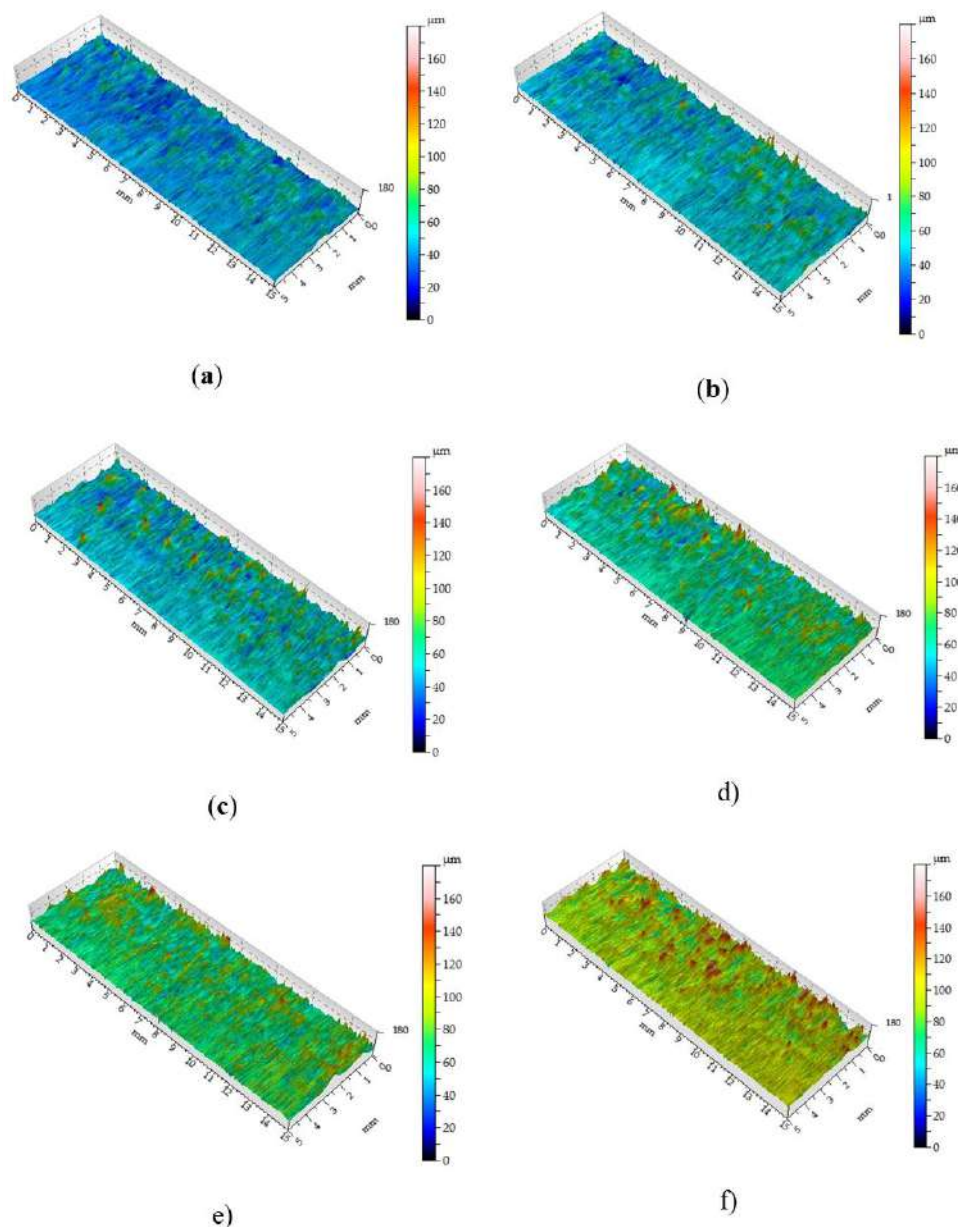
Na rysunku 57 przedstawiono przykładowe przebiegi czasowe sygnałów przyspieszeń na kierunkach: a_x , a_y i a_z w zależności od wartości prędkości posuwu (v_f) i prędkości skrawania (v_c).



Rys. 57. Zależność sygnału akcelerometru w procesie frezowania

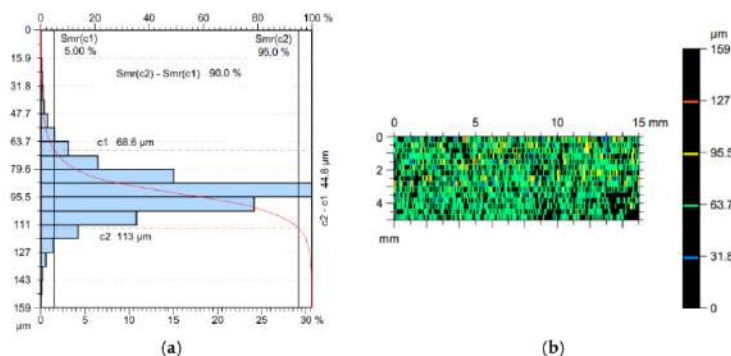
Na rysunku 58 przedstawiono przykładową topografię powierzchni uzyskaną w procesie frezowania przy prędkości skrawania 76 m/min i sześciu wartości prędkości posuwu. Na podstawie mapy topografii, w wybranych odcinkach pomiarowych, określano wskaźnik chropowatości S_q .

W przeprowadzonych badaniach chropowatości powierzchni obrobionej potwierdzono powszechnie znane z literatury [40, 56] oraz wcześniejszych badań autorów zależności dotyczące wpływu zarówno prędkości skrawania, jak i prędkości posuwu na chropowatość powierzchni obrobionej. Zaobserwowano tendencję malejącą parametru S_q wraz ze wzrostem prędkości skrawania i/lub zmniejszeniem prędkości posuwu.



Rys. 58. 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

Rysunek 60 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. 58f, 90% materiału jest skoncentrowane w zakresie $44,8$ μm (rys. 59a). 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 $28,2$ μm. 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 μm, natomiast w przypadku powierzchni obrabianej z prędkością posuwu $v_f = 200$ mm/min, ponad 31% materiału ulega koncentracji na wysokości profilu wynoszącej około 73 μm.



Rys. 59. a) Krzywa Abbotta–Firestone’a i b) wykres konturowy powierzchni uzyskanej dla parametrów skrawania $v_c = 76$ m/min i $v_f = 1\,200$ mm/min

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 pomóc w osiągnięciu pożądanej chropowatości powierzchni [39, 57]. Wykres konturowy (rys. 59b) 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.

Zastosowanie sieci neuronowych

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 przestrzeń 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.

Przeprowadziłem kilkadziesiąt doświadczeń z sieciami radialnymi. Na początek sprawdzono, jak sieć RBF odpowiada na różne zestawy danych wejściowych. Jedyną 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 euklidesowej 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 sp 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 $sp = 30000$.

Dokonałem 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. 8). Zweryfikowano tu także brak przydatności niektórych miar sygnałów przyśpieszenia do oceny chropowatości powierzchni obrobionej. Wynik przedstawiono w tab. 8, Najkorzystniejszy rezultat, wyróżniona kolumna.

Tabela 8. Porównanie błędów predykcji sieci w zależności od przyjętej miary sygnału

Funkcja sygnału	RMS μm									
	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
Logarymiczna 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

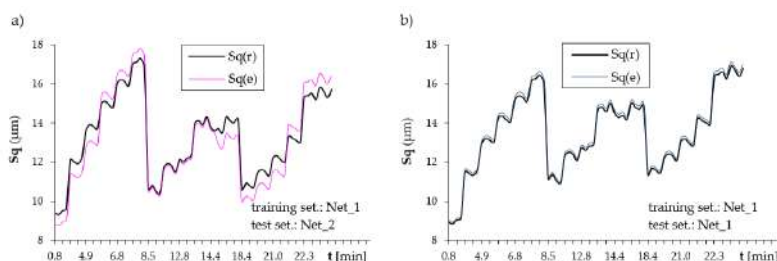
Dokładność oszacowania wskaźnika chropowatości powierzchni (Sq) jest oceniana na podstawie błędu średniokwadratowego (RMS) (równanie 92):

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (Sq_{(r)} - Sq_{(e)})^2}{N}} \quad (92)$$

gdzie: $Sq(r)$ i $Sq(e)$ – są mierzone i szacowane parametry chropowatości powierzchni, N – liczba uzyskanych pomiarów.

Połączenie danych do uczenia sieci radialnej było głęboko uzasadnione i przemyślane. 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. 60. Odpowiedzi sieci RBF testowanych na różnych zestawach danych

Wykres (rys. 60a) 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. 8, testowanych na zbiorze Net_2. Po prawej stronie (rys. 60b) znajdują się wyniki sieci uczonych i testowanych na zbiorze Net_1.

Przedstawione wykresy (rys. 60a) wydają się potwierdzać wcześniejsze wnioski wyciągnięte z analizy uczenia i testowania sieci. W próbie Net_1 początkowa wartość wskaźnika Sq były na wyższym poziomie niż w próbie Net_2. Ma to odzwierciedlenie w ocenie wskaźnika przez sieć RBF. Charakterystyczny spadek lub wzrost wartości wskaźnika Sq na wyjściu sieci RBF świadczy o przekroczeniu, przez zmienne wejściowe, zakresu treningowego i jest poważną wadą tego typu sieci.

Zastosowanie reguł rozmytych TSK do analizy sygnałów

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 Yaegera i Fileva metoda potencjału (mountain clustering) [58] 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 mierzonyj przestrzeni. Takie podejście prowadzi jednak do kosztownych obliczeniowo algorytmów o złożoności wykładniczej.

W odrobinę inną stronę idzie stworzona przez Chiu subtraktywna metoda potencjału [59]. 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 [60, 61]. W szczególności można je wykorzystać do budowy modeli przewidujących zachowanie różnego rodzaju złożonych systemów w czasie – innymi słowy do tworzenia algorytmów uczenia maszynowego.

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 (93):

$$P(i) = \sum_{j=1}^N e_i^{-\alpha \|x_i - x_j\|^2} \quad (93)$$

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.

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 $u = \arg \max P(i)$, 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 (94):

$$P(i) = P(i) - P(u)e^{-\beta \|x_i - x_j\|^2} \quad (94)$$

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 ε_d wybranego z przedziału $(0, 1)$. Działanie subtraktywnej metody potencjału opisuje poniższy algorytm:

1. Wybierz r_a, r_b, ε_u i ε_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 (95):

$$\text{IF } x_1 \text{ is } Q_{1k} \text{ and } x_2 \text{ is } Q_{2k} \text{ and } \dots \text{ and } x_n \text{ is } Q_{nk}, \quad (95)$$

$$\text{THEN } Z \text{ is } w^k = p_0^k + p_1^k x_1 + p_2^k x_2 + \dots + p_n^k x_n$$

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.

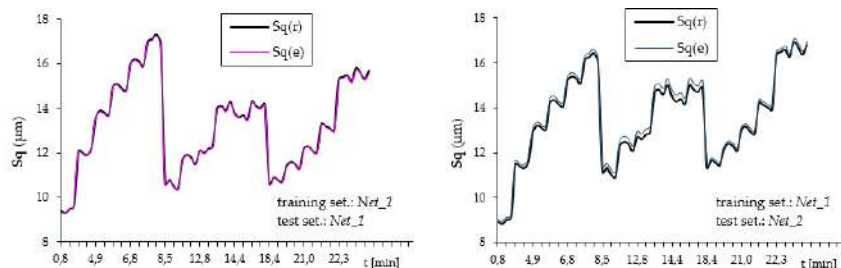
W metodzie grupowania subtraktywnego x_j jest j -tą cechą wejściową x_j ($j \in [1, n]$), a Q_{jk} jest MF w k -tej regule związanej z j -tą wejściową cechą. MF Q_{jk} można uzyskać jako (96):

$$Q_{jk} = \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{x_j - x_{jk}^*}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (96)$$

gdzie: x_{jk}^* – j -ta cecha wejściowa x_k^* , σ – odchylenie standardowe Gaussa MF podane jako (97):

$$\sigma = \sqrt{1/2\alpha} \quad (97)$$

Stosując podejście rozmyte TSK, można uzyskać model rozmyty TSK z regułami opisującymi S_q a wybrane miary sygnałów przyspieszenia 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 identyfikowanego systemu. Promień klastra jest ograniczony do zakresu $[0,15; 1,0]$ z krokiem o wielkości $0,15$. Rysunek 61 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. 61. 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

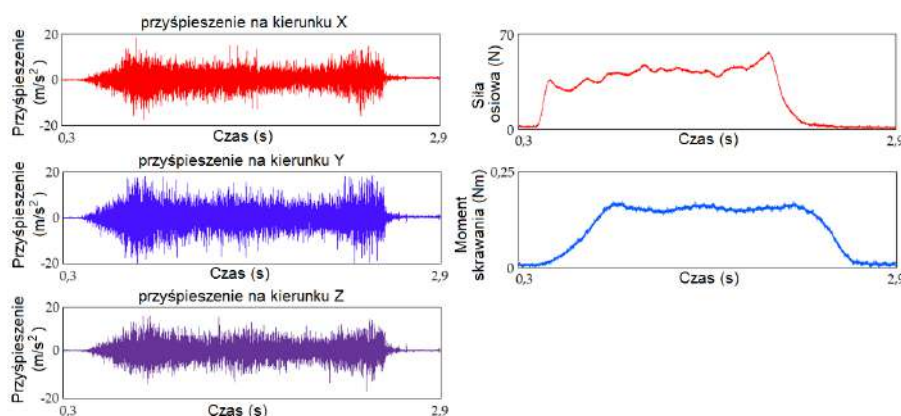
W tabeli 9 zestawiono porównanie błędu szacowania wartości wskaźnik S_q uzyskanego za pomocą sieci RBF oraz logiki rozmytej. TSK ma najniższy błąd średniej kwadratowej.

Tabela 9. Podsumowanie błędu średniokwadratowego (RMSE) z wyników eksperymentalnych z różnymi metodami sztucznej inteligencji

Metody sztucznej inteligencji	zestaw treningowy: Net_1	zestaw treningowy: Net_2
	RMSE μm	RMSE μm
Sieć neuronowa RBF	0,273	0,379
TSK	0,066	0,198

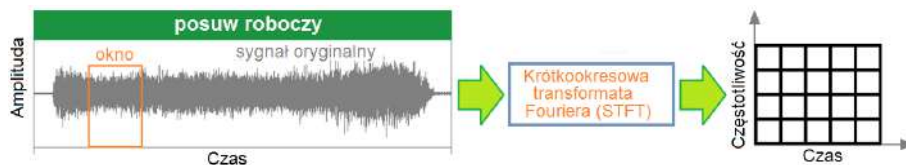
Zastosowanie entropii permutacji do analizy sygnałów

Rysunek 62 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. 62. Sygnał przyspieszeń oraz oporów skrawania: prędkość skrawania 94 m/min; prędkość posuwu 700 mm/min

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. 63).



