

Kamil Krot

Innowacyjne technologie w planowaniu produkcji, recyklingu i transporcie technologicznym



Innowacyjne technologie
w planowaniu produkcji, recyklingu
i transporcie technologicznym

Kamil Krot

Innowacyjne technologie w planowaniu produkcji, recyklingu i transporcie technologicznym



Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej

Wrocław 2025

Recenzenci:

Zbigniew BANASZAK

Cezary GRABOWIK

Opracowanie redakcyjne i korekta: Katarzyna SOSNOWSKA

Projekt okładki i skład: Jan KACZOROWSKI

© Kamil Krot 2025

Udostępniono na licencji Creative Commons BY-NC-ND

(<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>)

Oficina Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej

Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław

<http://www.oficyna.pwr.edu.pl>

e-mail: oficwyd@pwr.edu.pl

zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN: 978-83-8134-000-7

DOI: 10.37190/KKrot2025

Druk i oprawa: beta-druk, www.betadruk.pl

Spis treści

Wykaz ważniejszych akronimów	7
Wstęp	9
1. Komputerowo wspomagane planowanie procesów technologicznych	11
1.1. Wiedza technologiczna	13
1.2. Metoda wariantowa	16
1.3. Metody generacyjna i semigeneracyjna	20
1.4. Formaty wymiany danych pomiędzy systemami CAD i CAPP	23
1.5. Reprezentacja brzegowa danych modelu CAD	27
1.6. Hipotezy badawcze w planowaniu procesów	32
1.7. Integracja systemów CAD i CAPP z zastosowaniem obiektów elementarnych	32
1.8. Identyfikacja TOE	40
1.9. Podsumowanie	48
2. Recykling wielomateriałowych kompozytów warstwowych	49
2.1. Recykling urządzeń chłodniczych	50
2.2. Hipoteza badawcza w recyklingu wielomateriałowych kompozytów warstwowych	52
2.3. Wielomateriałowe kompozyty warstwowe w urządzeniach chłodniczych	53
2.4. Linia technologiczna do recyklingu z obróbką laserową	59
2.5. Laserowe przecinanie wielomateriałowych kompozytów warstwowych	61
2.6. Recykling płyt kompozytowych	87
2.7. Podsumowanie	98
3. Transport fluidalny w procesach obróbki chemicznej	101
3.1. Hipoteza badawcza dotycząca transportu w ciągłych procesach produkcyjnych	103
3.2. Dwustronne płytki do obwodów drukowanych	104
3.3. Płytki krzemowe w ogniwach fotowoltaicznych	105
3.4. Ciągłe procesy produkcyjne w obróbce chemicznej	110
3.5. Rozwiązania transportu fluidalnego	115

3.6. Założenia konstrukcyjne transportu fluidalnego	124
3.7. Symulacje numeryczne MBS I i II wariantu transportu fluidalnego	129
3.8. Symulacje metodą CFD wariantu I i II transportu fluidalnego	134
3.9. Badania laboratoryjne wariantu I i II transportu fluidalnego	142
3.10. Porównanie wyników symulacji CFD z wynikami pomiarów	153
3.11. Symulacje numeryczne metodą MBS III wariantu transportu fluidalnego	157
3.12. Badania laboratoryjne wariantu III transportu fluidalnego	158
3.13. Sterowanie transportem płytek w wariacie III transportu fluidalnego	161
3.14. Podsumowanie	165
4. Podsumowanie i kierunki dalszych prac	167
Bibliografia	171
Innovative Technologies in Production Planning, Recycling, and Technological Transport.....	188

Wykaz ważniejszych akronimów

AAG	<i>Attributed Adjacency Graph</i> – graf przypisanego sąsiedztwa
AP	<i>Application Protocols</i> – protokoły aplikacyjne
API	<i>Application Programming Interface</i> – interfejs programowania aplikacji
B-rep	<i>Boundary-representation</i> – reprezentacja brzegowa
CAD	<i>Computer Aided Design</i> – komputerowo wspomagane projektowanie
CAE	<i>Computer Aided Engineering</i> – komputerowe wspomaganie prac inżynierskich
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i> – komputerowo wspomagane wytwarzanie
CAPP	<i>Computer Aided Process Planning</i> – komputerowo wspomagane projektowanie procesów technologicznych
CAX	<i>Computer Aided x</i> – komputerowo wspomagane x (grupa systemów informatycznych wspomagających inżynierów na różnych etapach rozwoju produktu)
CBR	<i>Case-Based Reasoning</i> – rozumowanie bazujące na przypadkach
DXF	<i>Data Exchange Format</i> – format wymiany danych
FOE	Funkcjonalny Obiekt Elementarny
IGES	<i>The Initial Graphics Exchange Specification</i> – wstępna specyfikacja wymiany danych graficznych
KOE	Konstrukcyjny Obiekt Elementarny
LCE	<i>Life Cycle Assessment</i> – ocena cyklu życia
MBD	<i>Model Based Definition</i> – definicja bazująca na modelu (pełny opis produktu w modelu CAD 3D, bez opracowania dokumentacji 2D)
OE	Obiekt Elementarny
OOE	Obróbkowy Obiekt Elementarny
PEF	<i>Product Environmental Footprint</i> – środowiskowy ślad produktu

- PCB *Printed Circuit Board* – płytki do obwodów drukowanych
- PLM *Product Lifecycle Management* – zarządzanie cyklem życia produktu
- PMI *Product and Manufacturing Information* – informacje o produkcji i wytwarzaniu
- STEP *Standard for the Exchange of Product model data* – standard do wymiany danych modelu produktu
- TOE Technologiczny Obiekt Elementarny

Wstęp

Metody i techniki stosowane w projektowaniu produktu i rozwoju jego cyklu życia są zagadnieniem aktualnym i ważnym dla wielu sektorów gospodarki. Mimo iż przeważnie są już bardzo zaawansowane, nadal istnieje potrzeba prowadzenia badań w tym zakresie oraz opracowania nowych rozwiązań.

Niniejsza monografia jest podsumowaniem prac badawczych dotyczących definiowania wymagań funkcjonalnych produktów i planowania procesów ich wytwarzania, rozwiązań transportu technologicznego, a także technik usprawniających recykling i ponowne użytkowanie produktów po wycofaniu ich z użytkowania. Opracowanie przeznaczone jest dla inżynierów, konstruktorów i technologów, jak również projektantów i programistów systemów informatycznych.

Inżynierowie i architekci oprogramowania CAD/CAE/CAPP odnajdą w monografii systematykę Obiektów Elementarnych w technicznym przygotowaniu produkcji. Szczególnie interesujące mogą być Funkcjonalne Obiekty Elementarne, pozwalające na parametryczne definiowanie kluczowych aspektów produktów na wczesnym etapie ich rozwoju. Określane własności produktów mogą dotyczyć procesów ich wytwarzania, transportu technologicznego czy podatności na recykling i ponowne użytkowanie.

Projektanci linii technologicznych do recyklingu mogą posilkować się opisanymi innowacyjnymi rozwiązaniami z zakresu recyklingu wielomateriałowych kompozytów warstwowych, umożliwiającymi otrzymanie produktów recyklingu o wysokiej czystości i wartości rynkowej. Opisano również technologię przetwarzania kompozytowych obudów sprzętu chłodniczego na panele do izolacji termicznej dla branży budowlanej, co wpisuje się w koncepcję częściowego ponownego użytkowania produktów wycofanych z eksploatacji.

Technologów i inżynierów projektujących ciągle procesy obróbki chemicznej zainteresować mogą rozwiązania transportu technologicznego płytek PCB oraz płytek krzemowych stosowanych do produkcji paneli fotowoltaicznych. Opracowane warianty transportu elementów w cieczy procesowej minimalizują bądź całkowicie eliminują fizyczny kontakt transportowanych elementów z częściami przenośników, co zmniejsza prawdopodobieństwo uszkodzeń elementów w procesach produkcyjnych, ogranicza kosztowne przestoje i serwisowanie linii technologicznych.