Rys. 63. Ruchome okno czasowe

Zastosowanie ruchomego okna czasowego pozwala na uzyskanie dodatkowego wymiaru (czasu). Matematycznie STFT można zapisać jako (98):

$$\text{STFT} \{x(t)\} = X(\tau, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \omega(t - \tau) e^{-j\omega\tau} dt \quad (98)$$

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 (99):

$$\text{spectrogram} \{x(t)\} = |X(\tau, \omega)|^2 \quad (99)$$

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 (100):

$$g(n) = s(n)w(n), \quad n \in (-\infty; +\infty) \quad (100)$$

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 płatka bocznego i charakteryzowane jest wzorem (101):

$$w(n) = \alpha - \beta \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \quad (101)$$

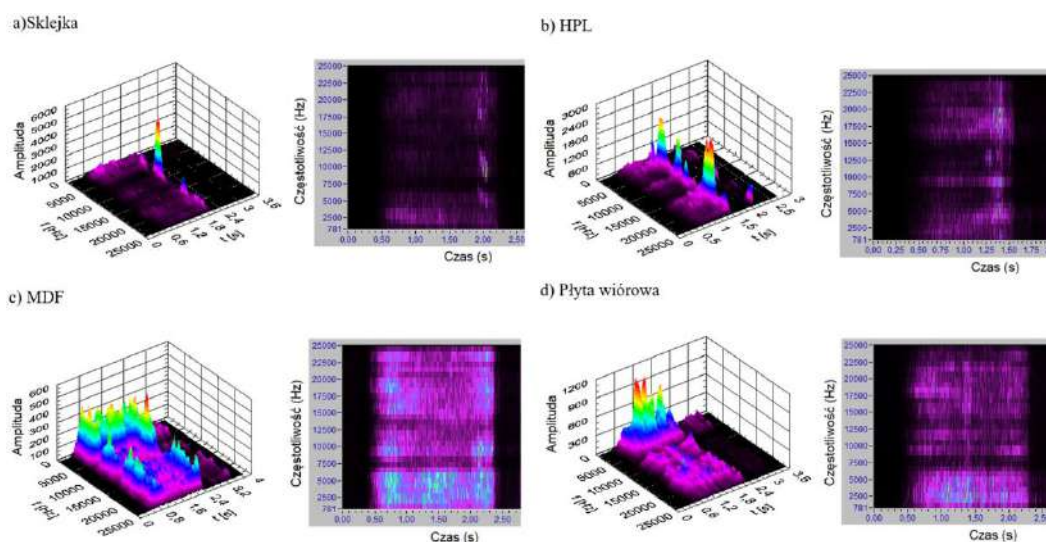
gdzie: $\alpha=0,54$, $\beta=1-\alpha=0,46$, N – liczba próbek sygnału.

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 osiągana 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 (102):

$$\frac{A}{B} = \frac{\Delta f}{\Delta t} \quad (102)$$

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, iż 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.

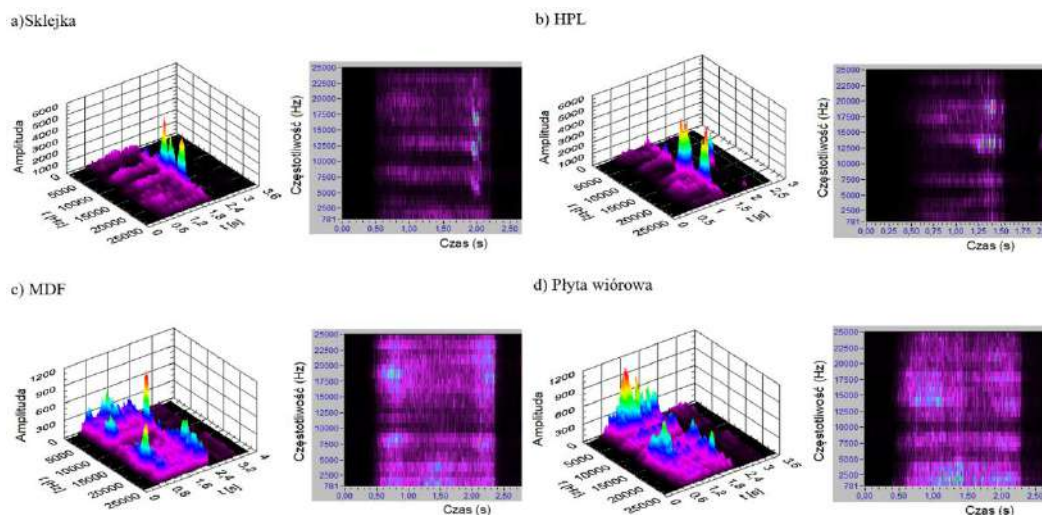
Rysunki 64 i 65 pokazują przykłady widm mocy sygnałów drgań generowanych w kierunku X i Y podczas wiercenia w różnych rodzajach materiałów obrabianych. Parametry skrawania to $n = 3000$ obr/min, $v_f = 750$ mm/min. Jak pokazano na rysunkach, maksymalna amplituda sygnału drgań w zakresie częstotliwości zmienia swoją wartość w przedziale od 2-22 kHz w zależności od rodzaju materiału obrabianego. Można zauważyć, że wierząc w sklejkę (rys. 64a i 65a), 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. 64b i 65b), 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. 64c i 65c), 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. 64d i 65d), widmo mocy ma charakterystyczne wzrosty amplitudy przy częstotliwościach około 2,5 kHz na kierunku X i 2 kHz na kierunku Y.



Rys. 64. Spectrogram sygnału drgań na kierunku X

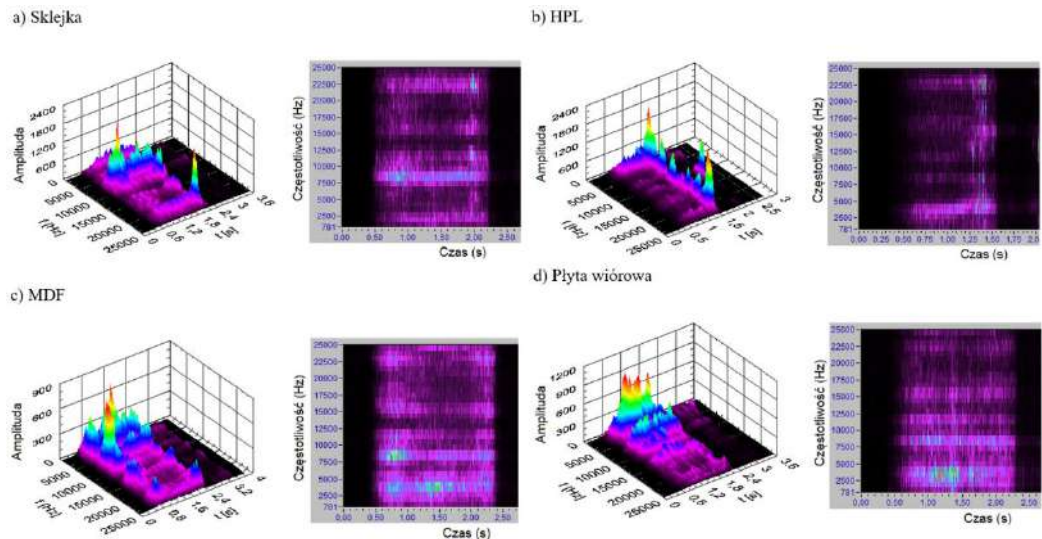
Porównując ze sobą otrzymane wartości amplitudy dominującej częstotliwości, w zależności od materiału obrabianego, można stwierdzić, że istnieje istotny wpływ materiału obrabianego na

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).



Rys. 65. Spectrogram sygnału drgań na kierunku Y

Rysunek 66 przedstawia widma mocy sygnału drgań w kierunku Z uzyskane dla różnych materiałów obrabianych w procesie wiercenia.



Rys. 66. Spectrogram sygnału drgań na kierunku Z

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. 66, różne obszary o zakresach częstotliwości były wzbudzone podczas wiercenia. Widoczne są dwa charakterystyczne piki amplitudy w analizowanych sygnałach. Wierząc w sklejce (rys. 66a), widmo mocy sygnału ma charakterystyczne wzrosty amplitudy przy częstotliwościach około 8 kHz i 22 kHz na kierunku Z. Wierząc w HPL (rys. 66b), widmo mocy ma charakterystyczne wzrosty amplitudy przy częstotliwościach około 4 kHz i 22 kHz na kierunku Z. Wierząc

w materiale MDF (rys. 66c), widmo mocy ma charakterystyczne wzrosty amplitudy przy częstotliwościach około 3 kHz i 8 kHz na kierunku Z. Wierząc w płycie wiórowej (rys. 66d), 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.

Szczegóły matematyczne metody entropii permutacji można znaleźć w [14, 62]. Koncepcja entropii permutacji została wprowadzona przez Bandta [62] celem uporządkowania kolejnych wartości szeregu czasowego, przy zaniedbaniu skali różnic występujących pomiędzy nimi. Również w artykułach Kellera [63] podejście analizy permutacyjnej zostało szeroko zastosowane. Entropia permutacji szeregu czasowego jest entropią Shannona rozkładu wzorców porządkowych w szeregu czasowym [64]. Takie wzorce porządkowe, opisujące typy porządkowe wektorów, są kodowane przez permutacje. Oznaczmy zbiór permutacji $\{1, \dots\}$ dla d należącego do liczb naturalnych przez πd . 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 (103):

$$x(\pi_1) < x(\pi_2) < \dots < x(\pi_d) \quad (103)$$

Jeśli $x(i) = x(j)$, ustalono, że $x(i) < x(j)$, gdy $i < j$. Elementy zbioru πd dzielimy na nachodzące na siebie wektory o długości d według schematu (104):

$$(x(1), \dots, x(d)), ((x(2), \dots, x(d+1)), \dots, ((x(N-d+1), \dots, x(N))) \quad (104)$$

Każdemu wektorowi jest przyporządkowany wzorec zgodnie z równaniem (103), 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 (105):

$$p(\pi) = \frac{|\{n: 0 \leq n \leq N-d+1, (x(n), x(n+1), \dots, x(n+d-1)) \text{ is type } \pi\}|}{N-d+1} \quad (105)$$

Wzór na entropię permutacji (106) jest oparty na wzorze na entropię Shannona, tylko zamiast rozkładu prawdopodobieństwa zdarzeń używa się rozkładu prawdopodobieństwa wzorców:

$$\text{PermEn} = - \sum_{i=1}^{d!} p(\pi_i) * \ln p(\pi_i) \quad (106)$$

Znormalizowana entropia permutacji (H_p) wynosi zatem (107):

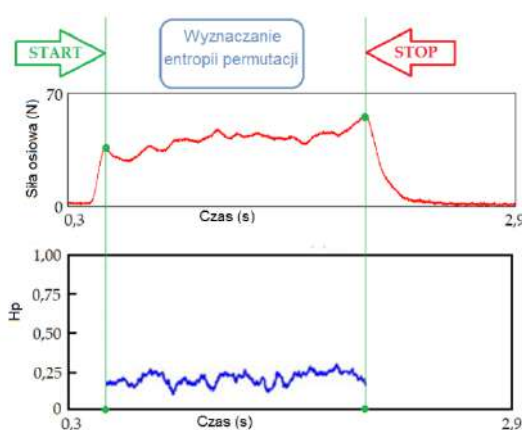
$$H_p = \frac{H_p(d)}{\ln(d!)} \quad (107)$$

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 (107) 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 $N \gg d!$ [65]. Ze względów praktycznych autorzy [62] 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 [66].

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. 67. Sygnał siły osiowej i jej entropia permutacji H_p

Na rysunku 67 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 10 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 10. Znormalizowana entropia permutacji H_p

Materiał obrabiany	H_p
MDF	0,32
Płyta wiórowa	0,53
Sklejka	0,48
HPL	0,21

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.

Ponadto podjąłem 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 S_q . 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 S_q . 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 μm , podczas gdy błąd oszacowania oparty na logice rozmytej wyniósł 0,198 μm . 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.

Zastosowanie średniej kwadratowej przyspieszenia globalnego do analizy sygnałów

W badaniach przetworzyłem i przeanalizowałem uzyskane sygnały, aby zbadać korelację między drganiami narzędzia skrawającego a wartościami wskaźnika chropowatości R_a i zużycia ostrza VB . Na tym etapie zastosowałem szybką transformatę Fouriera (FFT) do wyizolowania sygnatury drgań związanej z obrabiarką i tłem, a także wykorzystałem estymację gęstości widmowej mocy (PSD), aby wybrać optymalne pasmo częstotliwości i uzyskać maksymalną ilość użytecznych informacji. Na koniec przeanalizowałem korelację między sygnałami drgań a chropowatością, obliczając średniokwadratowy pierwiastek przyspieszenia (GRMS) dla wszystkich uzyskanych krzywych gęstości widma mocy.

Globalną średnią kwadratową (GRMS) [69], znaną również jako średnia kwadratowa przyspieszenia, można opisać po prostu jako pierwiastek kwadratowy pola powierzchni pod krzywą gęstości widmowej mocy w funkcji częstotliwości. Na tej krzywej wartości PSD wyrażone są w g^2/Hz , a częstotliwości mierzone są w hercach.

Poniżej przedstawiono metodę obliczeniową służącą do uzyskania wartości GRMS:

Najpierw obliczamy liczbę oktaw w paśmie częstotliwości $[f_1 \text{ do } f_2]$, korzystając z równania (108):

$$C = \frac{\log_{10}(f_2) - \log_{10}(f_1)}{\log_{10}(2)} \quad (108)$$

Aby obliczyć liczbę oktaw (C) w danym paśmie częstotliwości, użyj wzoru opartego na logarytmie dziesiętnym, który sprowadza się do ilorazu wyższej częstotliwości (f_2) przez niższą (f_1), a następnie zlogarytmowania i podzielenia przez logarytm z 2 (ponieważ oktawa to podwojenie częstotliwości).

Następnie obliczamy wartość decybeli (dB) dla f_L i f_H w następujący sposób (109):

$$dB = 10 \log_{10} (\text{PSD}_2 / \text{PSD}_1) \quad (109)$$

Następnie obliczamy nachylenie m odcinka między częstotliwościami f_1 i f_2 , korzystając z (110):

$$m = \frac{dB}{C} \quad (110)$$

Następnie obliczamy pole pod krzywą między częstotliwościami f_1 i f_2 korzystając z zależności (111):

$$A_i = 10 \log_{10}(2) \frac{\text{PSD}_2}{10 \log_{10}(2) + m} \left[f_2 - (f_2) \left(\frac{f_1}{f_2} \right) \right]^{m/10 \log_{10}(2)} \quad (111)$$

Na koniec obliczamy pierwiastek kwadratowy z pola A , aby uzyskać wartość GRMS (112):

$$\text{GRMS} = \sqrt{A} \quad (112)$$

Aby obliczyć całkowitą wartość GRMS (dla całej krzywej PSD), dodajemy wszystkie poszczególne obszary $A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_i$, a następnie obliczamy pierwiastek kwadratowy z otrzymanej sumy. Gdzie PSD_1 jest gęstością widmową mocy odpowiadającą częstotliwości f_1 , a PSD_2 jest gęstością widmową mocy odpowiadającą częstotliwości f_2 .

Zastosowany w analizie współczynnik korelacji Bravais-Pearsona [68] mierzy zależność liniową, wskazując na zdolność przewidywania jednej zmiennej (x) na podstawie innej (y) przy użyciu modelu liniowego. Ocenia siłę zależności między dwiema zmiennymi ilościowymi, co czyni go kluczowym parametrem w analizie regresji liniowych, zarówno prostych, jak i wielokrotnych. Współczynnik korelacji Bravais-Pearsona (r) między dwiema zmiennymi, x i y , obliczamy, wykorzystując kowariancję i odchylenia standardowe (113):

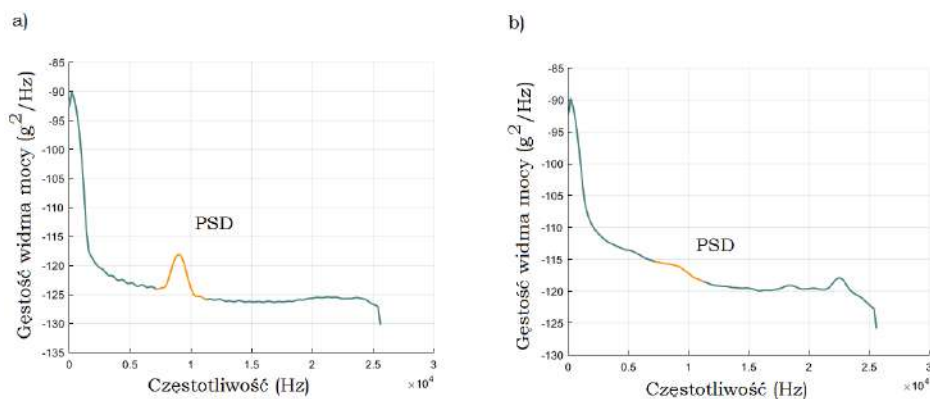
$$Gr_{x,y} = \frac{cov_{x,y}}{\sigma_x \sigma_y} \quad (113)$$

Siła tego współczynnika waha się od -1 do $+1$; współczynnik bliski $+1$ lub -1 oznacza silniejszą korelację, natomiast współczynnik bliski 0 oznacza słabszą korelację:

$$cov_{x,y} = \frac{\sum(x_1 - \bar{x})(y_1 - \bar{y})}{N - 1} \quad (114)$$

Aby wydobyć z rejestrowanych sygnałów drgań jak najwięcej cennych informacji, konieczne jest priorytetyzowanie niektórych częstotliwości i odrzucanie innych, aby wybrać optymalne pasmo częstotliwości. W tym miejscu pojawia się rola filtrowania. Aby wyeliminować niepożądane częstotliwości drgań, przeprowadziłem test bez obciążenia. Podczas tego testu rejestrowano charakterystykę drgań operacji frezowania bez kontaktu przedmiotu obrabianego z narzędziem. Po zebraniu sygnałów drgań przystąpiono do ich filtrowania. Analiza widmowa tych widm FFT ujawnia, że pasmo częstotliwości od 0 do 7000 Hz wykazuje niemal takie same składowe i wysokości pików dla wszystkich przejść, w tym widmo testu bez obciążenia, które obejmuje częstotliwości drgań i hałas indukowane przez obrabiarkę. Na podstawie analizy założyłem, że to pasmo częstotliwości nie jest skorelowane ze stanem powierzchni ani szybkością zużycia narzędzia. W związku z tym nie dostarcza ono żadnych cennych informacji, które mogłyby pomóc w przetwarzaniu sygnałów wibracyjnych. Ponadto widma FFT pokazują, że pasmo częstotliwości od 11000 do 20000 Hz nie wykazuje istotnych zmian w strukturze widmowej wszystkich przejść, z wyjątkiem szumu. Zatem pasmo to nie wydaje się być powiązane ze stanem powierzchni ani tempem zużycia narzędzia.

Widma FFT ujawniają również fluktuujący pik, którego wysokość zmienia się w czasie w środku pasma częstotliwości od 7000 do 11000 Hz. Zaobserwowany pik może wskazywać na możliwą korelację ze stanem powierzchni lub stanem zużycia narzędzia. Aby tego dowieść, oszacowałem PSD zebranych sygnałów drgań i wykreśliłem krzywe pokazane na rys. 68. Analiza krzywych PSD potwierdza, że pasmo częstotliwości od 7000 do 11000 Hz wykazuje różne struktury krzywych. Krzywe PSD w tym paśmie wykazują liczne fluktuacje w postaci pików. Pojawianie się i znikanie tych pików może być związane z chropowatością powierzchni lub szybkością zużycia narzędzia. Analiza krzywych PSD pokazuje ponadto, że pasma częstotliwości od 0 do 7000 Hz i od 11000 do 20000 Hz nie korelują z wartościami chropowatości ani szybkością zużycia, ponieważ nie występują żadne zmiany w strukturze ich krzywych, a ich ogólne zachowanie pozostaje stałe przez cały okres.



Rys. 68. Gęstość widma mocy

Aby sprawdzić, czy fluktuacje obserwowane w paśmie częstotliwości od 7000 do 11 000 Hz są skorelowane ze zmianą chropowatości lub zużycia, obliczyłem wskaźnik skalarny GRMS dla każdej krzywej PSD ze wszystkich przejść. Następnie obliczyłem współczynnik korelacji Bravais-Pearsona między wartościami wskaźnika skalarnego GRMS, a dwiema zmiennymi Ra i VB.

Niniejsze badanie przedstawia innowacyjne podejście do monitorowania i prognozowania zmian chropowatości powierzchni i tempa zużycia narzędzi podczas obróbki frezowania. Głównym celem było opracowanie odpowiedniej metody analizy sygnałów drganiowych, umożliwiającej płynniejsze i bardziej bezpośrednie wyodrębnianie istotnych informacji dotyczących zużycia narzędzi i chropowatości powierzchni. Pierwszym krokiem w rozwiązaniu problemu w niniejszym badaniu było wyizolowanie sygnatury drgań i hałasu związanego z obrabiarką za pomocą FFT. Następnie wybrano optymalne pasmo częstotliwości w celu wyodrębnienia najistotniejszych informacji za pomocą rozkładu wielkości (PSD). Następnie zbadano korelację między sygnałami drganiowymi, a chropowatością powierzchni, obliczając wskaźnik GRMS z uzyskanych krzywych PSD. Na koniec opracowano matematyczny model predykcyjny, wykorzystując proste równanie regresji liniowej między GRMS a chropowatością. W toku moich badań uzyskałem następujące główne wyniki:

- analiza PSD okazała się prostym i skutecznym rozwiązaniem pozwalającym na wybór optymalnego pasma częstotliwości zawierającego najwięcej przydatnych informacji,
- pojawianie się i zanikanie szczytów i nierówności w domenie częstotliwości pozwala na dokładną identyfikację anomalii, co ułatwia wybór odpowiedniego pasma częstotliwości,
- wskaźnik skalarny GRMS rośnie proporcjonalnie do wzrostu chropowatości powierzchni,
- narzędzie PSD oszacowane metodą Welch'a oraz wskaźnik skalarny GRMS wykazały swoją komplementarność, tworząc solidne podejście do monitorowania stanu powierzchni i narzędzi skrawających.

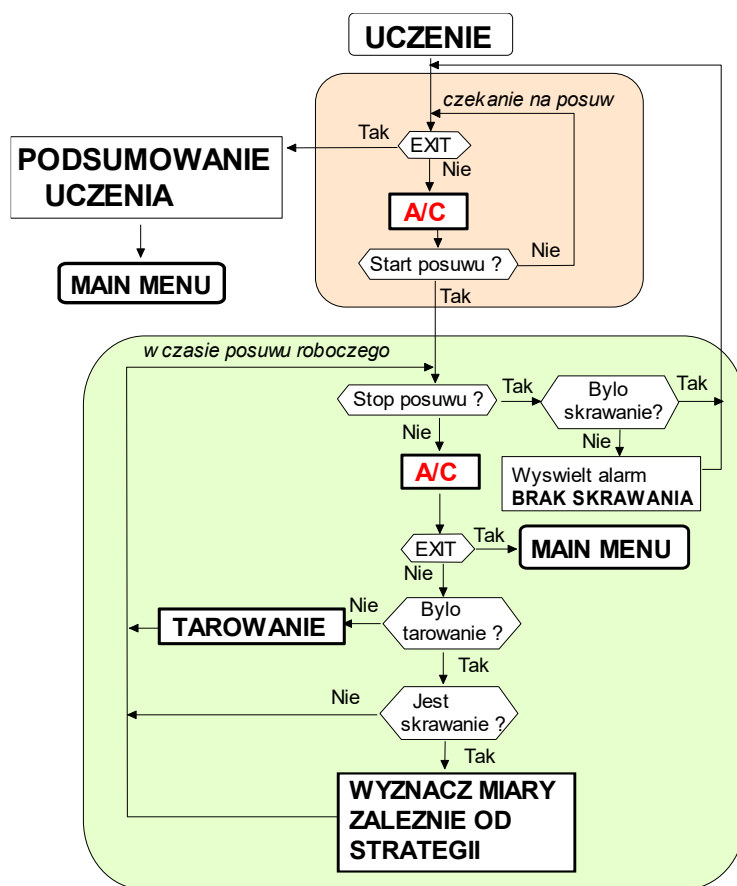
4.4.8. Wirtualny układ monitorowania zużycia ostrza skrawającego

Ważną cechą opracowanej strategii, jaką postanowiono uzyskać, była prostota obsługi układu monitorującego. Oznacza to sprowadzenie ilości informacji wprowadzanych przez operatora do niezbędnego minimum.

Przyjęto, że program główny będzie się składał z trzech modułów (podprogramów) realizujących trzy podstawowe funkcje układu:

1. Ustawienia.
2. Uczenie.
3. Nadzór.

W Ustawieniach po pierwsze należy wskazać zainstalowany na obrabiarce czujnik (co mierzy). Od tej informacji zależy przyjęta miara sygnału. 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. 69) rozpoczyna się od oczekiwania na sygnał startu posuwu roboczego od układu sterowania obrabiarki. 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. 69. 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.

Następnie, o ile do tej pory nie wystąpiło tarowanie układu, jest ono przeprowadzane. Tarowanie polega 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.

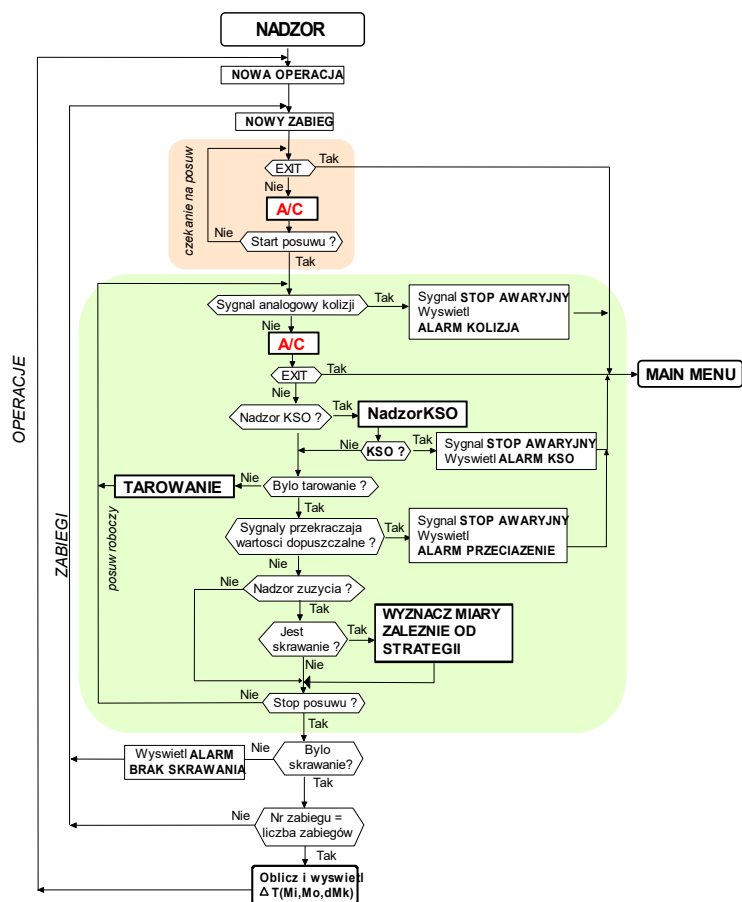
Pierwszym z nich jest sprawdzenie, czy występuje skrawanie (wartości tarowanych sygnałów przekroczyły zadany próg), przy czym jeśli używany jest czujnik sił, spadek wartości sygnału poniżej progu uznawany jest za przerwę w skrawaniu. Jeśli układ uzna, że trwa skrawanie, układ na podstawie tarowanych i filtrowanych sygnałów wyznacza miary sygnałów zależnie od przyjętej strategii.

Po wyjściu z Uczenia, w czasie gdy układ oczekuje na kolejny zabieg, układ przechodzi do podsumowania. 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. 70).

Na początku pętli posuwu roboczego sprawdzana jest analogowa wartość sygnału i porównywana z dopuszczalną. Przekroczenie jej oznacza kolizję i wywołuje 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. 70. 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.

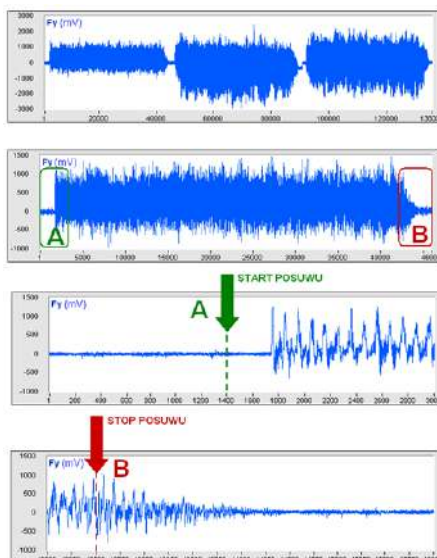
W celu zweryfikowania poprawności działania opracowanej strategii układu nadzoru stanu narzędzia, opracowano specjalny program komputerowy (w LabView) symulujący jego działanie w oparciu o wyniki pomiarów sygnałów sił zarejestrowanych w plikach.

Zgodnie z poczynionymi założeniami opracowano koncepcję symulacji rzeczywistego układu nadzoru (rys. 71).



Rys. 71. Symulowany układ nadzoru stanu narzędzia

Sygnały start-stop posuwu z układu sterowania obrabiarki zastępują numery punktów w opisach plików (nagłówkach). Sygnały z czujników zastępują wyniki pomiarów sił skrawania.



Rys. 72. Metodyka przygotowania zapisanych sygnałów sił skrawania do testowanie programu

Na rysunku 72 pokazano metodykę postępowania przy sporządzaniu zapisów sygnałów sił skrawania, na przykładzie operacji składającej się z trzech zabiegów.

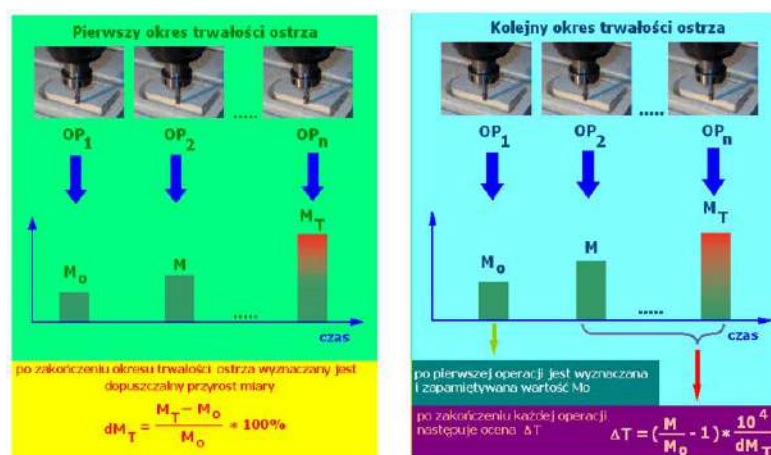
Informacja o starcie i stopie posuwu roboczego została podana w opisie pliku, z którego pobiera informację program.

W ramach testowania Uczenie i Nadzór przeprowadzано 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 stępieniu $VB_B = 0,2 \text{ mm}$). 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.

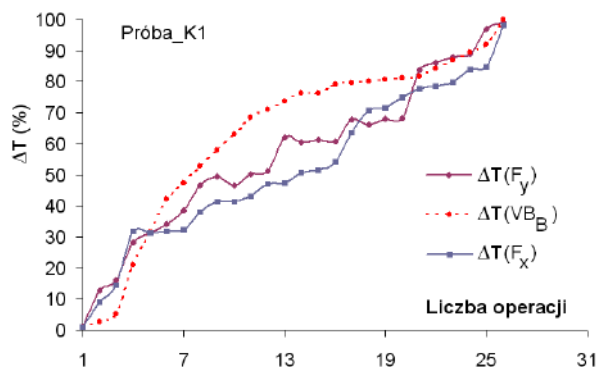
Dla poszczególnych miar (w trakcie uczenia) wyznaczone zostały dopuszczalne procentowe przyrosty miary sygnału (dM_T), które posłużyły do prowadzenia nadzoru na próbach K2, K3, K4 i K5.

W trakcie obróbki wykonywanej nowym ostrzem zapamiętywana była miara początkowa M_0 dla pierwszej operacji (rys. 73). 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 stępionemu – M_T oraz odpowiadający jej dopuszczalny przyrost miary dM_T .