W pracy można znaleźć odpowiedzi na pytania:

- Jak definiować wymagania funkcjonalne produktów i wpływać na dalsze etapy jego rozwoju w oprogramowaniu CAD/CAE/CAPP?
- W jaki sposób przetwarzać dane produktów z systemów CAD 3D na potrzeby planowania procesów obróbkowych?
- Które parametry są kluczowe w laserowym przecinaniu kompozytów warstwowych z blachy stalowej, pianki poliuretanowej i tworzywa sztucznego?
- Jak zaprojektować linię do recyklingu kompozytowych obudów sprzętu chłodniczego z uwzględnieniem częściowego ponownego użytkowania i otrzymania produktów recyklingu o wysokiej wartości rynkowej?
- Które rozwiązania transportu technologicznego płaskich elementów w ciągłych procesach obróbki chemicznej umożliwiają osiągnięcie wysokiej niezawodności?

Praca składa się z czterech rozdziałów. Rozdział pierwszy obejmuje zagadnienia związane z planowaniem procesów technologicznych. Opisano w nim systematykę obiektów elementarnych w technicznym przygotowaniu produkcji z uwzględnieniem funkcjonalnych obiektów elementarnych. Omówiono także algorytmy identyfikacji technologicznych obiektów elementarnych z danych geometrycznych zapisanych w systemach CAD 3D w reprezentacji brzegowej B-rep (*ang. boundary representation*).

W rozdziale drugim przedstawiono wyniki prac badawczych dotyczących recyklingu i ponownego użytkowania wielomateriałowych kompozytów warstwowych. Opisano metodę przecinania kompozytów warstwowych stosowanych na obudowy sprzętu chłodniczego z zastosowaniem technologii laserowej oraz technologię oczyszczania arkuszy tworzywa sztucznego z pozostałości pianki izolacyjnej.

Rozdział trzeci zawiera opis wyników prac dotyczących rozwiązań transportu komponentów w cieczy w procesach produkcyjnych z ograniczonym i całkowicie wyeliminowanym kontaktem mechanicznym transportowanych elementów z częściami przenośników. Rozwiązania zawierają cztery warianty przenośników fluidalnych, w tym transporter z gazowym separatorem kąpieli procesowych i alternatywnymi konstrukcjami płyt transportujących, jak również transporter fluidalny elementów w orientacji wertykalnej.

Rozdział czwarty zawiera podsumowanie trzech poprzednich i wskazanie kierunków dalszych prac.

Komputerowo wspomagane planowanie procesów technologicznych

Rozwój technik komputerowych spowodował, że możliwe stało się opracowanie i udostępnienie szeregu rozwiązań w postaci aplikacji i systemów komputerowych wspierających działania inżynierskie. Rozwiązania te obejmują projektowanie CAD (ang. *Computer Aided Design*), analizę i obliczenia inżynierskie (ang. *Computer Aided Engineering* – CAE), wspomaganie projektowania procesów wytwarzania (ang. *Computer Aided Manufacturing* – CAM) (Feldhausen, Heinrich, Saleeby, Burl, Post, MacDonald i Love, 2022; Mauthner, Votruba, Ramsauer, Plessing, Trautner i Bleicher, 2022; Xiao, Zhang, Zhou, Chi i Zhang, 2024). Wymienione narzędzia stanowią najbardziej powszechny zestaw stosowany w firmach produkcyjnych. Ich wykorzystanie umożliwia stosunkowo łatwe zalgorytmizowanie zadań i opracowanie rozwiązań uniwersalnych, możliwych do zastosowania w różnych dziedzinach gospodarki. Jednak nawet w obszarach tak uniwersalnych jak systemy wspomagające projektowanie CAD opracowano specjalne moduły dedykowane określonym grupom produktów lub technologiom, które mają być wykorzystane w procesie wytwarzania danych produktów. Producenci oprogramowania obok podstawowych modułów systemów CAD do projektowania mechanicznego oferują moduły do konstrukcji spawanych, a także do projektowania elementów z blachy czy form wtryskowych (Hoshiba, Arakai i Fukushige, 2024; Kosalaraman, Kendre, Manilal i Muthuganapathy, 2024).

Mimo istnienia wielu klas systemów komputerowych wspierających różne obszary inżynierskie, ogólnie określanych skrótem CAX, w realiach przemysłowych przygotowanie planu realizacji procesów technologicznych często jest zadaniem wykonywanym manualnie przez doświadczonych technologów – planistów procesów. Systemy komputerowe realizujące funkcje planowania procesów (ang. *Computer Aided Process Planning* – CAPP) powinny wypełnić tę lukę, jednak mimo ich rozwoju i doskonalenia nie opracowano dostępnych komercyjnie i sprawnych systemów jak w obszarze projektowania kon-

strukcyjnego CAD czy planowania procesów wytwarzania CAM (Xu, Wang i Newman, 2011; Besharati-Foumani, Lohtander i Varis, 2019; Wen, Liu, Du, Qu, Sheng, Liu i Zhou, 2022).

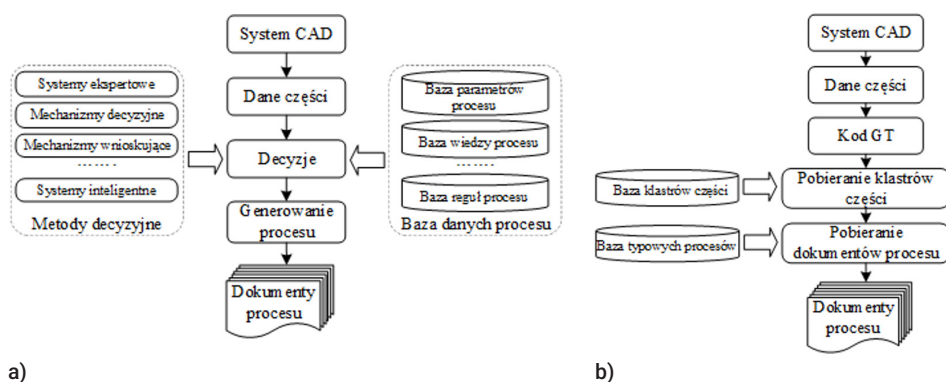
Wen i in. (2022) podkreślają, że kierunki prac badawczych nad rozwojem systemów CAPP powinny dotyczyć inteligentnych metod przetwarzania wiedzy technologicznej, jak również bazowania na faktycznych, bieżących zdolnościach produkcyjnych systemu wytwarzania, pobieranych bezpośrednio z produkcji w odróżnieniu od zasobów nominalnych zapisanych na stałe. W planowaniu procesów powinny być brane pod uwagę takie kwestie, jak zużycie energii z możliwością planowania jej zapotrzebowania w procesie produkcji oraz stopień oddziaływania produktów na środowisko naturalne.

Planowanie procesów wytwarzania, rozumiane jako proces decyzyjny, ma kluczowe znaczenie w cyklu rozwoju produktu. W zasadzie już pierwsze etapy, które są związane z projektowaniem koncepcyjnym i analizami inżynierskimi, warunkują powstanie pewnych założeń determinujących procesy technologiczne konieczne do zastosowania w celu otrzymania produktu zgodnego ze specyfikacją w dokumentacji wykonawczej (Han, Huang, Huang, Jiang i Li, 2023). Planowanie procesów wytwarzania odbywa się na podstawie danych konstrukcyjnych, jednak część prac w tych obszarach może zazębiać się, co skraca czas cyklu rozwoju produktu. Już na początku lat 90. XX w. wprowadzono pojęcie inżynierii współbieżnej (ang. *concurrent engineering*) i rozpoczęto implementację tych metod w różnych gałęziach przemysłu i gospodarki (Chanan i Menon, 1994; Weiss, Dostatni, Hamrol i Miedziński, 1998; Chlebus, 2000; Pobożniak, 2001). Ideą prac było maksymalne zrównoleglenie czynności podczas rozwoju produktu, a w konsekwencji skrócenie sumarycznego czasu trwania tego procesu, jak również minimalizacja kosztów związanych z wprowadzaniem zmian w dokumentacji. Zintegrowane obszary planowania procesów i systemów montażowych opisano w pracy (Duda, 2018).