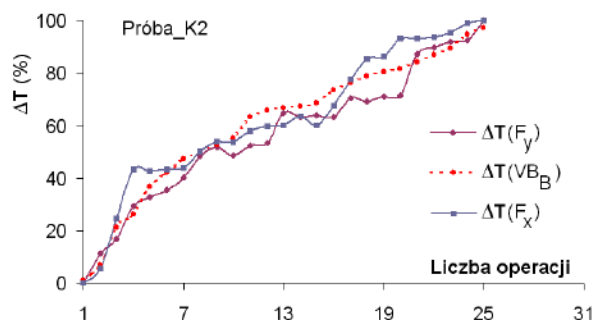


Rys. 73. Procedura Uczenia i Nadzoru

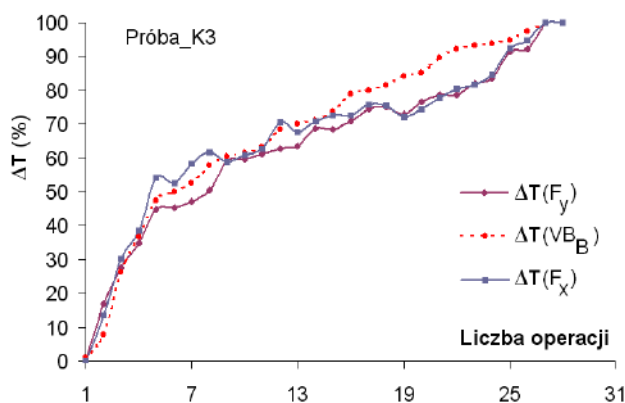
Na rysunkach 74-78 pokazano otrzymane wyniki dotyczące prowadzonego uczenia na wartości przyjętych miar: wartość średnia odchylenia standardowego sygnału siły (F_x)_{dev} i (F_y)_{dev} z całej operacji. Próbą uczącą była próba K1. Następnie prowadzono nadzór na próbach K2-K5. Na przedstawionych wykresach zestawiono także wykorzystaną część okresu trwałości ostrza ΔT , obliczoną jako stosunek aktualnej wartości zużycia ostrza (VB_B) do kryterium stępienia $VB_B = 0,2 \text{ mm} - \Delta T(VB_B)$



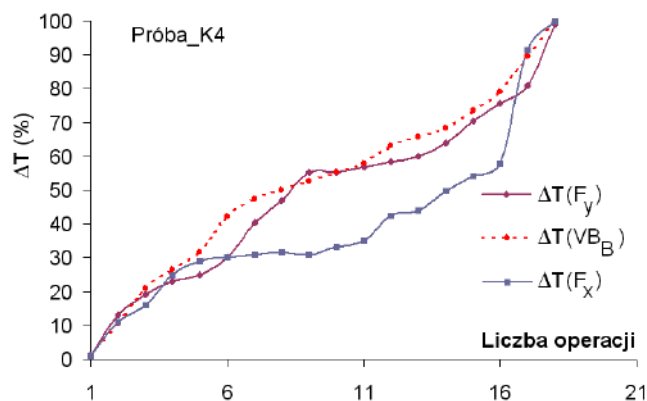
Rys. 74. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie uczenia – próba K1



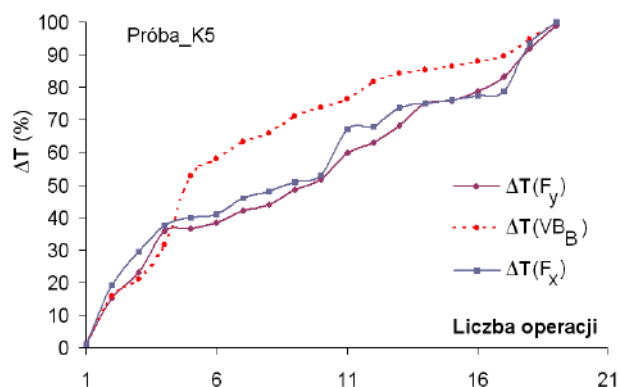
Rys. 75. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K2



Rys. 76. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K3



Rys. 77. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K4



Rys. 78. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K5

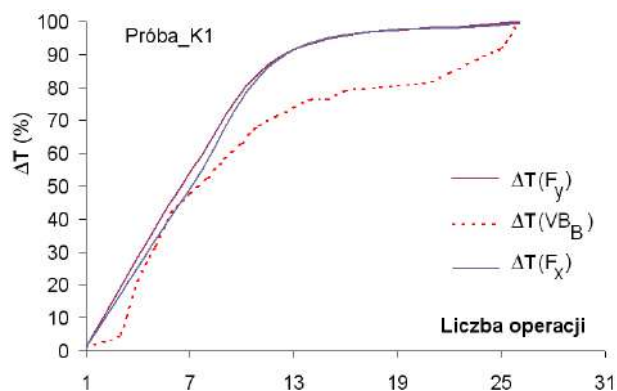
Przy prowadzonym nadzorze (dla przyjętych miar) charakterystyczna jest znaczna dynamika wzrostu wskazań układu dla całego okresu trwałości ostrza. Jest to wynikiem wzrostu sygnałów sił w tym czasie. W ramach przeprowadzonego nadzoru (dla przyjętych miar) współczynnik ΔT osiągnął założoną wartość graniczną (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 .

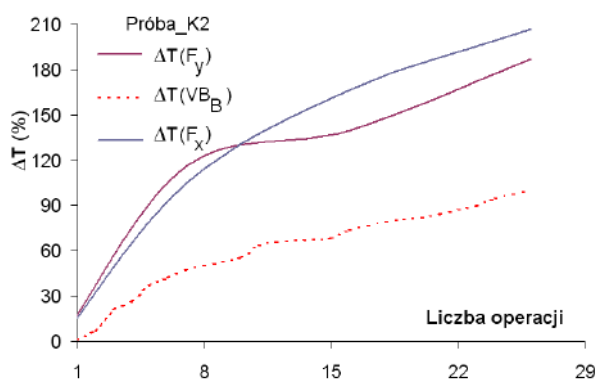
Przedstawione wyniki wskazują na poprawność i przydatność przyjętej strategii nadzoru zużycia ostrza. Podawanie przez układ wykorzystanej części okresu trwałości ostrza znacznie ułatwia operatorowi ocenę tego zużycia, w stosunku do układów tradycyjnych, w których wyświetlana jest jedynie wartość mierzonego sygnału (miary sygnału siły).

Na rysunkach 79-83 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 ΔT , obliczoną jako stosunek aktualnej wartości zużycia ostrza (VB_B) do kryterium stępienia $VB_B = 0,2$ mm - $\Delta T(VB_C)$.

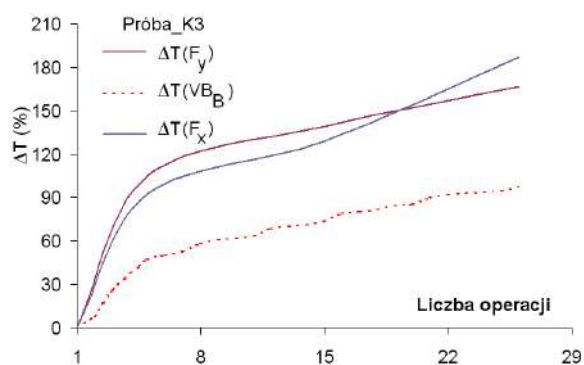
Bardzo istotne jest jednak to, że błędy wskazania zużycia ostrza z definicji maleją do zera (M_k określone jest dla $t = T$, $\Delta T = 100\%$) gdy ostrze osiągnie koniec okresu trwałości. Stępienie ostrza zatem wykrywane winno być prawidłowo nawet jeśli ocena wykorzystanej części okresu trwałości ostrza w jego trakcie jest obciążona błędami.



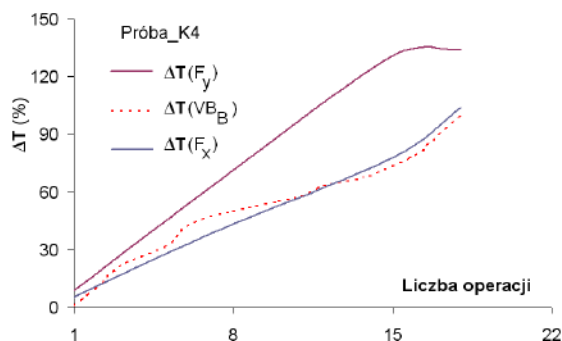
Rys. 79. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K1



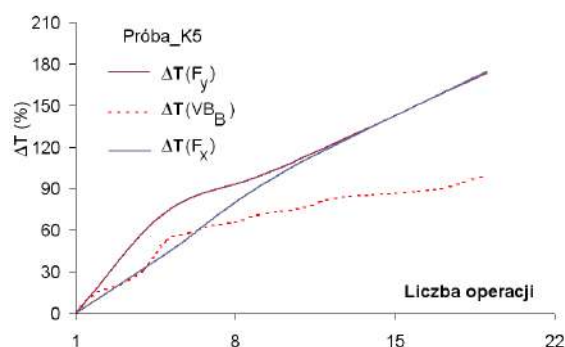
Rys. 80. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K2



Rys. 81. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K3



Rys. 82. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K4



Rys. 83. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K5

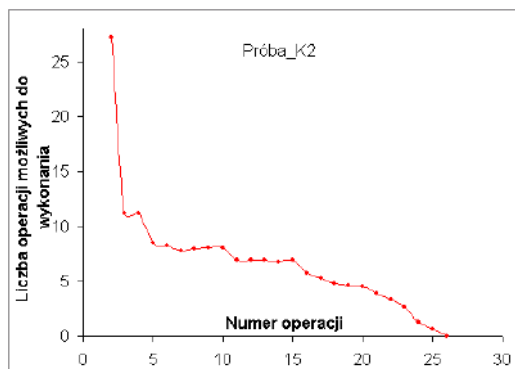
Na podstawie przeprowadzonego Nadzoru (dla przyjętych miar) charakterystyczna jest wyraźna dynamika wzrostu wskazań układu dla całego okresu trwałości ostrza. Jest to wynikiem wzrostu sygnałów siły w tym czasie. W ramach przeprowadzonego Nadzoru (dla przyjętych miar) współczynnik ΔT przekroczył założoną wartość graniczną (ok. 100% dla $VB_B = 0,2$ 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 (115):

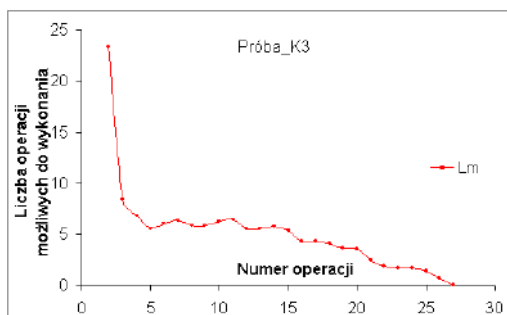
$$L_m = L_w \left(\frac{100}{\Delta T} - 1 \right) \quad (115)$$

gdzie: L_m – liczba operacji możliwych do wykonania, L_w – liczba wykonanych operacji.

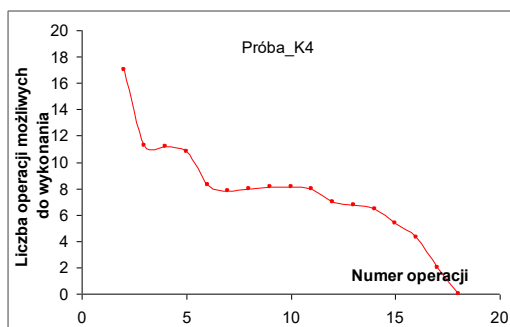
Wskazania układu w przedstawionych próbach (dla miary – odchylenie standardowe sygnału F_y wyglądałyby wtedy jak na rys. 84-87.



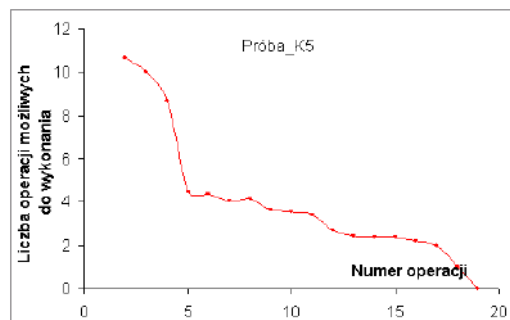
Rys. 84. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K2



Rys. 85. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K3

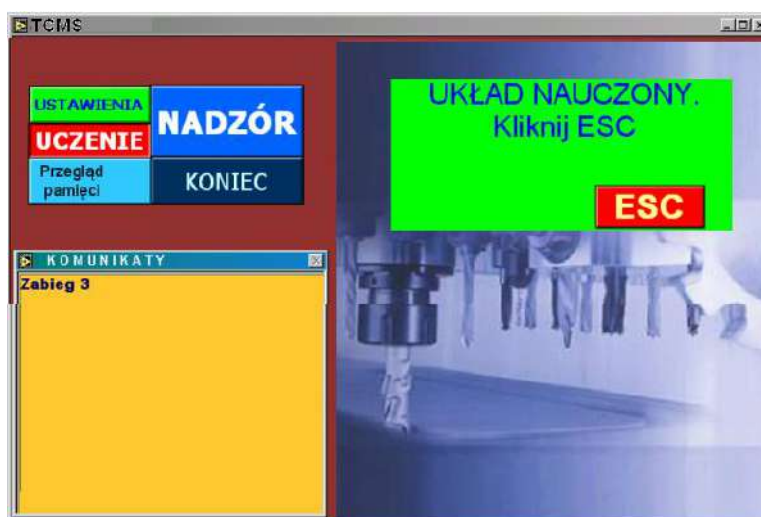


Rys. 86. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K4



Rys. 87. Wyniki pracy układu nadzoru w trakcie prowadzonego nadzoru na próbie K5

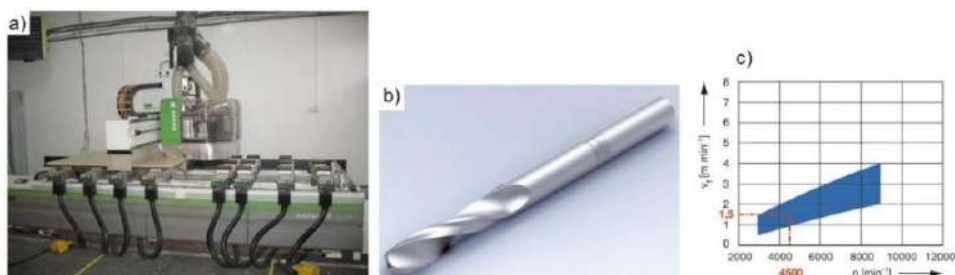
Celem sprawdzenia poprawności działania opracowanej strategii w oparciu o sygnały pochodzące z rzeczywistych, przemysłowych czujników siły skrawania, momentu skrawania i przyśpieszeń przeprowadzono badania w warunkach produkcyjnych (w firmie „STEL-MAZ” zajmującej się produkcją mebli pokojowych, biurowych, 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 określone przez sam program (rys. 88), a niedostępne z zewnątrz.



Rys. 88. Wirtualny układ nadzoru

Badania prowadzono na centrum obróbczym CNC ROVER B4.35 – BIESS (rys. 89a). Zastosowano dwa wiertła kręte o średnicy 5 mm, kącie wierzchołkowym 120°, dwuostrzowe z węgla spiekanego HW, firmy Leitz. (rys. 89b). Wiertło do uniwersalnego wiercenia otworów przelotowych i nieprzelotowych. przeznaczone do: płyt wiórowych i pilśniowych. Pomiar wskaźnika zużycia na-

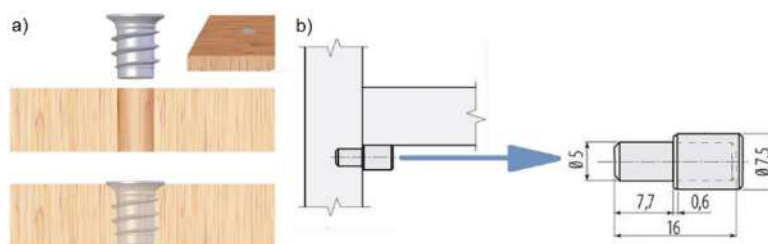
rzędzi (VB_{max}) na zakończenie okresu trwałości ostrza przeprowadzono metodami wizyjnymi. Zastosowano również obiektyw Canon EF 100 mm f/2,8 Macro USM. Uzyskane w ten sposób obrazy cyfrowe analizowano następnie za pomocą własnego programu komputerowego utworzonego w środowisku LabVIEW.



Rys. 89. a) Centrum CNC Biesse Rover B4.35, b) wiertło, c) parametry skrawania,

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. 90b) oraz mufy meblowe (rys. 90a) o średnicy 5 mm, które są wkręcane w płytę meblową, tworząc gwint metryczny, do którego można przykręcić np. stopkę meblową lub regulator wysokości.



Rys. 90. a) mufa meblowa, b) kołek podporowy

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 nauczania 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).

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 dia-

gnostycznych 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 stępienego narzędzia układ monitorujący proces wyznaczył wartość dopuszczalnego przyrostu wartości miary.

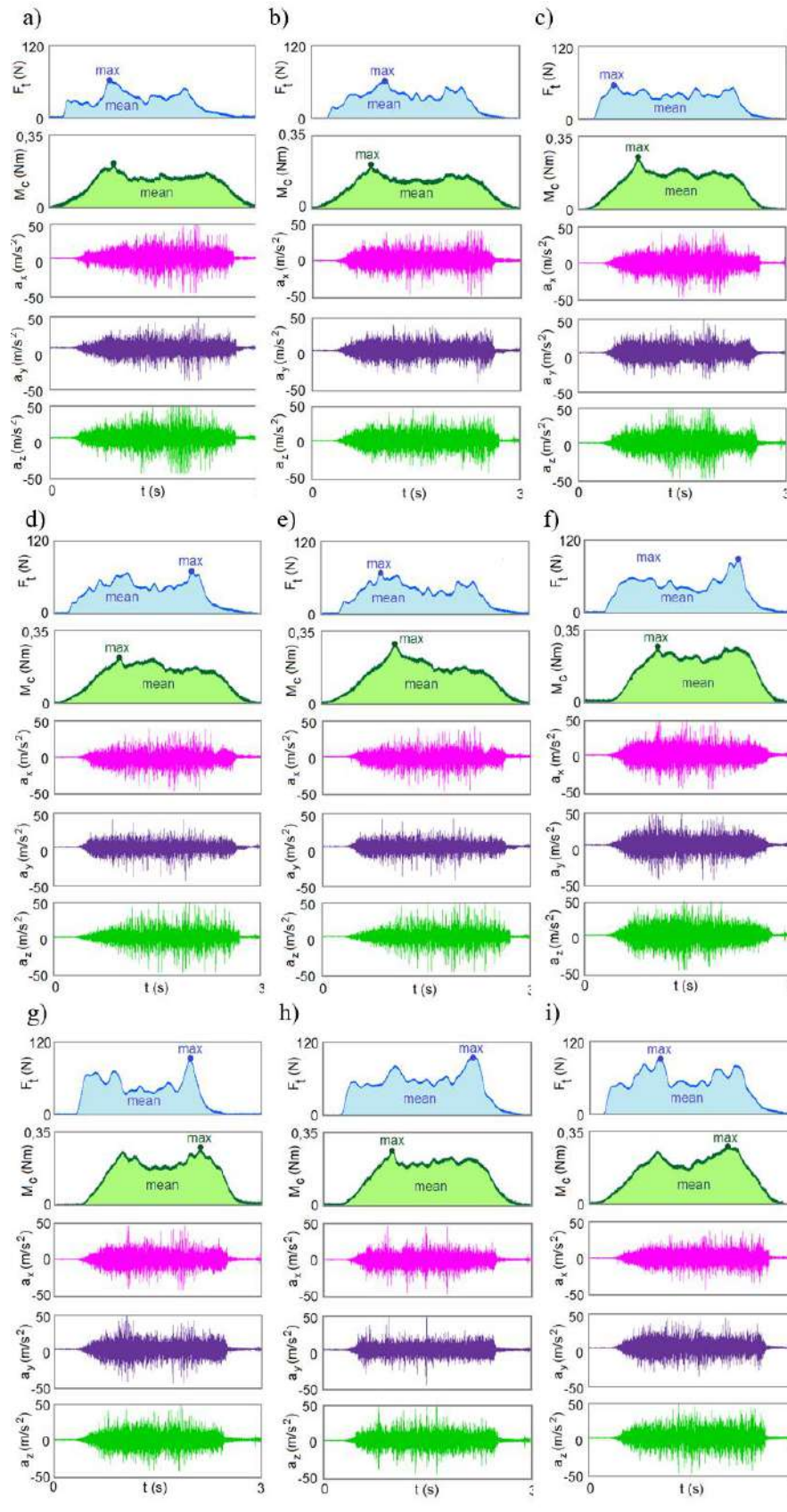
Wartość ta, wprowadzana jest automatycznie do układu monitorującego, pozwoli w procesie nadzoru, określić procentowy przyrost wartości miary sygnału.

Pierwsze po uczeniu uruchomienie nadzoru powinno być wykonywane z wykorzystaniem ostrego narzędzia. Informuje o tym odpowiedni komunikat pokazujący się na panelu czołowym. 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%. 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%.

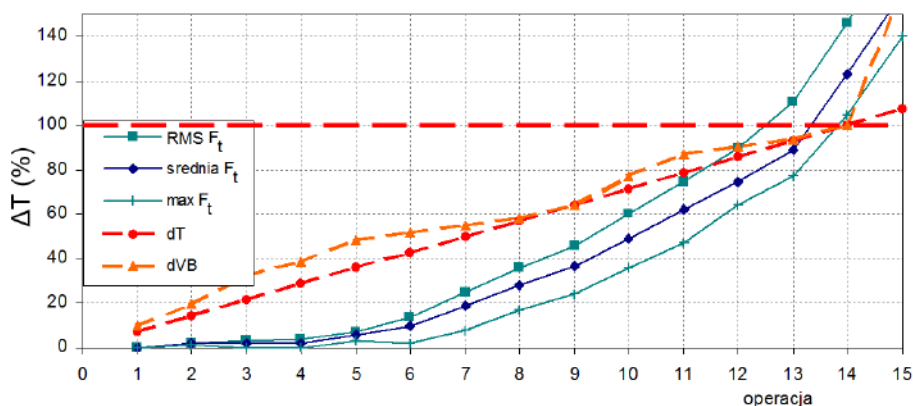
Przebieg zużycia ostrza w czasie trwania drugiego testu był nadzorowany przez program. Przebiegi siły osiowej, momentu skrawania i przyśpieszenia uzyskane w pierwszej próbie trwałościowej narzędzia przedstawiono na rys. 91.



Rys. 91. Przebiegi analizowanych sygnałów zarejestrowane w próbie P2 trwałościowej narzędzia

Na rysunkach 92 i 93 zestawiono wyniki działania opracowanego algorytmu.

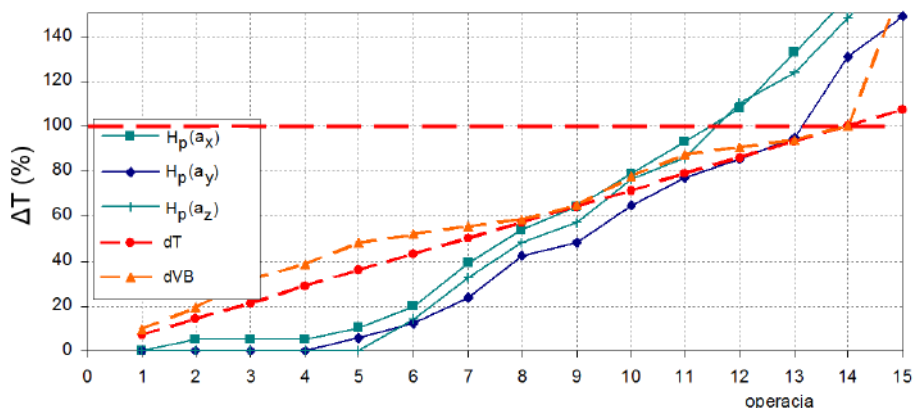
Na rysunku 92 przedstawiono wyniki nadzoru zużycia ostrza wykorzystujące tylko siłę osiową F_t . Grubszymi, przerywanymi liniami oznaczono rzeczywisty przebieg wykorzystanej części okresu trwałości ostrza (stosunek czasu skrawania do tego okresu), będącą z natury rzeczą linią prostą oraz wykorzystaną 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. 92. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem sygnał siły osiowej

Przy korzystaniu z entropii permutacji sygnałów przyśpieszeń (rys. 94) 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.



Rys. 93. Wyniki uzyskane z wykorzystaniem sygnału przyśpieszeń

4.4.9. Podsumowanie

Monografia zgłoszona jako praca dokumentująca osiągnięcie naukowe stanowiące istotny wkład w rozwój dyscypliny inżynieria mechaniczna ukazał się w 2025 roku. Większość badań za-

wartych w monografii jest efektem interdyscyplinarnej współpracy z ośrodkami naukowymi zarówno krajowymi, jak i zagranicznymi specjalizującymi się w inżynierii materiałowej. Tego rodzaju interdyscyplinarność badań była oczywiście merytorycznie uzasadniona, a nawet konieczna, ale miała ona służyć jedynie dokonaniu postępu naukowo-technicznego w zakresie skrawania kompozytów drewnopochodnych. Chodziło o przeanalizowanie współczesnych możliwości zwiększania trwałości ostrzy do obróbki kompozytów drewnopochodnych za pomocą nanoszenia wybranych powłok PVD, określenia energetycznych wskaźników procesu skrawania, jakości powierzchni obrobionej oraz efektywność procesu skrawania. W związku z tym moje osiągnięcie naukowe zawarte w monografii mieści się w następujących obszarach badawczych:

1. Określenie podstawowych właściwości fizyczno-mechanicznych wybranych kompozytów drewnopochodnych.
2. Opracowanie metodyki pomiaru, budowa toru pomiarowego.
3. Zaproponowanie, opartej na wynikach badań własnych, analizy wybranych właściwości mechanicznych płyt warstwowych. Opracowanie metodyki pomiaru i analizy drgań własnych elementów konstrukcyjnych z kompozytów warstwowych.
4. Zidentyfikowanie najbardziej efektywnych parametrów skrawania w aspekcie zużycia i trwałości ostrza, sił skrawania, morfologii wióra i jakości obrobionej powierzchni.
5. Opracowanie metodyki wyznaczania ekonomicznej prędkości skrawania i prędkości skrawania odpowiadającą maksymalnej wydajności.
6. Eksperymentalne określenie trwałości wybranych narzędzi skrawających przeznaczonych do obróbki kompozytów drewnopochodnych (w badaniach zastosowano m.in. ostrza pokryte zarówno standardowymi powłokami narzędziowymi zawierającymi związki Al, Ti).
7. Zaproponowanie metodyki wyznaczania skrawalności kompozytów drewnopochodnych, pozwalającej określić indeks skrawalności, na podstawie sygnałów drgań oraz siły i momentu skrawania w dziedzinie czasu i częstotliwości.
8. Wyznaczenie modeli statystycznych określających wpływu powłok ostrzy skrawających w aspekcie wartości siły, momentu skrawania, temperatury narzędzia skrawającego oraz chropowatości powierzchni.
9. Zaproponowanie wykorzystania wybranych narzędzi sztucznej inteligencji oraz analizy sygnałów ze strefy skrawania w celu monitorowania procesu.
10. Identyfikowanie chropowatości powierzchni przy użyciu sztucznej sieci neuronowej (ANN) z radialną funkcją bazową (RBF) i rozmytego modelu Takagi–Sugeno–Kang (TSK) z klasteryzacją subtraktywną.
11. Opracowanie metody opartej na systemach wizyjnych do rozpoznawania i oceny zadziorów i delaminacji powstających podczas obróbki w oparciu o metody segmentacji progowej i przy użyciu rozmytego układu Takagi–Sugeno–Kang (TSK) z klasteryzacją subtraktywną.
12. Opracowanie koncepcji i metodyki monitorowania procesu skrawania kompozytów drewnopochodnych.

Na podstawie przedstawionej monografii stwierdziłem, że:

1. Instalacja przemysłowych czujników nie nastęrcza większych trudności. Istotny jest jednak właściwy dobór miejsce instalacji (przy frezowaniu), od którego zależy wpływ trudnych do uniknięcia sprzężeń skośnych. 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_y przy frezowaniu narzędziem 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 współczynnikiem tarcia między narzędziem a przedmiotem obrabianym wynikającymi z rodzaju powłoki wiertła. Powlekanie powierzchni wiertła charakteryzują się stosunkowo wyższym współczynnikiem tarcia niż powierzchnia niepowlekanego narzędzia z węgliku spiekane go. 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 współczynnika 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 mapowania 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 μm , podczas gdy błąd oszacowania oparty na logice rozmytej wyniósł 0,198 μm . 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 umożliwia 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 przecięcia, 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 przyśpieszenia. 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.

4.5. Literatura

- [1] Kanayama K., „Deformation processing of wood-based materials and present situation and prospects,” *Mokuzai Gakkaishi* 61(3), pp. 136-140, 2015.
- [2] Haddouche M., Ilinca A., „Energy efficiency and industry 4.0 in wood industry: a review and comparison to other industries,” *Energies* 15(7), p. 2384, 2022.
- [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, p. 206–218, 2019.
- [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), p. 202, 2023.
- [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, p. 81–90, 2022.
- [6] Gogolewski P., Klimke J., Krell A., Beer P., „Al2O3 tools towards effective machining of wood-based materials,” *J Mater Process Technol* 209(5), p. 2231–2236, 2009.
- [7] Miyamoto K., „Importance of research on wood adhesion for wood-based materials,” *Mokuzai Gakkaishi* 61(3), p. 191–195, 2015.
- [8] Warcholinski B., Gilewicz A., „Surface Engineering of Woodworking Tools, a Review,” *Appl Sci* 12, p. 10389, 2022.
- [9] Fischer A., Richter K., Emmenegger L., Künniger T., „PM10 emissions caused by the woodworking industry in Switzerland,” *Holz Als Roh-und Werkstoff* 63, p. 245–250, 2005.
- [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), p. 607–616, 2022.