Prace nad skomputeryzowaniem i usprawnieniem projektowania procesów technologicznych trwają od lat 70. XX w. Dotychczas opracowano jednak niewiele systemów o poziomie funkcjonalności pozwalającym na wdrożenie w przedsiębiorstwach produkcyjnych. Badania dotyczące tej tematyki często kończyły się prototypowymi aplikacjami informatycznymi i wymagały dalszego rozwoju w celu doprowadzenia rozwiązań do funkcjonalności akceptowalnej w firmach (Soori i Asmael, 2021; Madan, Kunal i Kumar, 2022). Wśród komputerowych metod usprawniających pracę technologa wyróżnia się dwa główne podejścia: wariantowe i generacyjne (Azab, Osman i Baki, 2024).

Przebieg planowania procesu wytwarzania w myśl idei wariantowej i generacyjnej jest scharakteryzowany w publikacji (Xiao, Zhenga, Shi, Du i Honga, 2023) (rys. 1.1). Systemy CAPP działające z zastosowaniem metody wariantowej zostały wprowadzone, jednak ich ograniczona funkcjonalność i konieczność dostosowania warsztatu pracy technologów do wymagań tychże systemów warunkowały umiarkowane zainteresowanie użytkowników.

Obecnie zaobserwować można dążenie do implementacji rozwiązań systemów CAPP bazujących na podejściu generacyjnym, co podkreślono w publikacjach dotyczących tej tematyki (Xu, Wang i Newman, 2011; Yusof i Latif, 2014; Zhou i Camba, 2021).



Rys. 1.1. Planowanie procesów: a) metoda generacyjna, b) metoda wariantowa. Źródło: oprac. własne na podstawie: (Xiao, Zheng, Shi, Du i Hong, 2023)

Zarówno podejście generacyjne, jak i wariantowe stosowane w planowaniu procesów do opracowania dokumentacji technicznej wymagają wykorzystania wiedzy technologicznej. W obu metodach sposób reprezentacji, zapisu oraz mechanizmów wykorzystania wiedzy technologicznej są jednak odmienne.

1.1. Wiedza technologiczna

Procesy technologiczne powinny przede wszystkim umożliwiać osiągnięcie efektu technologicznego, którym w zależności od rozpatrywanego procesu są stany pośrednie, półprodukty lub produkty zgodne ze specyfikacją wymiarową i dokładnościową oraz z założeniami przyjętymi w wymaganiach funkcjo-

nalnych. Osiągnięcie zamierzonego efektu końcowego jest elementem kluczowym, jednak technolog – planista przygotowujący proces w warunkach produkcyjnych – w przygotowaniu procesu wytwarzania musi uwzględniać zazwyczaj narzucone ograniczenia i dodatkowe warunki. Warunki te mogą dotyczyć czasu i kosztu realizacji procesu, dostępności dobranych wstępnie stanowisk pracy, pracowników, materiałów i zasobów produkcyjnych. Poprawne zaplanowanie wszystkich etapów realizacji procesu wymaga gruntownej wiedzy z określonej dziedziny technologicznej oraz doświadczenia i umiejętności przewidywania efektów zastosowanych procesów, narzędzi, stanowisk pracy, pomocy warsztatowych (Adapa i Jagadish, 2023).

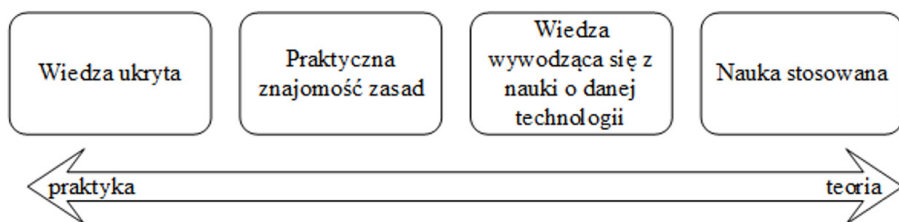
Na podstawie analizy literatury przedmiotu można wyróżnić cztery podstawowe typy wiedzy (Skogh i De Vries, 2013; Wen, Ma i Wang, 2023):

- wiedzę ukrytą (ang. *tacit*);
- praktyczną znajomość zasad;
- wiedzę wywodzącą się z nauki o technologii;
- naukę stosowaną.

W pracy (Houkes, 2009) zaproponowano znacznie bardziej skomplikowany podział na rodzaje wiedzy technologicznej oraz podkreślono istotne różnice pomiędzy wiedzą naukową a technologiczną. Wiedza rozumiana jest jako:

- reguły strukturalne występujące jako zależności pomiędzy elementami systemu technicznego;
- technologiczne prawa, transformację praw naturalnych w odniesieniu do procesów technicznych;
- reguły funkcjonalne określające działanie wymagające podjęcia go w celu osiągnięcia pożądanego wyniku w danych okolicznościach;
- technologiczne know-how, zawierające niejawną wiedzę i umiejętności;
- społeczno-techniczne zrozumienie zawierające systematyczną wiedzę na temat relacji pomiędzy rozpatrywanymi obiektami, środowiskiem naturalnym a praktyką społeczną.

Przedstawiony wyżej podział nie uwzględnia praktycznych aspektów wiedzy technologicznej. Nie wprowadza wyraźnej granicy pomiędzy wiedzą a umiejętnościami lub między różnymi częściami wiedzy, które można kodyfikować. Dlatego na rysunku 1.2 przedstawiono horyzontalne uporządkowanie zależności pomiędzy praktycznymi a teoretycznymi aspektami wiedzy.



Rys. 1.2. Praktyczne i teoretyczne aspekty wiedzy technologicznej.

Źródło: oprac. własne na podstawie: (Skogh i De Vries, 2013)

Wiedza ukryta jest zdecydowanie praktyczna. Wynika ze stosowania określonych działań i otrzymywania założonych rezultatów bez analizowania przyczyn takiego stanu rzeczy. Praktyczna znajomość zasad jest nieco bardziej teoretyczna od wiedzy ukrytej, ponieważ można wyrazić ją w słowach opisujących zasady postępowania. Kolejne dwa rodzaje wiedzy nie powstają w efekcie działań praktycznych, ale wskutek rozwoju dziedziny nauki zajmującej się daną technologią. Wiedza wywodząca się z nauki zajmującej się daną technologią koncentruje się na otrzymywaniu określonych rezultatów z niewielkim naciskiem na opracowanie formalnego opisu teoretycznych przesłanek wpływających na efekt techniczny. Natomiast nauka stosowana dąży do wykorzystania w praktyce wyników prac teoretycznych i prowadzonych badań naukowych, z możliwością formalizacji wiedzy często zbyt szczegółowo z uwagi na potrzeby technologów jako praktyków.

Nieco inny punkt widzenia przedstawiono w pracy (Grabowik i Knosala, 2003): wskazano na podział uwzględniający tylko dwa podstawowe rodzaje wiedzy:

- Wiedzę proceduralną, bazującą na zbiorze procedur reprezentujących wiedzę z określonego obszaru.
- Wiedzę deklaratywną, przedstawioną w postaci faktów oraz reguł obowiązujących w danej dziedzinie.

Nawiązując do wymienionych powyżej metod planowania procesów technologicznych, zauważyć można proceduralny charakter wiedzy ukrytej w wariantowych systemach CAPP. W zasadzie trudno tutaj mówić wprost o procedurach reprezentujących wiedzę, ponieważ w wariantowym planowaniu procesów można zaobserwować tylko efekty tych procedur i formalny zapis technologii w postaci wzorcowego procesu. Zasadnicze przesłanki wpływające na kształt procesu technologicznego pozostają jednak niewyartykułowa-

ne. Można doszukiwać się pewnych analogii pomiędzy etapami technologii a przyczynami tak ukształtowanego procesu, co może prowadzić do odkrycia nowej wiedzy. Postępowanie takie obarczone jest jednak istotnie niepewnością w zakresie poprawności wykrytych zależności i w efekcie zagrożona jest jakość tak uzyskanej wiedzy technologicznej.