- [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), p. 012001, 2020.
- [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, p. 380–411, 2022.
- [13] Porankiewicz B.: „A method to evaluate the chemical properties of particleboard to anticipate and minimize cutting tool wear,” *Wood Sci Technol* 37(1), p. 47–58, 2003.
- [14] Sz wajka K., Trzepieciński T.: „Effect of tool material on tool wear and delamination during machining of particleboard,” *J Wood Sci* 62(4), p. 305–315, 2016.
- [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), p. 5845–5857, 2014.
- [16] 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), p. 1030–1039, 2022.
- [17] 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), p. 2971–2993, 2020.
- [18] Wang S.Q.: „Application of product life cycle management method in furniture modular design,” *Math Probl Eng* 2022(1), p. 7192152, 2022.
- [19] Mabkhot M.M., Al-Ahmari A.M., Salah B., Alkhalefah H.: „Requirements of the smart factory system: a survey and perspective,” *Machines* 6, p. 23, 2018.
- [20] 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), p. 242, 2022.
- [21] 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, p. 1–13, 2016.
- [22] 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), p. 164–175, 2023.
- [23] 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), p. 168–180, 2009.
- [24] Zhong Z.W.: „Surface roughness of machined wood and advanced engineering materials and its prediction: a review,” *Adv Mech Eng* 13(5), 2021.
- [25] 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), p. 163–184, 2016.
- [26] Wang G.F., Li Z.M., Dong Y.: „Recent advances in intelligent monitoring of cutting tool condition,” *Aeronaut Manuf Technol* 61(6), p. 16–23, 2018.
- [27] 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), p. 163–167, 2022.
- [28] Diez-Olivan A., Del Ser J., Galar D., Sierra B.: „Data fusion and machine learning for industrial prognosis trends,” *Inform Fusion* 50, pp. 92-111, 2019.
- [29] 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, pp. 73-86, 2014.
- [30] *ISO 8688-1 Tool life testing in milling—part 1: face milling. International Organization for Standardization, Geneva, 6–16, 1989.*

- [31] Porankiewicz B., Jóźwiak 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, p. 35–41, 2015.
- [32] Cristóvão L., Grönlund A., Ekevad M., Siteo R.: „Tool wear for some lesser-known tropical wood species,” *Wood Mater Sci Eng* 6, p. 155–161, 2011.
- [33] Plastov E.F.: „Influence of the carbide tool bluntness on qualitative factors and forces during milling of particleboards,” *Driev Prom* 6, p. 9–10, 1971.
- [34] 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, p. 73–78, 2008.
- [35] Palmqvist J., Johansson G.: „Cutting forces in peripheral milling of wood,” *Proceedings of 14th international wood machining seminar*, p. 751–760, 1999.
- [36] Kowaluk G., Szymanski W., Beer P., Sinn G., Gindl M.: „Influence of tools stage on particleboards milling,” *Wood Res* 52, p. 75–88, 2007.
- [37] 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, p. 530–533, 2014.
- [38] 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, p. 49–57, 2008.
- [39] 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, p. 209–214, 2008.
- [40] Davim J.P., Clemente V.C., Silva S.: „Surface roughness aspects in milling MDF (medium density fibreboard),” *Int J Adv Manuf Tech* 40:, p. 49–55, 2009.
- [41] Davim J.P., Campos Rubio J., Abrão A.: „Delamination assessment after drilling medium-density fibreboard (MDF) by digital image analysis,” *Holzforschung* 61, p. 294–300, 2007.
- [42] Davim J.P., Reis P.: „Drilling carbon fiber reinforced plastics manufactured by autoclave—experimental and statistical study,” *Materials & Design* 24(5), pp. 315-324, 2003b.
- [43] Valarmathi T.N., Palanikumar K., Latha B.: „Measurement and analysis of thrust force in drilling of particle board (PB) composite panels,” *Measurement* 46, p. 1220–1230, 2013.
- [44] Valarmathi T.N., Palanikumar K., Sekar S.: „Parametric analysis on delamination in drilling of wood composite panels,” *Indian J. Sci. Technol.* 6, p. 1–10, 2013.
- [45] Zhao H., Ehmann K.F.: „Development and performance analysis of new spade bit designs,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 42, p. 1403–1414, 2002.
- [46] 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, pp. 431-438, 2008.
- [47] Lin R., van Houts J., Bhattacharyya D.: „Machinability investigation of medium-density fibreboard,” *Holzforschung* 60, p. 71–77, 2006.
- [48] Prakash S., Palanikumar K.: „Modeling for prediction of surface roughness in drilling MDF panels using response surface methodology,” *J. Compos. Mater.* 45, p. 1639–1646, 2011.
- [49] 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), pp. 1097-1108, 1997.

- [50] El-Sonbaty I., Khashaba U.A., Machaly T.: „Factors affecting the machinability of GFR/epoxy composites,” *Composite Structures* 63(3-4), pp. 329-338, 2004.
- [51] Das M.K., Tobias S.A.: „The relation between the static and the dynamic cutting of metals,” *Int. J. Mach. Tool Des. Res.* 7, p. 63–89, 1967.
- [52] Szwałka K., Trzepieciński T.: „On the machinability of medium density fiberboard by drilling,” *BioRes* 13, p. 8263–8278, 2018.
- [53] Jemielniak K.: *Obróbka Skrawaniem–Podstawy, Dynamika, Diagnostyka*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2018.
- [54] Kinzle O.: „Die Bestimmung von Kräften und Leistungen an spanenden Werkzeugen und Werkzeugmaschinen,” *VDI-Z* 94, p. 299–305, 1952.
- [55] Penman D., Olsson O.J., Bowman C.C.: „Automatic inspection of reconstituted wood panels for surface defects,” *Proc. Soc. Photo Opt. Instrum. Eng.* 1823, p. 284–293, 1993.
- [56] Aguilera A.: „Cutting energy and surface roughness in medium density fibreboard rip sawing,” *Eur. J. Wood Wood Prod.* 69, p. 11–18, 2011.
- [57] 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, p. 202–209, 2011.
- [58] Yager R.R., Filev D.P.: „Approximate clustering via the mountain method,” *IEEE Trans. Syst. Man Cybern.* 24, p. 1279–1284, 1994.
- [59] Chiu S.L.: „Fuzzy model identification based on cluster estimation,” *J. Intell. Fuzzy Syst.* 2, p. 267–278, 1994.
- [60] 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, p. 335–346, 2017.
- [61] 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, p. 1884–1894, 2022.
- [62] Bandt C., Pompe B.: „Permutation entropy: A natural complexity measure for time series,” *Phys. Rev. Lett.* 88, p. 174102, 2002.
- [63] Keller K., Lauffer H., Sinn M.: „Ordinal analysis of EEG time series,” *Chaos and Complexity Letters, 1st ed.; Orsucci, F.F., Sala, N., Eds.*, p. 247–258, 2007.
- [64] Amigó J.: *Permutation Complexity in Dynamical Systems: Ordinal Patterns, Permutation Entropy and All That*, Berlin/Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2010.
- [65] Rosso O.A., Larrondo H.A., Martin M.T., Plastino A., Fuentes M.A.: „Distinguishing noise from chaos,” *Phys. Rev. Lett.* 99, p. 154102, 2007.
- [66] Zanin M., Zunino L., Rosso O.A., Papo D.: „Permutation entropy and its main biomedical and econophysics applications: A review,” *Entropy* 14, p. 1553–1577, 2012.
- [67] Bob C., Bill C., Jaap W.: *The FEMCI Book*. NASA GSFC - GSFC Code 542, Delft, Netherlands, 1997.
- [68] Faycal Z.: „Étude de la relation entre deux variables (le coefficient de corrélation),” *In: Statistiques*, pp. 10-13, 2012.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej, w szczególności zagranicznej

Moja aktywność naukowa dotyczy współpracy z krajowymi ośrodkami naukowymi oraz, co jest z tym związane, z przedstawicielami przemysłu krajowego. Nawiązanie współpracy z przemysłem było możliwe dzięki mojemu czynnemu uczestnictwu w krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych. W swojej dotychczasowej karierze naukowej wykazuję się zatrudnieniem w czterech jednostkach naukowych.

W latach 2002-2003 byłem zatrudniony na Wydziale Inżynierii Produkcji Politechniki Warszawskiej w Warszawie jako adiunkt w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych.

W trakcie tego zatrudnienia oprócz realizacji zadań dydaktycznych jak i naukowych uczestniczyłem czynnie w seminariach naukowych, w ramach których miałem możliwość prezentacji wyników swoich prac badawczych.

Celem moich prac wstępnych było opanowanie (przygotowanie oraz praktyczne wdrożenie) metodyki rejestracji sygnałów drgań, hałasu i emisji akustycznej towarzyszących obróbce kompozytów drewnopochodnych oraz zebranie wstępnych wyników pomiarów zależności tych sygnałów od warunków obróbki i stanu narzędzia. Badania zrealizowano w Zakładzie Skrawania i Narzędzi, w Instytucie Technologii Maszyn Politechniki Warszawskiej, który od wielu lat zajmuje się diagnostyką stanu narzędzia i procesu skrawania, a także budową układów nadzorujących.

W Instytucie Technologii Maszyn Politechniki Warszawskiej zbudowałem tor pomiarowy, opracowałem oprogramowanie do rejestracji i wizualizacji danych pomiarowych. Realizacja tych badań obejmowała wymienione poniżej etapy działań:

- opracowanie i uruchomienie oprogramowania do rejestracji i wizualizacji danych na komputerze klasy PC wyposażonym w karty pomiarowe NI PCI-6034E i NI PCI-6111,
- instalacja toru pomiarowego na obrabiarce – przeprowadzenie różnych testów umieszczenia czujników w różnych miejscach, tak aby móc rejestrować sygnał z procesu skrawania możliwie jak najmniej zakłócony przez samą obrabiarkę, jak również przez inne zewnętrzne zakłócenia,
- próby skrawania różnych materiałów – dobór parametrów skrawania, zakresów pomiarowych, obserwacja charakteru zużycia narzędzia i wyznaczenia granicznych parametrów zużycia narzędzia
- rejestrowanie sygnałów podczas obróbki kompozytów drewnopochodnych,
- próby przyspieszenia zużycia freza poprzez skrawanie kompozytów drewnopochodnych.

W latach 2003-2011 byłem zatrudniony na Wydział Matematyczno-Przyrodniczym Uniwersytetu Rzeszowskiego w Rzeszowie jako adiunkt w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych. W trakcie tego zatrudnienia oprócz realizacji zadań dydaktycznych prowadziłem badania naukowe dotyczące trwałości narzędzi skrawających. Za swoją działalność naukową byłem nagrodzony dwukrotnie przez dziekana wydziału grantem dziekańskim: Diagnostyka procesu frezowania tworzyw drzewnych (2007) oraz Aplikacja sieci neuronowych w diagnostyce stanu narzędzia skrawającego, (2008). Miałem możliwość prezentacji wyników swoich prac badawczych na konferencjach krajowych i zagranicznych. W 2005 roku został stypendystą Fundacji na rzecz Nauki Polskiej (Orlando-Floryda, USA).

W latach 2005-2013 byłem zatrudniony w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie na Wydziale Technologii Drewna jako adiunkt w grupie pracowników badawczo-dydaktycznych. W trakcie tego zatrudnienia oprócz realizacji zadań dydaktycznych i naukowych prowadziłem badania naukowe dotyczące trwałości narzędzi skrawających i obróbką kompozytów drewnopochodnych. W latach 2003 -2006 byłem jednym z głównych wykonawców Grant KBN 3 P06L 025 24 Podstawy automatycznej diagnostyki stanu narzędzia oraz procesu skrawania w obróbce drewna i tworzyw drzewnych. W latach 2009-2013 byłem jednym z głównych wykonawców grantu (MNiSzW

Nr N309 007537). Miałem możliwość prezentacji wyników swoich prac badawczych na konferencjach krajowych i zagranicznych. Wymiernym tego efektem był projekt: Zastosowanie metod sztucznej inteligencji do diagnostyki stanu narzędzia przy frezowaniu tworzyw drewnopochodnych na podstawie sygnałów wibroakustycznych i sił skrawania, Grant wewnętrzny, 2005-2006. Za osiągnięcia naukowe (2007) i organizacyjne (2013) otrzymał nagrodę Rektora SGGW. Prace w zakresie analizy stanu zagadnienia z zakresu pomiarów i nadzorowania zużycia realizowałem wspólnie z prof. dr. hab. inż. Jarosławem Górskim, posiadającym dorobek naukowy w zakresie m.in. obróbki mechanicznej kompozytów drewnopochodnych w aspekcie ich zastosowań w przemyśle meblarskim oraz monitorowania i nadzorowania maszyn sterowanych numerycznie CNC, w tym także procesów obróbkowych. Przeprowadziłem dodatkowo pomiary stykowe struktury geometrycznej powierzchni obrobionych oraz wykonałem analizę wyników tych badań z określeniem wpływu zużycia narzędzia skrawającego na wybrane parametry struktury geometrycznej powierzchni obrobionych.

Podstawowym celem moich badań było określenie stopnia zależności (korelacji) między wybranymi miarami sygnałów wibroakustycznych (emisji akustycznej, przyspieszenia drgań, ciśnienia akustycznego) oraz sygnału siły skrawania a stanem narzędzia i procesu skrawania. Chodziło o ustalenie jakie sygnały (oraz które miary tych sygnałów) mogą stanowić najbardziej użyteczne (z punktu widzenia DNiPS) źródło informacji. Z tego względu były to badania niezwykle szeroko zakrojone. Zużyto w nich (wykorzystując całkowity okres trwałości) kilkadziesiąt frezów trzpieniowych tego samego typu. Frezowano trzy rodzaje kompozytów drewnopochodnych: płytę wiórową zwykłą, MDF oraz płytę wiórową laminowaną. Zużyto znaczące ilości arkuszy każdego z tych materiałów. Wszystkie eksperymenty zrealizowano w Hali Technologicznej Wydziału Technologii Drewna SGGW. Wyposażenie tej hali stanowią tradycyjne (konwencjonalne) obrabiarki oraz nowoczesne (należące do typowych obrabiarek stosowanych w najnowocześniejszych zakładach przemysłowych) frezarskie centrum obróbkowe (CNC). Wykorzystując to właśnie centrum obróbkowe zbudowałem stanowisko badawcze, na którym przeprowadzono główną część badań. Badania te nazywałem badaniami „w warunkach laboratoryjnych” ale określenie to wymaga komentarza. Praktycznie rzecz biorąc „laboratoryjność” sprowadza się w tym przypadku jedynie do okoliczności o charakterze czysto organizacyjnym. Dzięki temu, że wspomniana obrabiarka należy do Katedry Mechanicznej Obróbki WTD SGGW uniknięto typowych trudności techniczno-organizacyjnych, które powstają gdy konieczne jest korzystanie (nawet odpłatnie) z „gościnności” przedsiębiorstwa produkcyjnego (na przykład nie trzeba było prosić o zgodę na wykonanie gwintowanego otworu o średnicy 4 mm w korpusie obrabiarki w celu zamocowania przemysłowego czujnika pomiarowego). Wszystkie pozostałe okoliczności odpowiadały typowym warunkom przemysłowym. W szczególności wykorzystywano typową frezarkę CNC, typowe narzędzia i materiał obrabiany. Typowe były też warunki technologiczne (rodzaj operacji, parametry skrawania itd.). Uwzględniano zarówno bezpośrednio (geometryczne) jak i technologiczne wskaźniki zużycia narzędzi.

W trakcie mojego zatrudnienia w Katedrze mechanicznej Obróbki Drewna:

- opracowałem stanowisko do pomiaru oporów skrawania, emisji akustycznej i drgań w procesie frezowania kompozytów drewnopochodnych na przemysłowym centrum obróbkowym Busellato,
- opracowałem oprogramowanie w środowisku LabVIEW do analizy wyników badań,
- prowadziłem pomiary monitorujące zużycie narzędzia wraz z wykonaniem analizy otrzymanych wyników w procesie frezowania tworzyw drewnopochodnych.

Postanowiłem także podjąć próbę wykorzystania szeregu miar ciśnienia akustycznego i hałasu. Dodatkowo, należy zaznaczyć, że badania te przeprowadzono w warunkach przemysłowych (w firmie „STOLBUD zajmującej się produkcją stolarki budowlanej), co czyni je bardziej miarodajnymi. Złożeniem badań było zarejestrowanie sygnałów AE, ciśnienia akustycznego i drgań przy zmiennych parametrach skrawania i zużyciu ostrza. Postanowiono przy tym zastosować piły tarczowe o ostrzach z węgla spiekane firmy FABA PI-521 GA o zębach trapezowo-płaskich. W badaniach postanowiono rejestrować trzy rodzaje sygnałów wibroakustycznych, tj. pomiar ciśnienia akustycznego czyli hałasu oraz drgań wrzeczona głowicy pilarki. Do rejestracji sygnałów drgań i ciśnienia akustycznego posłużyło stanowisko, przedstawione na rysunku 3. Składa się ono z pilarki MAYER

PS 9 Z, czujnik drgań Kistler 8141A121 wraz ze przedwzmacniaczem, mikrofonu NEXUS typ 2690, komputera PC wyposażonego w 12-bitową kartę przetwornika analogowo-cyfrowego NI PCI-6034E, która pozwala próbować sygnał z rozdzielczością 200kHz. Każdy z czujników wymaga układu przedwzmacniaczy z układem filtrów, także mikrofon posiada własny układ wstępnego przygotowania sygnału, tak aby dopasować się do zakresów kart pomiarowych A/C. Istotny wpływ na jakość (przydatność) otrzymanych sygnałów ma odpowiednie ustawienie (dobranie) wzmacnień na przedwzmacniaczu sygnału.