Metoda generacyjna w planowaniu dopuszcza deklaracyjny zapis wiedzy w postaci faktów oraz reguł, co przekłada się na jawność zapisanej wiedzy, możliwość wglądu w jej strukturę i dalsze doskonalenie (Chlebus, Krot i Kuliberga, 2012). W systemach CAPP w zakresie możliwości zapisu wiedzy w celu wykorzystania jej do planowania procesów stosowano różne podejścia (Schuh, Prote, Luckert i Hünnekes, 2017). W planowaniu procesów wytwarzania posługiwano się metodami deklaracyjnymi w postaci drzew decyzyjnych oraz tabeli decyzyjnych. Z powodzeniem wykorzystywano również metody logiki rozmytej oraz sztuczne sieci neuronowe (Rojek, 2015; Jun, Raja i Park, 2001). Drzewa decyzyjne oraz podejścia bazujące na tabelach decyzyjnych stosowane były do rozwiązywania różnych zadań związanych z planowaniem technologicznym. W pracy (Sormaz i Khoshnevis, 2003) był to wybór alternatywnych procesów wytwarzania oraz sekwencjonowania operacji obróbkowych. Rolę sztucznych sieci neuronowych oraz głębokiego uczenia maszynowego w identyfikacji procesów przypisanych do Obiektów Elementarnych (OE) opisano w pracy (Huang, Fang, Huang i Jiang, 2024). Głębokie uczenie maszynowe w planowaniu i sekwencjonowaniu procesów obróbkowych opisano w pracach (Zhang, Wang, Zhang, Zhang, Zhou, Wang, Huang i Huang, 2024a; Zhang, Wang, Wang, Zhang, Zhou, Huang i Zhang, 2025).

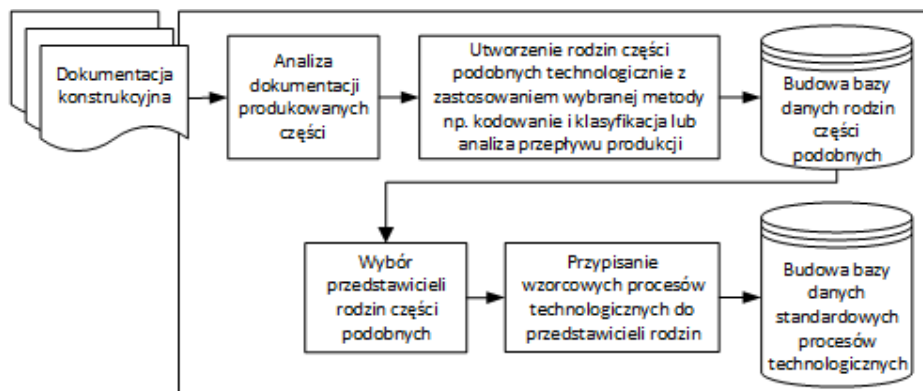
1.2. Metoda wariantowa

W planowaniu procesów technologicznych metoda ta przypomina tradycyjne, manualne podejście do opracowywania dokumentacji technologicznej. Na podstawie analizy literatury przedmiotu oraz sposobu funkcjonowania wariantowego systemu CAPP w podejściu tym można wyróżnić dwie fazy: przedprodukcyjną i produkcyjną (Duda, 2003; Gawlik, Plichta i Świć, 2013; Chougule i Ravi, 2005).

Przedstawione na rysunku 1.1b etapy projektowania procesu według metody wariantowej są modelem dość uproszczonym. W ramach prowadzonych prac badawczych określono szczegółowy przebieg planowania wariantowe-

go, wydzielając fazę przygotowawczą (przedprodukcyjną) i eksploatacyjną (produkcyjną).

Na etapie przedprodukcyjnym (rys. 1.3) systematyzowana jest dokumentacja konstrukcyjna i technologiczna części. W fazie produkcyjnej, na bazie przygotowanych wzorców możliwe jest utworzenie dokumentacji technologicznej części wykazujących podobieństwo do części rozpatrywanych w fazie przedprodukcyjnej.



Rys. 1.3. Metoda wariantowa w planowaniu procesów – faza przedprodukcyjna.

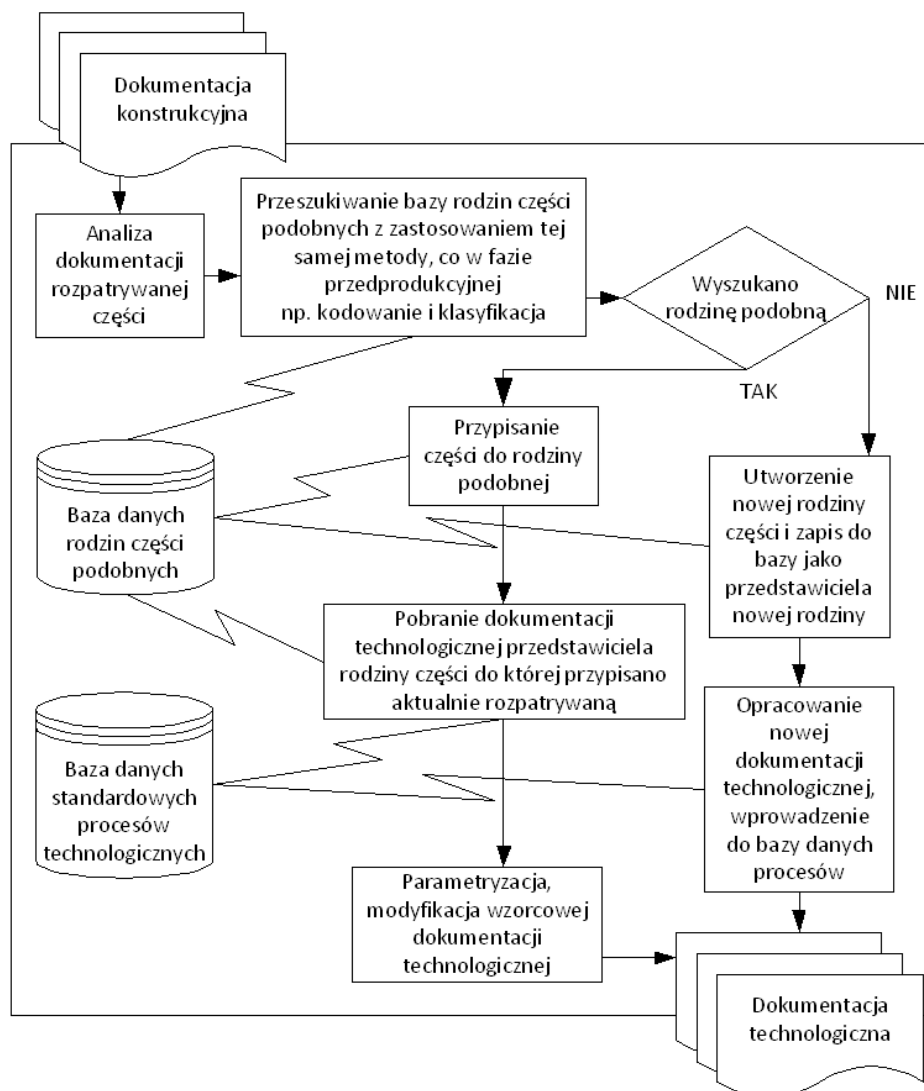
Źródło: oprac. własne na podstawie: (Chougule i Ravi, 2005; Xiao i in., 2023)

Pierwszym etapem fazy przedprodukcyjnej jest przeanalizowanie rozpatrywanego w danym systemie produkcyjnym asortymentu produktów/części i wybór odpowiednich metod wyróżniania ich grup wykazujących podobieństwo pod jakimś względem. Podobieństwo to powinno zostać określone na podstawie wskazanych cech charakterystycznych, które mają najistotniejsze znaczenie w danym systemie produkcyjnym. Cechy te powinny umożliwić ukierunkowanie na specyficzne dla danej grupy procesy technologiczne.

W kolejnym etapie do przedstawicieli grup części podobnych należy przypisać wzorcowe procesy technologiczne, a następnie zarchiwizować je w bazie danych procesów standardowych. W fazie produkcyjnej (rys. 1.4) po wczytaniu dokumentacji konstrukcyjnej należy zastosować tę samą metodę przyporządkowania do rodzin części podobnych, która wykorzystywana była w fazie przedprodukcyjnej.