W ramach aktywności naukowej będącej podstawą o ubieganie się o nadanie tytułu nawiązałem ścisłą współpracę z wiodącymi ośrodkami naukowymi zarówno zagranicznymi, jak i polskimi.

Współpracuję prof. Krzysztofem Żabą Wydział Metali Nieżelaznych, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie. Współpraca opiera się na kwestiach związanych z procesem mikro wiercenia w stopach Inconel 625, który charakteryzuje się przedwczesnym pękaniem wiertła ze względu na kruchość i ograniczoną trwałość narzędzia skrawającego. Jeszcze większe problemy występują podczas mikro wiercenia otworów pod kątem ostrym do płaszczyzny obróbki. W takim procesie występują duże trudności związane z niską sztywnością narzędzia, co prowadzi do częstego pękania wiertła podczas obróbki. Prace te stanowią rozszerzenie badań zawartych w poddawanej ocenie monografii przedkładanej jako osiągnięcie naukowe. Efektem prac jest punktowana publikacja naukowa:

Szwajka K., Zielińska-Szwajka J., Żaba K., Trzepieciński T., 2023, An Investigation of the Sequential Micro-Laser Drilling and Conventional Re-Drilling of Angled Holes in an Inconel 625 Ni-Based Alloy, Lubricants, t. 11, z. 9, ISSN: 2075-4442, s. 1-20, IF (2023) = 3,1 MNiSW (2023) = 70.

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_6**

Ponadto współpracuję z prof. Janem Słota Instytut Technologii i Inżynierii Materiałowej, Politechnika Koszycka. Wspólne prace badawcze dotyczą monitorowanie wartości współczynnika tarcia w procesach wytwarzania celem zapewnienia jakości wyrobu, zwiększenia wydajności, ograniczenia wpływu na środowisko i uniknięcia wad produktu. Konwencjonalne techniki monitorowania współczynnika tarcia stwarzają szereg problemów, w tym trudności w identyfikacji cech sygnałów siły wrażliwych na zmiany współczynnika tarcia. Efektem prac są wysoko punktowane publikacje naukowe:

Trzepieciński T., Szwajka K., Szewczyk M., Zielińska-Szwajka J., Słota J., Kašćák L., 2024, The Effect of the Addition of Silicon Dioxide Particles on the Tribological Performance of Vegetable Oils in HCT600X+Z/145Cr46 Steel Contacts in the Deep-Drawing Process MATERIALS, t. 18, z. 1, ISSN: 1996-1944, s. 1-20, IF(2024) = 3,2, MNiSW (2024) = 140

Szwajka K., Trzepieciński T., Szewczyk M., Zielińska-Szwajka J., Słota J., 2025, Surface Topography-Based Classification of Coefficient of Friction in Strip-Drawing Test Using Kohonen Self-Organising Maps MATERIALS, t. 18, z. 13, ISSN: 1996-1944, s. 1-25, IF(2025) = 3,2 MNiSW (2025) = 140

Potwierdzeniem są: **Załącznik_6_7 i Załącznik_6_8**

Od 2023 roku współpracuję Zakładem Technologii Plazmowych i Jonowych, Narodowe Centrum Badań Jądrowych. W szczególności dotyczy to możliwości przeprowadzenia procesu nakładania powłok. Wspólne prace badawcze dotyczą obszaru inżynierii materiałowej - fizykochemia powierzchni materiałów. Wymiernym efektem prac są wysoko punktowane publikacje naukowe:

Trzepieciński T., **Sz wajka K.**, Szewczyk M., Barlak M., Zielińska-Sz wajka J., 2024, Effect of Counter-sample Coatings on the Friction Behaviour of DCO1 Steel Sheets in Bending-under-Tension Friction Tests MATERIALS, t. 17, z. 15, ISSN: 1996-1944, s. 1-19, IF(2025) = 3,2, MNiSW(2024) = 140

Trzepieciński T., **Sz wajka K.**, Szewczyk M., Zielińska-Sz wajka J., Barlak M., Nowakowska-Langier K., Okrasa S., 2024, Analysis of Influence of Coating Type on Friction Behaviour and Surface Topography of DCO4/1.0338 Steel Sheet in Bending Under Tension Friction Test MATERIALS, t. 17, z. 22, ISSN: 1996-1944, s. 1-25, IF(2024) = 3,2, MNiSW(2024) = 140

Szewczyk M., **Sz wajka K.**, Trzepieciński T., Zielińska-Sz wajka J., Barlak M., 2025, Application of the Tensile Bending Test to Determine the Tribological Behavior of DCO1 Steel Sheets TRIBOLOGIA, t. 311, z. 1, ISSN: 0208-7774, s. 67-76, MNiSW(2025) = 70

Sz wajka K., Trzepieciński T., Szewczyk M., Zielińska-Sz wajka J., Barlak M., 2025, Investigating Resulting Surface Topography and Residual Stresses in Bending DCO1 Sheet Under Tension Friction Test Lubricants, t. 13, z. 6, ISSN: 2075-4442, s. 1-26 IF(2025) = 2,9, MNiSW(2025) = 70

Potwierdzeniem są: Załącznik_6_9, Załącznik_6_10, Załącznik_6_11 i Załącznik_6_12

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę

Pracując w Politechnice Warszawskiej 2002 – 2003, prowadziłem zajęcia dydaktyczne z następujących przedmiotów:

- Obróbka skrawaniem i narzędzia,
- Techniki wytwarzania,
- Metrologia,
- Projektowanie procesów technologicznych,
- Automatyzacja procesów technologicznych.

Jako promotor sprawowałem opiekę naukową nad studentami realizującymi prace przejściowe dotyczące projektowanie uchwytów obróbkowych.

Pracując w Uniwersytecie Rzeszowskim 2003 – 2011, prowadziłem zajęcia dydaktyczne z następujących przedmiotów:

- Techniki wytwarzania,
- Metrologia,
- Mechanika techniczna,
- Wytrzymałość materiałów,
- Sterowanie obrabiarek CNC,
- Podstawy konstrukcji maszyn.

Jako promotor sprawowałem opiekę naukową nad 23 studentami pełniąc funkcję promotora:

- 3 prac inżynierskich,
- 20 prac magisterskich.

Pracując w Szkole Głównej Gospodarstwa Wiejskiego 2005 – 2013, prowadziłem zajęcia dydaktyczne z następujących przedmiotów:

- Obróbka skrawaniem i narzędzia,
- Techniki wytwarzania,
- Metrologia,
- Automatyka,
- Sterowanie obrabiarek CNC,
- Projektowanie procesów technologicznych.

Jako promotor sprawowałem opiekę naukową nad 18 studentami pełniąc funkcję promotora:

- 18 prac inżynierskich,

Pracując w Politechnice Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza od 2013 prowadzę zajęcia dydaktyczne z następujących przedmiotów:

- Dynamika maszyn,
- Mechanika analityczna,
- Mechanika ogólna,
- Systemy wirtualne,
- Szkic inżynierski,
- Projektowanie konstrukcji spawanych,
- Wytrzymałość materiałów,
- Fizyka i podstawy modelowania.

Jako promotor sprawowałem opiekę naukową nad 118 studentami, w tym pełniłem funkcję promotora:

- 54 prac inżynierskich,
- 64 prac magisterskich.

Promotor pomocniczy w dwóch przewodach doktorskich:

- mgr inż. Marek Szewczyk (2023) „Analiza wpływu warunków smarowania na opory tarcia i topografię powierzchni blach stalowych głębokotłoczonych w procesie wytłaczania”,
- mgr inż. Piotr Bieniek (2025) „Analiza naprężeń i odkształceń w procesie modelowania płyty oporowej moździerza”.

Potwierdzeniem są: **Załącznik_6_13** i **Załącznik_6_14**

W ramach swojej działalności naukowej i dydaktycznej zaprojektowałem i zbudowałem stanowiska laboratoryjne:

- stanowisko z oprogramowaniem własnym do analizy i archiwizacji sygnałów pochodzących ze strefy skrawania,
- stanowisko do pomiaru siły osiowej i momentu skrawania w obróbce wiercenia z zastosowaniem czujnika piezoelektrycznego,
- stanowisko do pomiaru rozkładu temperatury w procesie wiercenia (termopary, termowizja),
- stanowisko do pomiaru i analizy drgań w procesie wiercenia i frezowania,
- stanowisko do pomiaru i analizy sygnału emisji akustycznej (AE) w procesie wiercenia i frezowania,
- stanowisko do pomiaru i analizy odkształceń za pomocą tensometrii oporowej i czujnika piezoelektrycznego odkształceń,
- stanowisko do pomiaru i analizy sygnału emisji akustycznej (AE) w procesie spawania,
- stanowisko do pomiaru ładunku elektrostatycznego w procesach obróbki kompozytów drewnopochodnych,
- stanowisko do pomiaru odkształceń resztkowych i zakresu odkształceń w procesie autofretażu,
- stanowisko do głębokiego tłoczenia blach (test BUT).

Brałem udział w realizacji projektu pn. „Modelowe rozwiązania na trudne wyzwania – Plan Rozwoju Lokalnego i Instytucjonalnego Stalowej Woli”, realizowanego w latach 2021–2024. Mój udział polegał na przeprowadzeniu zajęć edukacyjnych pn. „Akademia Przemysłu 4.0” skierowanych do uczniów szkół podstawowych oraz seminariów adresowanych do studentów

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_15**

W ramach współpracy z okolicznymi szkołami, jestem osobą odpowiedzialną za wsparcie merytoryczne w przygotowywaniu uczniów do udziału w olimpiadach tematycznych. Wymiernym efektem takiej współpracy jest:

- uzyskanie dwukrotnie tytułu finalisty Olimpiady Wiedzy Technicznej w grupie mechaniczno-budowlanej przez ucznia Liceum Ogólnokształcącego im. Komisji Edukacji Narodowej w Stalowej Woli. Po raz pierwszy w roku 2018 na XLIV OWT w Gdańsku oraz w 2019 roku na XLV OWT w Kaliszu,
- zajęcie pierwszego miejsca przez ucznia Zespołu Szkół nr 1 im. gen. Władysława Sikorskiego w Stalowej Woli w międzywojewódzkim konkursie o tytuł Technika Roku (2024) oraz zajęcie drugiego miejsca Technika Roku (2023),
- udział w ogólnopolskim finale Olimpiady Innowacji Technicznych w Elektronice i Mechatronice uczniów z Zespołu Szkół nr 1 im. gen. Władysława Sikorskiego w Stalowej Woli.

Potwierdzeniem są: **Załącznik_6_16**, **Załącznik_6_17** i **Załącznik_6_18**

W ramach współpracy z okolicznymi szkołami, w laboratorium Wydziału Mechaniczno-Technologicznego Politechniki Rzeszowskiej, prowadzę cykliczne warsztaty z zakresu cyfrowych systemów przetwarzania sygnałów dla uczniów.

W dniu 05 lipca 2023 r. byłem koordynatorem zawarcia Umowy o współpracy Politechniki Rzeszowskiej z firmą Iscar Poland Sp. z o.o. Podpisanie umowy miało miejsce w siedzibie Wydziału Mechaniczno-Technologicznego w Stalowej Woli. Studenci Wydziału Mechaniczno-Technologicznego Politechniki Rzeszowskiej w Stalowej Woli uczestniczyli w specjalnie dla nich zorganizowanym przez firmę ISCAR Poland szkoleniu narzędziowym „Świat narzędzi skrawających – szkolenie dla Inżynierów”. Odbędzie się ono w Katowicach, w Tech Center firmy ISCAR Poland. W ramach takiej współpracy w styczniu i grudniu 2024 r. goszczono na Wydziale Pana Marcina Różańskiego, Dyrektora Technicznego ISCAR Poland. Spotkania były poświęcone prezentacji zaawansowanych technologii obróbki skrawaniem oraz dyskusji na temat narzędzi stosowanych w tych procesach. W kwietniu 2024 r. uczestniczyłem w szkoleniu „Świat narzędzi skrawających – szkolenie dla dydaktyków przedmiotów mechanicznych”

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_19**

Uczestniczyłem w pracach zespołu przygotowującego nowe kierunki studiów inżynierskich „Inteligentne systemy i technologie produkcji”. W ramach prac zespołu byłem odpowiedzialny za kompletne przygotowanie następujących przedmiotów:

- Sensoryka (wykład: 15 godzin, laboratorium: 45 godzin)

Studenci zapoznają się z budową toru pomiarowego, zjawiskiem aliasingu, technikami próbkowania, metodami analizy czasowej i częstotliwościowej sygnałów i wyznaczania ich miar. Poznają podstawy środowiska LabVIEW. Po jego zaliczeniu powinni umieć nazwać i opisać poszczególne typy czujników, znać i rozumieć podstawy ich budowy, zasady działania, rozumieć i umieć wykorzystać ich parametry charakterystyczne, dobrać odpowiedni czujnik do określonego zastosowania, przeanalizować łańcuch pomiarowy i możliwe zakłócenia pomiaru, zarejestrować sygnały w postaci cyfrowej, dobrać odpowiednie metody ich obróbki, analizy i wyznaczania miar.

- Obliczenia inżynierskie i symulacja numeryczna 1 (wykład: 9 godzin, laboratorium: 9 godzin, projekty: 9 godzin)

W dzisiejszym świecie inżynierii, gdzie innowacje technologiczne rozwijają się w zawrotnym tempie, obliczenia inżynierskie stają się kluczowym narzędziem w procesie projektowania i analizy. W szczególności symulacje numeryczne zyskały na znaczeniu, oferując inżynierom możliwość przewidywania zachowań systemów oraz optymalizacji rozwiązań w sposób, który byłby niemożliwy do osiągnięcia bez zaawansowanych technologii obliczeniowych. Studenci poznają nowoczesne metody symulacji, wspierane przez moc obliczeniową komputerów, poznają różne dziedziny inżynierii – od mechaniki, przez inżynierię materiałową, aż po inżynierię środowiskową. Analizują przykłady rzeczywistych zastosowań, które ilustrują, jak dzięki symulacjom inżynierowie mogą z powodzeniem przewidywać wyniki, oszczędzając czas i zmniejszając ryzyko błędów kosztownych błędów w późniejszych etapach projektowania.

- Obliczenia inżynierskie i symulacja numeryczna 2 (wykład: 9 godzin, laboratorium: 18 godzin, projekty: 9 godzin)

- Przetwarzanie i analiza sygnałów (wykład: 9 godzin, laboratorium: 9 godzin)

Studenci zapoznają się podczas zajęć z technikami cyfrowego przetwarzania sygnałów począwszy od akwizycji danych. Zapoznają się ze zjawiskiem aliasingu oraz metodami filtracji antyaliasingowej, technikami próbkowania sygnałów dolno- i górnopasmowych oraz zaawansowanymi technikami próbkowania, takimi jak np. zmianą szybkości próbkowania przez decymację i interpolację. Poznają metody analizy częstotliwościowej sygnałów, jak np. Dyskretne i Szybkie Przekształcenie Fouriera wraz z właściwościami wykonanej analizy, takimi jak wartość amplitudy, rozdzielczość, symetria, przeciek itp. Kolejnym zagadnieniem omawianym podczas zajęć jest filtrowanie cyfrowe

(FIR i IIR) w tym terminologia filtrów, charakterystyki amplitudowe i fazowe poszczególnych filtrów oraz transformaty Laplace'a i Z. Prezentowane są również miary statystyczne sygnałów, takie jak wartość skuteczna, wariancja, skośność, autokorelacja i inne. Ostatecznie prezentowane są metody analizy czasowo-częstotliwościowej sygnałów niestacjonarnych

Ponadto w latach 2020 – 2024 pełniłem odpowiednio funkcje: w Politechniki Rzeszowskiej im I. Łukasiewicza:

- Członek Senatu PRz
- Członek Senackiej komisji do spraw kształcenia
- Członek Uczelnianej komisji dyscyplinarnej do spraw studentów i doktorantów

Ponadto w latach 2020 – 2025 pełniłem lub pełnię odpowiednio funkcje: na Wydziale Mechaniczno-Technologicznym Politechniki Rzeszowskiej im I. Łukasiewicza:

- Kierownik Zakładu Zintegrowanych Systemów Wytwarzania i Tribologii
- Członek Rady Wydziału
- Członek Wydziałowej Komisji ds. Nauki
- Przewodniczący Wydziałowej Komisji ds. dydaktyki
- Członek Wydziałowej Komisji ds. Nagród i Odznaczeń
- Członek Zespołu ds. Strategii WMT

Jestem współautorem skryptów:

- **Szwajka K.**, **Dzieniszewski G.**, Wspomaganie komputerowe w grafice inżynierskiej z wykorzystaniem programu AutoCad2000, OW UR, Rzeszów 2006.
- **Szwajka K.**, **Dzieniszewski G.**, Diagnostyka pojazdów i maszyn, OW UR, Rzeszów 2007.

Potwierdzeniem są: **Załącznik_6_20** i **Załącznik_6_21**

W 2013 roku ukończyłem studia i uzyskałem dyplom Międzynarodowego Inżyniera Spawalnika (IWE - International Welding Engineer). Posiadam także Certyfikat Badań Nieniszczących VT1 oraz VT2. Ponadto, od kilku lat jestem Licencjonowanym Egzaminatorem Spawaczy dla Sieci Badawczej Łukasiewicza – Instytut Spawalnictwa w Gliwicach.

W roku 2023 ukończyłem studia podyplomowe w zakresie przygotowania pedagogicznego. W roku 2024 ukończyłem studia podyplomowe w zakresie nauczania fizyki i matematyki.

Potwierdzeniem są: **Załącznik_6_22**, **Załącznik_6_23**, **Załącznik_6_24**, **Załącznik_6_25**, **Załącznik_6_26**, **Załącznik_6_27** oraz **Załącznik_6_28**

Byłem współorganizatorem w ZZSPiT na Wydziale Mechaniczno-Technologicznym Politechniki Rzeszowskiej wydarzenia naukowego pt.: „Seminarium NAPRĘŻENIA , NARZĘDZIA SKRAWAJĄCE”

Od 2023 roku (do chwili obecnej) jestem przewodniczącym Komisji Egzaminacyjnej na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych II stopnia na kierunku Mechanika i budowa maszyn na Wydziale Mechaniczno-Technologicznym Politechniki Rzeszowskiej im I. Łukasiewicza.

W czasopiśmie Machines (ISSN: 2075-1702; IF: 2.5) w latach 2023-2024 prowadziłem wydanie specjalne jako redaktor gościnny pn. „Tool Wear in Machining”. Obecnie prowadzę wydanie specjalne pn. „Tool Wear in Machining, 2nd Edition” (ISSN: 2075-1702; IF: 2.5).

Potwierdzeniem są: **Załącznik_6_29** oraz **Załącznik_6_30**

Do moich zadań należy wykonywanie recenzji nadsyłanych manuskryptów. Zobligowany jestem także m.in. do doradztwa w zakresie bieżącej działalności badawczej i zakresu tematycznego czasopisma, które mogą być przedmiotem zainteresowania czasopisma, sugerowania tematów wydań specjalnych, sugerowania autorów oraz pełnienia funkcji ambasadora czasopisma na swoim terytorium. Ponadto, do moich zadań należy także pomaganie redaktorom w podejmowaniu decyzji w sytuacjach spornych, w przypadku których recenzenci nie mogą dojść do porozumienia.

Zostałem wyróżniony nagrodą „Top of 1000 Reviewers” w gronie 1000 najlepszych recenzentów MDPI w 2024 r. – naukowców, których wzorowe zaangażowanie w rygorystyczną i konstruktywną recenzję ekspercką, która ma kluczowe znaczenie dla utrzymania najwyższych standardów publikacji naukowych. Zostałem wybrany spośród znakomitego grona 215000 recenzentów z 65 krajów i regionów na całym świecie, ci wyróżnieni wyróżniają się wyjątkową wiedzą specjalistyczną, starannością i zaangażowaniem w rozwój badań poprzez terminowe i przemyślane recenzje.

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_31**

Obecnie w czasopiśmie Recent Progress in Materials (ISSN 2689-5846) prowadzę wydanie specjalne jako redaktor gościnny pn. „Monitoring of Tool Wear and Delamination in Composite Machining: Challenges and Opportunities”. Polimery wzmacniane włóknami są szeroko stosowane w przemyśle lotniczym, wojskowym, obronnym i motoryzacyjnym. Ze względu na niejednorodną, anizotropową i ścierną strukturę kompozytów, podczas przetwarzania występują odkształcenia, które powodują uszkodzenie struktury materiału i pogorszenie jakości powierzchni. Uczenie maszynowe i głębokie uczenie odgrywają kluczową rolę w rozwoju inteligentnych systemów do analizy opisowej, diagnostycznej i predykcyjnej obrabiarek oraz monitorowania stanu procesów. Niniejszy numer specjalny przedstawia przegląd zastosowań, możliwości i wyzwań związanych z podejściami opartymi na danych w inteligentnej obróbce oraz monitorowaniu zużycia narzędzi i jakości powierzchni. Tematyka obejmuje między innymi: modele uczenia maszynowego i głębokiego uczenia stosowane w monitorowaniu obróbki, odporność powłok na zużycie, modelowanie zużycia modyfikowanej powierzchni.

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_32**

Aktualnie jestem na etapie organizacji i utworzenia wydania specjalnego w czasopiśmie Materials (ISSN 1996-1944; IF: 3.2) pn. „Investigation on the Tool Wear in Advanced Materials: Challenges and Opportunities”. Niska obrabialność skrawaniem materiałów lotniczych, takich jak stopy na bazie niklu, stopy tytanu, związki międzymetaliczne γ -TiAl i kompozyty wzmacniane włóknami, a także przyspieszone zużycie narzędzi występujące podczas ich obróbki, wymuszają intensywne prace nad poprawą obrabialności i trwałości narzędzi poprzez rozwój zaawansowanych technik obróbki. Dotyczy to wszystkich procesów skrawania, głównie toczenia, frezowania i wiercenia. Najwyższym priorytetem jest spełnienie rygorystycznych wymagań jakościowych dla komponentów lotniczych, zwłaszcza tych, które wpływają na bezpieczeństwo. Kolejnym istotnym czynnikiem jest oczekiwanie ciągłego wzrostu wydajności produkcji i stabilności procesu. Innowacyjne techniki obróbki materiałów lotniczych obejmują obróbkę bezsmarową, zaawansowane metody chłodzenia (smarowanie minimalną ilością środka smarnego, chłodzenie wysokociśnieniowe i chłodzenie kriogeniczne) oraz hybrydowe procesy obróbki. Aktualne osiągnięcia w rozwoju narzędzi skrawających i wysokowydajnych technik obróbki skrawaniem jednoznacznie wskazują na potencjał wydajniejszej obróbki najczęściej stosowanych materiałów lotniczych, takich jak stop tytanu Ti-6Al-4V, Inconel 718 oraz kompozyty polimerowe wzmacniane włóknem węglowym (CFRP). Wciąż jednak pojawiają się nowe i bardziej zaawansowane materiały lotnicze, takie jak żaroodporne stopy niklu, stopy tytanu o wysokiej wytrzymałości oraz CFRP. W związku z tym konieczne jest podejmowanie ciągłych wysiłków w celu identyfikacji odpowiednich narzędzi skrawających i przeprowadzania dogłębnych badań w celu sprawdzenia ich parametrów skrawania.

Poza monografią przedstawioną do osiągnięć naukowych, opublikowałem 73 artykuły naukowe w wydawnictwach krajowych i zagranicznych oraz 4 rozdziały w monografii naukowej. Opracowanie programów sterujących CNC i prezentowanie centrum obróbkowego (demonstracja kinematyki oraz obróbki), będącego na wyposażeniu ZZSPiT, na potrzeby promocji Wydziału Mechaniczno-Technologicznego w ramach wydarzeń: „Dni otwarte Politechniki Rzeszowskiej” oraz „Nocne Spotkania z Nauką – Noc Odkrywców”, odbywających się cyklicznie w Politechnice Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza.

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. I-VI wnioskodawca może podać inne informacje ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej

Sumaryczny **Impact Factor** czasopism, w których zostały opublikowane artykuły, oraz w których jestem autorem lub współautorem wynosi: **82,604**.

Cytowania artykułów, których jestem autorem lub współautorem na dzień 12.01.2026 r. wynoszą:

- według **Web of Science (WoS)**: wszystkie/bez autocytowań **236/186**,
- według **Scopus**: wszystkie/bez autocytowań **248/200**,
- według **Google Scholar**: **396**.

Indeks Hirscha w zależności od bazy (z dnia 12.01.2026 r.):

- według **Web of Science (WoS)**: **10**,
- według **Scopus**: **10**,
- według **Google Scholar**: **12**.

Za **osiągnięcia naukowe** po uzyskaniu stopnia doktora otrzymałem według punktacji MNiSW **3626** punktów, w tym 156 punktów według punktacji do 2018 r. i 245 punktów według punktacji od 2019 r. do 2021 r.

Postanowieniem Prezydenta Rzeczypospolitej Polskiej z dnia 10 października 2023 r. zostałem odznaczony **Medalem Srebrnym za Długoletnią Służbę**.
Wyróżnienie krajowe, rok otrzymania: 2025

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_33**

Za szczególne zasługi dla oświaty i wychowania zostałem wyróżniony **Medalem Komisji Edukacji Narodowej**.
Wyróżnienie krajowe, rok otrzymania: 2024

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_34**

Za działalność naukową zostałem wyróżniony następującymi nagrodami:

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza za autorstwo/współautorstwo publikacji indeksowanej z listy MNiSW „On the Machinability of Medium Density Fiberboard by Drilling”.
- Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2019

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_35**

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza za autorstwo/współautorstwo publikacji indeksowanej z listy MNiSW „Microstructure and Mechanical Properties of Solid-State Rotary Friction Welded Inconel 713C and 32CrMo4 Steel Joints Used in a Turbocharger Rotor”.
- Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2024

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza za autorstwo/współautorstwo publikacji indeksowanej z listy MNiSW „Improving the Surface Integrity of 316L Steel in the Context of Bioimplant Applications”.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2024

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza za autorstwo/współautorstwo publikacji indeksowanej z listy MNiSW „Experimental Compaction of a High-Silica Sand in Quasi-Static Conditions”.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2024

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza za autorstwo/współautorstwo publikacji indeksowanej z listy MNiSW „The Use of a Radial Basis Function Neural Network and Fuzzy Modelling in the Assessment of Surface Roughness in the MDF Milling Process”.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2024

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_36**

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza indywidualna naukowa III stopnia za cykl prac naukowych dotyczących modelowania i optymalizacji obróbki kształtowej współczesnych materiałów.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2024

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_37**

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza indywidualna naukowa III stopnia za cykl prac naukowych dotyczących zużycia narzędzi skrawających obróbczych.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2017

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_38**

- Nagroda JM Rektora Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie zespołowa III stopnia za osiągnięcia naukowe.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2007

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_39**

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza za współautorstwo publikacji z grupy A (MNiSW) „An Examination of The Tool Life and Surface Quality During Drilling Melamine Faced Chipboard”.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2018

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_40**

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza za współautorstwo publikacji z grupy A (MNiSW) „The Influence of Machining Parameters and Tool Wear on the Delamination Process During Milling of Melamine-Faced Chipboard”.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2018

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_41**

- Nagroda JM Rektora Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie zespołowa organizacyjna II stopnia.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2013

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_42**

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza za współautorstwo publikacji indeksowanej z listy MNiSW „Experimental Study on Drilling MDF with Tools Coated with TiAlN and ZrN”.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2020

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_43**

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza za autorstwo/współautorstwo publikacji „Frictional Characteristics of Deep-Drawing Quality Steel Sheets in the Flat Die Strip Drawing Test”.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2023

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_44**

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza za autorstwo/współautorstwo publikacji indeksowanej z listy MNiSW „Analysis of the Microstructure and Mechanical Performance of Resistance Spot-Welding of Ti6Al4V to DP600 Steel Using Copper/Gold Cold-Sprayed Interlayers”.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2025

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza za autorstwo/współautorstwo publikacji indeksowanej z listy MNiSW „Analysis of Influence of Coating Type on Friction Behaviour and Surface Topography of DC04/1.0338 Steel Sheet in Bending Under Tension Friction Test”.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2025

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza za autorstwo/współautorstwo publikacji indeksowanej z listy MNiSW „Effect of Countersample Coatings on the Friction Behaviour of DC01 Steel Sheets in Bending-under-Tension Friction Tests”.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2025

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza za autorstwo/współautorstwo publikacji indeksowanej z listy MNiSW „Experimental Analysis of Smart Drilling for the Furniture Industry in the Era of Industry 4.0”.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2025

- Nagroda JM Rektora Politechniki Rzeszowskiej im. I. Łukasiewicza za autorstwo/współautorstwo publikacji indeksowanej z listy MNiSW „The Influence of the Shielding-Gas Flow Rate on the Mechanical Properties of TIG-Welded Butt Joints of Commercially Pure Grade 1 Titanium”.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2025

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_45**

- Nagroda Dziekana Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego Uniwersytetu Rzeszowskiego w Rzeszowie w postaci grantu za osiągnięcia naukowe w latach 2004-2006.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2007

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_46**

- Nagroda Dziekana Wydziału Matematyczno-Przyrodniczego Uniwersytetu Rzeszowskiego w Rzeszowie w postaci grantu za osiągnięcia w pracy naukowej.

Nagroda krajowa, rok otrzymania: 2008

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_47**

Dodatkowo ukończyłem szereg szkoleń z zakresu mojej działalności naukowej i dydaktycznej:

- UNI-EXPORT Instruments Polska, szkolenie z zakresu skaningowej mikroskopii elektronowej oraz mikroanalizy rentgenowskiej EDX. Program szkolenia obejmował teorię oraz praktyczną obsługę mikroskopu skaningowego Tescan MIRA oraz systemu EDX AZTec Energy Oxford Instruments.

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_48**

- FREDEN, programowanie i obsługa spawarki laserowej SISMA SWA-300 oraz spawania tą spawką.

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_49**

- FARO, CAM2 2020 – ScanArm obsługa ramienia pomiarowego.

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_50**

- Ośrodek Rozwoju Kompetencji Edukacyjnych szkolenie pn. CANVA w pracy nauczyciela – jak tworzyć atrakcyjne i angażujące materiały dydaktyczne

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_51**

- Ośrodek Rozwoju Kompetencji Edukacyjnych szkolenie pn. W co grają uczniowie – reakcja i skuteczna interwencja nauczyciela

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_52**

Oprócz przedstawionego w monografii podstawowego nurtu badawczego realizowałem dodatkowo badania związane z procesem głębokiego tłoczenia blach, czego wymiernym efektem są publikacje, rozprawa doktorska oraz patent:

1. Patent pn. Przyrząd do wyznaczania współczynnika tarcia, zwłaszcza blach. Numer zgłoszenia: P.444834 (data uzyskania 22.12.2025) Zgłaszający/Uprawniony: Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza.

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_53**

2. Obroniona rozprawa doktorska (w której byłem promotorem pomocniczym) mgr. inż. Marka Szewczyka (2024) „Analiza wpływu warunków smarowania na opory tarcia i topografię powierzchni blach stalowych głębokotłoczonych w procesie wytłaczania”.

Potwierdzeniem jest: **Załącznik_6_54**


.....
(podpis wnioskodawcy)