W przypadku odnalezienia rodziny, do której rozpatrywana część jest podobna, należy przypisać ją do tej rodziny w bazie danych. Następnie należy pobrać wzorcową dokumentację dla przedstawiciela rodziny części, dokonać

w niej niezbędnych zmian i wyemitować. Jeśli nie zostałyby zidentyfikowana rodzina, do której rozpatrywana część wykazywałaby podobieństwo, dla części tej należy założyć nową rodzinę i zapisać ją w bazie danych. Następnie należy utworzyć nową dokumentację, przypisać ją do nowo założonej rodziny i zapisać w bazie danych standardowych procesów.



Rys. 1.4. Metoda wariantowa w planowaniu procesów – faza produkcyjna.

Źródło: oprac. własne na podstawie: (Chougule i Ravi, 2005; Xiao i in., 2023)

Jednym z istotniejszych etapów działania systemu CAPP opartego na metodzie wariantowej jest ustalenie zasad wyróżniania rodzin części wykazujących podobieństwo technologiczne. Opracowując metodykę identyfikacji, wprowadzono reguły kodowania i klasyfikacji należące do technik wykorzystywanych w technologii grupowej. Najbardziej znanymi systemami klasyfikacji i kodowania części są: OPITZ, MICLASS, DCLASS, KK3 (Piłot i Knosala, 1998; Holland, Long i Mynors, 2002).

Przykładem wariantowego CAPP jest komputerowy system wspomagający planowanie procesów technologicznych wałków POLCAP (Wieczorowski i Uniejewski, 1998). System ten, opracowany w Instytucie Technologii Maszyn Politechniki Poznańskiej, zbudowany jest z modułów, a opracowanie technologii odbywa się w formie dialogu użytkownika z aplikacją komputerową. Wariantową metodę planowania procesów technologicznych wykorzystano również w zintegrowanym systemie SYSKLASS (Matuszek i Plinta, 2000). Oprogramowanie, podobnie jak POLCAP, ma budowę modułową i zawiera m.in. moduły „Konstrukcja” i „Technologia”, które funkcjonalnie są bezpośrednio związane z planowaniem procesów technologicznych. Wykorzystano w nim rozwiązania technologii grupowej, implementując graficzny klasyfikator produkowanego asortymentu.

Na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej prowadzono prace badawcze w obszarze komputerowych metod wspomagających planowanie procesów technologicznych. Wczesne prace dotyczyły zastosowania systemów ekspertowych do planowania procesów obróbki wybranych klas przedmiotów (Lustig, Paluszyński, Smalec i Choroszy, 1990; Choroszy, Lustig i Smalec, 1993). Wariantowe podejście do planowania procesów technologicznych zaimplementowano w zintegrowanym pakiecie oprogramowania PROEDIMS do zarządzania cyklem życia produktu (ang. *Product Lifecycle Management* – PLM). Jednym z modułów pakietu jest moduł o nazwie CAPP, bazujący na wariantowym planowaniu procesów technologicznych (Cholewa i Czajka, 2018). Moduł ten usprawnia projektowanie procesu technologicznego przez udostępnienie użytkownikowi biblioteki standardowych operacji i procesów, które następnie można dołączać do struktury produktu i w razie potrzeby zmodyfikować. Oprogramowanie umożliwia przygotowanie kompletnych procesów technologicznych w powiązaniu z komponentami struktury produktu.

1.3. Metody generacyjna i semigeneracyjna

W odróżnieniu od podejścia wariantowego w podejściu generacyjnym w systemach CAPP brak jest odniesienia do procesów technologicznych opracowanych wcześniej w danym systemie produkcyjnym (Lee, Ihee i Park, 2007; Czajka, Krot i Kuliberda, 2007; Gawlik i in. 2013). Podejście to zakłada opracowanie dla każdego zlecenia procesu technologicznego wraz z dokumentacją wykonawczą dla działu technologicznego, niezależnie od tego, czy dany komponent był już produkowany, czy jest nowy w systemie produkcyjnym (Huang, Chaiprapat i Waiyagan, 2016). Funkcjonalność generacyjnych CAPP powinna obejmować automatyczne interpretowanie danych geometrycznych, wymiarów, charakterystyk dokładnościowych wynikających z dokumentacji wykonawczej. Natomiast w skład najistotniejszego modułu tego rodzaju systemu powinny wchodzić inteligentne narzędzia umożliwiające zapis wiedzy technologicznej i wykorzystywanie tej wiedzy do opracowania procesu technologicznego. Ostatni etap obejmuje generowanie danych wyjściowych oraz przygotowanie dokumentacji technologicznej.

Metoda generacyjna jest kłopotliwa w implementacji. Najbardziej skomplikowane etapy to przygotowanie danych konstrukcyjnych, które umożliwia ich dalsze automatyczne przetwarzanie w systemie CAPP, oraz samo opracowanie planu procesów technologicznych z zastosowaniem odpowiednich algorytmów. Z uwagi na te trudności w ramach kompleksowego projektowania i wykonania systemów generacyjnych opracowano rozwiązanie pośrednie, stosowane w systemach CAPP, a mianowicie metodę semigeneracyjną (Xiao i in., 2023), stanowiącą kombinację podejścia wariantowego i generacyjnego (Duda i in., 2002). Celem wykorzystywania takich hybrydowych systemów CAPP jest redukcja udziału technologa w manualnym procesie przygotowania planu procesów przez wykorzystanie do opracowania technologii wytwarzania metod heurystycznych i reguł (Lee, Alam i Zhang, 2001). Systemy hybrydowe nie oferują jednak użytkownikom w pełni automatycznego generowania dokumentacji technologicznej. Często niezbędne okazują się opracowane wcześniej szablony operacji, określające zgrubny plan obróbki danych klas części, który następnie jest modyfikowany do potrzeb aktualnie rozpatrywanego wyrobu. Funkcjonalność takich systemów obejmuje w niektórych przypadkach automatyczne dobieranie narzędzi, obrabiarek bądź parametrów obróbki (Duda i Habel, 2019). W pracy (Zheng, Mu i Xiao, 2011) przedstawiono propozy-

cję systemu CAPP z opracowanym na własne potrzeby systemem kodowania cech geometrii powierzchni części. W jego dalszych etapach, w sposób pół-automatyczny generowana jest dokumentacja technologiczna na podstawie wbudowanych baz wiedzy.

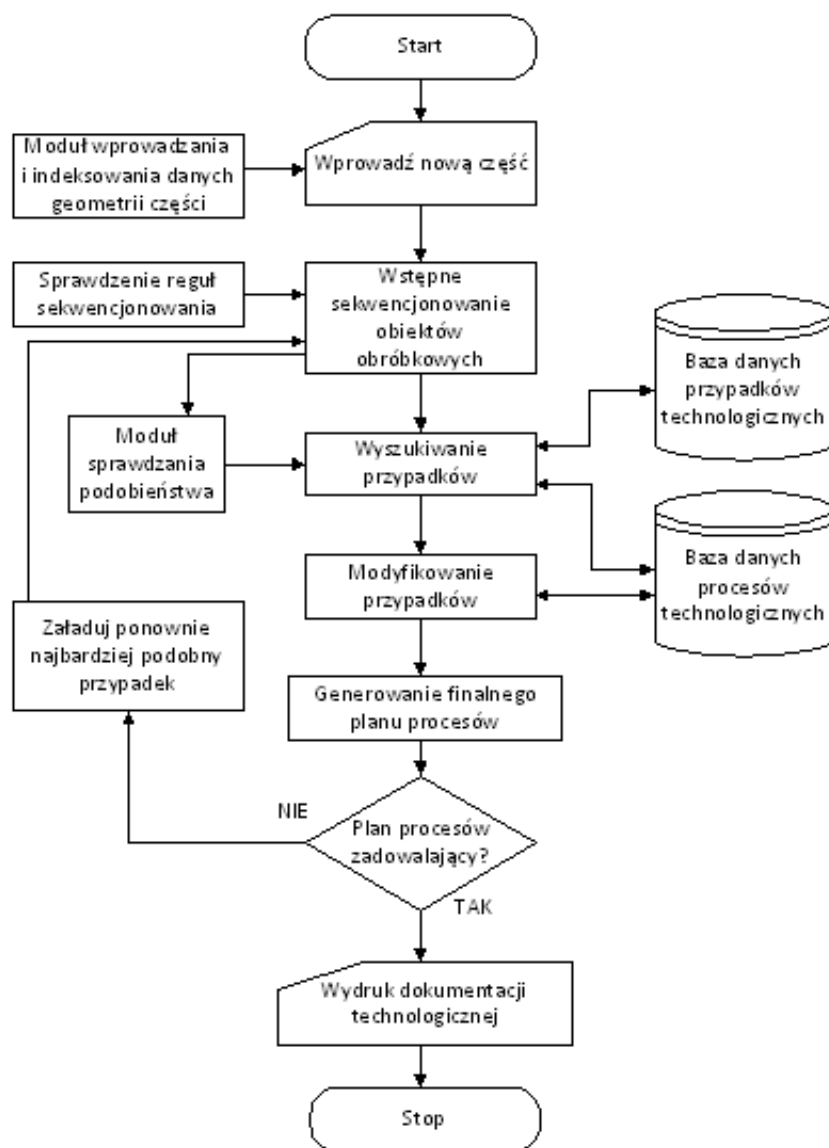
Analizując strukturę i zasadę działania semigeneracyjnych systemów CAPP, można wyróżnić:

- Systemy z możliwością działania w jeden zdefiniowany sposób postępowania w toku opracowania technologii, z częściowo uwzględnionymi metodami planowania wariantowego oraz podejściem generacyjnym.
- Systemy z możliwością działania w jednym z dwóch trybach: wariantowym lub generacyjnym, w zależności od skomplikowania geometrii rozpatrywanej części lub złożoności wymaganych operacji technologicznych.

Przykład zastosowania pierwszego rodzaju systemów ilustruje rys. 1.5. Ich działanie opiera się na metodzie wnioskowania na podstawie przypadków (ang. *case-based reasoning* – CBR) zagadnień technologicznych. Metoda ta wykazuje pewien stopień podobieństwa do wariantowego planowania procesów, ponieważ jej podstawę stanowią bazy danych bibliotek zadań technologicznych, które wystąpiły wcześniej w danym systemie wytwarzania. Plan procesów nie jest jednak wprost adaptowany do określonego rodzaju części, ale dokonywana jest jego modyfikacja z funkcją sprzężenia zwrotnego do etapu sekwencjonowania OE, przez co system wykazuje pewne cechy charakterystyczne dla podejścia generacyjnego (Tiwari, Rama Kotaiah i Bhatnagar, 2001). W praktycznej implementacji podejście to wymaga wprowadzania warunku kończącego iteracyjne realizowanie pętli polegającej na ładowaniu ponownie najbardziej podobnego przypadku oraz precyzyjnego zdefiniowania, co warunkuje, że plan procesów jest zadowalający. Funkcjonalność obu opisanych podejść zapewniają częściowo opracowane narzędzia wspomagające planowanie procesów, w dalszym ciągu wymagające jednak od użytkownika wysokiego stopnia interakcji podczas przygotowania technologii wytwarzania skomplikowanych przedmiotów.

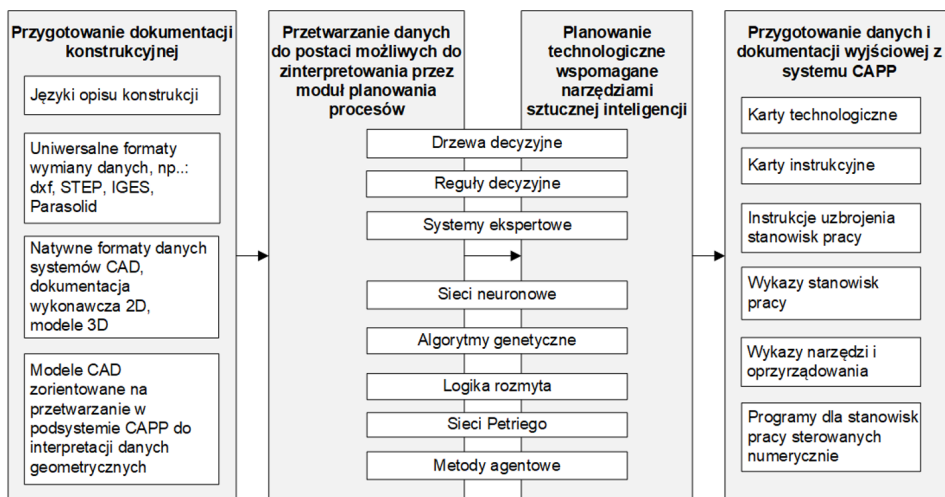
Planowanie procesów z wykorzystaniem metody generacyjnej powinno zmierzać do otrzymania dokumentacji technologicznej, obejmującej specyfikację etapów kluczowych w danej technologii wytwarzania (Krot i Kuliberda, 2006; Wu, Huang, Zeng i Fan, 2021). Główne etapy opracowania można przedstawić jako powiązania pomiędzy obszarem przygotowania postaci konstrukcyjnej wyrobu a planowaniem procesów technologicznych (rys. 1.6). Etapy te to kolejno:

1. Przygotowanie dokumentacji konstrukcyjnej (danych z modelu CAD).
2. Przetwarzanie danych konstrukcyjnych do postaci możliwej do zinterpretowania przez moduł planowania procesów.
3. Planowanie technologiczne wspomagane narzędziami sztucznej inteligencji.
4. Przygotowanie danych i dokumentacji wyjściowej z systemu CAPP.



Rys. 1.5. Schemat działania semigeneracyjnego systemu CAPP – CBR.

Źródło: oprac. własne na podstawie (Tiwari i in., 2001)



Rys. 1.6. Etapy metody generacyjnej w planowaniu procesów.

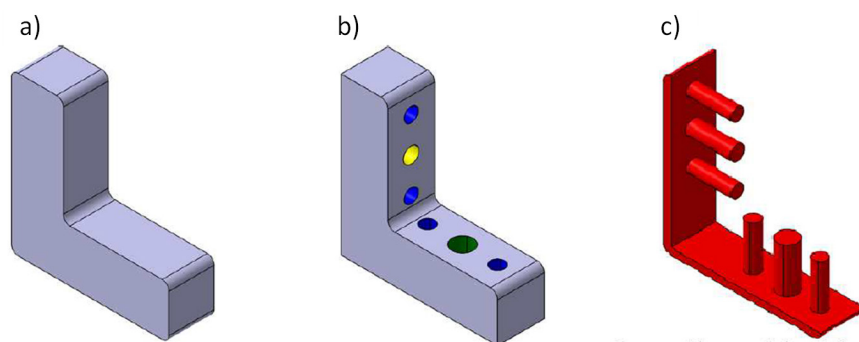
Źródło: oprac. własne na podstawie: (Aqeel, uz Zaman, Aziz i Baqai, 2024; Azab, Osman i Baki, 2024)

W każdym z wymienionych obszarów stosowane są różne podejścia i techniki umożliwiające realizację zadań przewidzianych na poszczególnych etapach. W podrozdziale 1.4 opisano metody wymiany danych pomiędzy systemami CAD i CAPP z wykorzystaniem uniwersalnych formatów wymiany danych.

1.4. Formaty wymiany danych pomiędzy systemami CAD i CAPP

Rozwijając algorytmy oraz formaty zapisu danych w systemach inżynierskich, próbowano ujednolicić opis geometrii oraz jej parametry, opracowując standardy wymiany danych pomiędzy różnymi systemami CAx. Efektem są takie formaty jak: DXF (ang. *Data Exchange Format*), Parasolid (silnik programistyczny, tzw. jądro w różnych systemach CAD), IGES (ang. *the Initial Graphics Exchange Specification*) czy STEP (ang. *Standard for the Exchange of Product model data*) (Miles, Giani, Vogt i Kafieh, 2024). Posługiwanie się danymi modelu 3D części z takich formatów wymaga dokładnej znajomości struktury plików oraz założenia, że pliki są zunifikowane. Założenie takie często okazuje się problematyczne, ponieważ z pozoru spójne formaty różnią się w zależności od tego, w którym systemie CAD zostały wygenerowane (Cho

i Gerhard, 2018). Prowadzonych było wiele badań nad wykorzystaniem standardu STEP w przetwarzaniu danych na potrzeby systemów CAPP. W pracy (Pisec, Sandu i Oancea, 2019) przedstawiono metodykę identyfikacji OE przeznaczoną do zastosowania w odniesieniu do elementów pryzmatycznych. Efekty kolejnych etapów przetwarzania danych geometrycznych, z uwzględnieniem sparametryzowanego geometrycznie półfabrykatu, prowadzą do wyodrębnienia obiektów obróbkowych (rys. 1.7). Mimo rozwijania format IGES przez wiele lat nie doczekał się sformalizowanego modelu zapisu, co utrudnia jego analizę i przetwarzanie. W efekcie zaprzestano jego rozwoju i skupiono się na formacie STEP. Z analizy struktury STEP wynika, że jednym z jej istotnych elementów są protokoły aplikacyjne (*ang. application protocols* – AP), stanowiące możliwą do implementacji specyfikację danych zawartych w normie ISO 10303. Są one głównym komponentem architektury STEP, zaprojektowanej przede wszystkim do wspierania i ułatwiania rozwoju protokołów aplikacyjnych (Kassim, Yusof i Awang, 2016). Protokoły aplikacyjne dotyczące danych modeli geometrycznych CAD 3D to AP203 (umożliwia przesyłanie danych geometrycznych modeli CAD 3D) i AP214 (przeznaczony dla przemysłu motoryzacyjnego). Protokół AP242 (*ang. managed model based 3D engineering*) zawiera dane modelu CAD 3D rozszerzone o dodatkowe parametry. Oprócz geometrii przechowywane są informacje dotyczące procesu produkcji i montażu, m.in. tolerancje montażowe, wykończenie powierzchni. Format STEP 242 jest standardem neutralnym, a więc nie jest on związany z konkretnym systemem CAD.

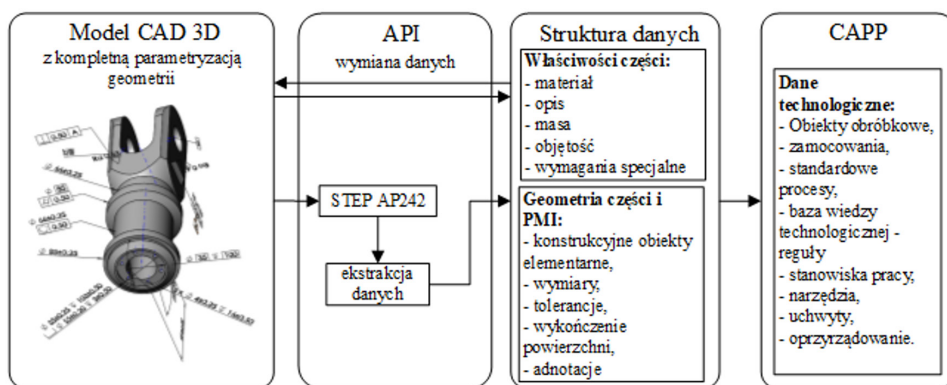


Rys. 1.7. Przetwarzanie danych geometrycznych z formatu STEP w CAPP:

a) półfabrykat, b) gotowy element po obróbce, c) wyodrębnione objętości usuwane podczas obróbki. Źródło: oprac. własne na podstawie

(Pisec, Sandu i Oancea, 2019)

W pracy (Krot i Czajka, 2019) opisano możliwości integracji systemów CAD z systemami CAPP za pomocą neutralnego formatu danych STEP AP242. Zaproponowano etapy w przetwarzaniu danych geometrycznych na podstawie informacji o produkcie i jego wywarzaniu PMI (*ang. product and manufacturing information*) (rys. 1.8). Wymiana danych realizowana była za pośrednictwem interfejsu programowania aplikacji (*ang. application programming interface* – API). Przedstawiona grafika ilustruje cztery podstawowe etapy w przetwarzaniu danych z systemu CAD 3D na potrzeby systemu CAPP z wykorzystaniem danych geometrycznych i parametrów powiązanych z tymi danymi: wymiarów, tolerancji, symboli wykończenia powierzchni.



Rys. 1.8. Etapy przetwarzania danych STEP z uwzględnieniem PMI.

Źródło: oprac. własne na podstawie: (Krot i Czajka, 2019)

W fazie rozwoju produktu konstruktor powinien konsultować swoje zamierzenia projektowe z działem technologicznym, który dokonuje analizy technologiczności konstrukcji i proponuje ewentualne zmiany w tym zakresie. Zmiany te mogą przełożyć się na koszty produkcji, czas realizacji zamówienia oraz decyzje o realizacji produkcji za pomocą dostępnych w przedsiębiorstwie środków produkcji lub w kooperacji z innymi podmiotami. Bez dostępu do danych konstrukcyjnych i wymogów, jakie powinien spełniać produkt, trudno podejmować tego typu decyzje i wybrać najbardziej ekonomiczny wariant procesu wytwarzania. Pozwala to na wykrycie problemów we wczesnych fazach rozwoju produktu i uniknięcie wprowadzania kosztownych zmian na etapie produkowania (Mahajan, Javanjal, Sudhakar, Roundal i Munde, 2022). Nowoczesne podejście do projektowania zakłada, że działy rozwoju produktu pracują bez etapu tworzenia dokumentacji wykonawczej CAD 2D. Jest

to możliwe dzięki nowym funkcjom współczesnych systemów CAD, które posiadają moduły MBD (ang. *model-based definition*). Moduły te pozwalają przechowywać bezpośrednio w modelu CAD 3D dane o projektowanej części i wymagania dotyczące wytwarzania, bez konieczności opracowywania i archiwizacji rysunków technicznych CAD 2D (Mohammed, Arbo i Tingelstadt, 2021; Aderiani, Wärmefjord i Söderberg, 2022).

Parametry związane z charakterystykami konstrukcyjnymi oraz technologicznymi można wprowadzać do modelu CAD 3D jako adnotacje PMI, co przynosi korzyści w postaci redukcji kosztów projektowania, a w efekcie skracca czas wprowadzenia produktu na rynek (Lipman i Lubell, 2015). W systemach CAD wykorzystywany jest mechanizm adnotacji, które są definiowane na określonych widokach wprost na modelu CAD 3D. Zastosowanie takiego podejścia do projektowania może doprowadzić do całkowitego wyeliminowania potrzeby tworzenia dokumentacji CAD 2D. Wykorzystanie możliwości adnotacji PMI pozwala na skrócenie czasu opracowania dokumentacji konstrukcyjnej i technologicznej z uwagi na możliwość pracy współbieżnej nad projektem (Hallmann, Goetz i Schleich, 2019). Zarówno konstruktor, jak i technolog mogą pracować na tych samych modelach CAD 3D. Technolog może ponadto nanosić swoje uwagi na modelu 3D w postaci komentarzy i w ten sposób precyzyjnie wskazać problematyczne miejsca. Innym czynnikiem jest interpretacja dokumentacji CAD 2D, która przy złożonych kształtach produktu może być bardzo kłopotliwa. Skutkiem jej nieprawidłowego przeprowadzenia może być dobór niewłaściwej technologii wytwarzania. Jeżeli taka dokumentacja zostanie przekazana do produkcji, może to przynieść duże straty (Li, Zhou i Zhang, 2022). Niewątpliwą korzyścią stosowania opisu modelu CAD 3D z adnotacją PMI jest dostępność całej dokumentacji konstrukcyjno-technologicznej w jednym pliku, co upraszcza zarządzanie dokumentami w przedsiębiorstwie. Systemy CAD oferują przeglądarki plików 3D z wieloma funkcjami przydatnymi przy przeglądaniu adnotacji dołączonych do modelu 3D. Modele CAD 3D wraz z adnotacjami mogą być zapisywane w formatach niewymagających posiadania ani licencji dla programu CAD, w którym powstał model, ani nawet specjalistycznej przeglądarki. Model CAD 3D wraz z adnotacjami PMI może być zapisany w postaci pliku PDF 3D i otwarty za pomocą popularnych, bezpłatnych przeglądarek dla tego formatu. Możliwość ta znacznie ułatwia współpracę między przedsiębiorstwami na etapie ustalenia wymagań konstrukcyjnych czy technologicznych odnośnie do zamawianych produktów. Popularne systemy CAD umożliwiają zapis danych geometrycz-

nych w postaci formatu neutralnego STEP AP242. Oprócz geometrii modelu możliwe jest także przechowywanie danych PMI związanych z procesem wytwarzania (Nzetchou, Durupt, Remy i Eynard, 2022).

Opracowując algorytmy ekstrahujące dane z pliku STEP AP242, można opracować środowisko wymiany danych pomiędzy systemami CAD i CAPP. W praktyce okazuje się to jednak trudne z uwagi na brak jednoznacznych powiązań pomiędzy parametrami opisującymi geometrię i adnotacjami PMI. Powoduje to wiele trudności w zakresie identyfikacji GKOE i przypisywania im parametrów odnoszących się do danych technologicznych.

Innym sposobem przetwarzania danych modelu części na potrzeby planowania procesów wytwarzania jest identyfikacja Technologicznych Obiektów Elementarnych (TOE) z wykorzystaniem wewnętrznych, natywnych formatów danych systemu CAD oraz wbudowanego interfejsu API.

W kolejnych podrozdziałach opisano format zapisu danych w systemach CAD w reprezentacji brzegowej oraz możliwości integracji systemów CAD i CAPP za pośrednictwem OE, identyfikowanych z danych pobieranych bezpośrednio z systemu CAD.

1.5. Reprezentacja brzegowa danych modelu CAD

Początkowym etapem w działaniu generacyjnych systemów CAPP jest odpowiednie przygotowanie danych konstrukcyjnych do dalszego przetwarzania w specyficie określonego środowiska systemu CAPP. Jednym z kluczowych zadań jest transformacja danych konstrukcyjnych wyrobu do postaci możliwej do wykorzystania w procesie planowania technologicznego. Analiza danych konstrukcyjnych w celu przetransformowania ich do postaci możliwej do zaakceptowania przez system CAPP jest procesem skomplikowanym, niezależnie od podejścia. Wymaga użycia złożonych algorytmów, które przysparzają konstruktorom dodatkowych zadań, niewpływających jednak na poprawę jakości danych konstrukcyjnych. Obecnie zauważyć można tendencję do upraszczania modeli geometrycznych i rozpoznawania tylko tych elementów, które są niezbędne w planowaniu procesu technologicznego (Zbiciak i Grabowik, 2017).

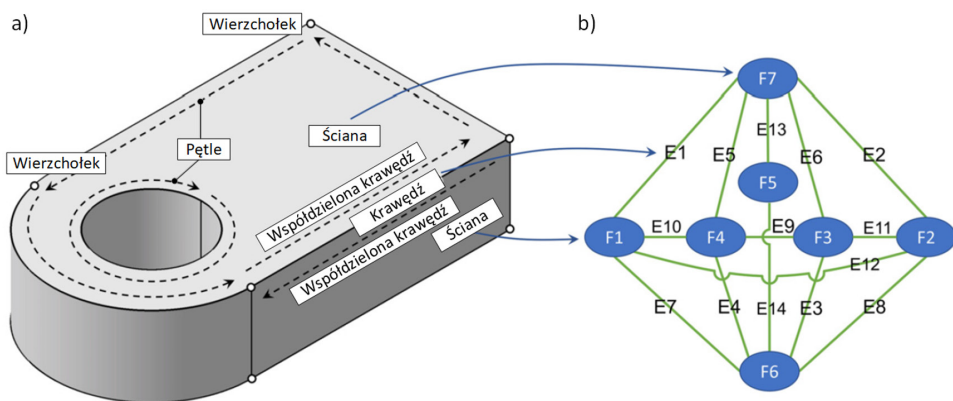
Analizując opracowane rozwiązania z zakresu wymiany danych pomiędzy systemami CAD i CAPP, można zauważyć dwa podstawowe podejścia (Aqeel i in., 2024):

- Przekształcanie danych z systemów CAD 3D, zapisanych w formatach natywnych lub neutralnych.
- Pobieranie i przekształcanie danych istotnych z punktu widzenia systemu CAPP bezpośrednio z systemu CAD 3D.

Bezpośrednie pobieranie danych i dalsze ich przetwarzanie w systemach CAPP może być realizowane za pomocą interfejsów programowania aplikacji API, wbudowanych w systemy CAD.

W systemie CAD 3D SolidWorks do zapisu danych modeli geometrycznych wykorzystywana jest reprezentacja brzegowa (*ang. boundary-representation – B-rep*) (Zhou i in., 2023; Ali, Khan i Stricker, 2024). Przykład modelu geometrycznego części zapisanego w reprezentacji brzegowej i grafu AAG (*ang. attributed adjacency graph*) opisującego zależności między sąsiadującymi ścianami rozgraniczonymi krawędziami przedstawiono na rys. 1.9. Wierzchołki grafu odpowiadają ścianom modelu, połączenia pomiędzy wierzchołkami – krawędziom rozgraniczającym ściany. Połączenia odwzorowują krawędzie i są im przypisane parametry identyfikujące krawędzie wypukłe bądź wklęsłe, co jest istotne z uwagi na możliwość wykorzystania grafów AAG w procesach identyfikacji OE (Zhang, Wang i Chen, 2023; Zhang i in., 2024).

W procesie projektowania w SolidWorks można uzupełniać model o charakterystyki technologiczne: tolerancje wymiarowe i geometryczne, chropowości powierzchni, oznaczenia baz pomiarowych, odchyłki położenia i kształtu. Co istotne, w zakresie struktury danych charakterystyki technologiczne

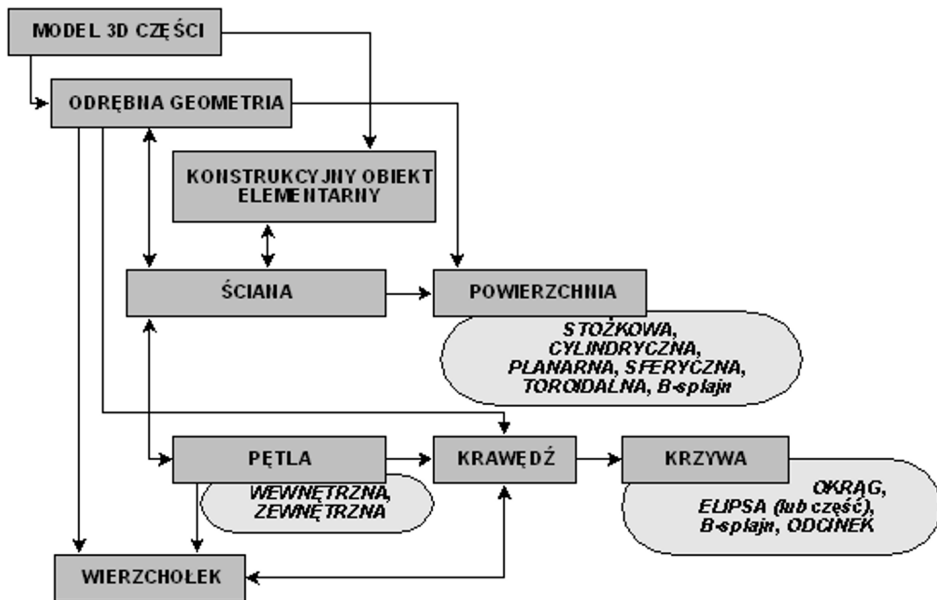


Rys. 1.9. Model bryłowy 3D w reprezentacji brzegowej (a) i odpowiadający mu graf sąsiadujących ścian rozgraniczonych krawędziami (b).

Źródło: oprac. własne na podstawie (Zhang i in., 2024)

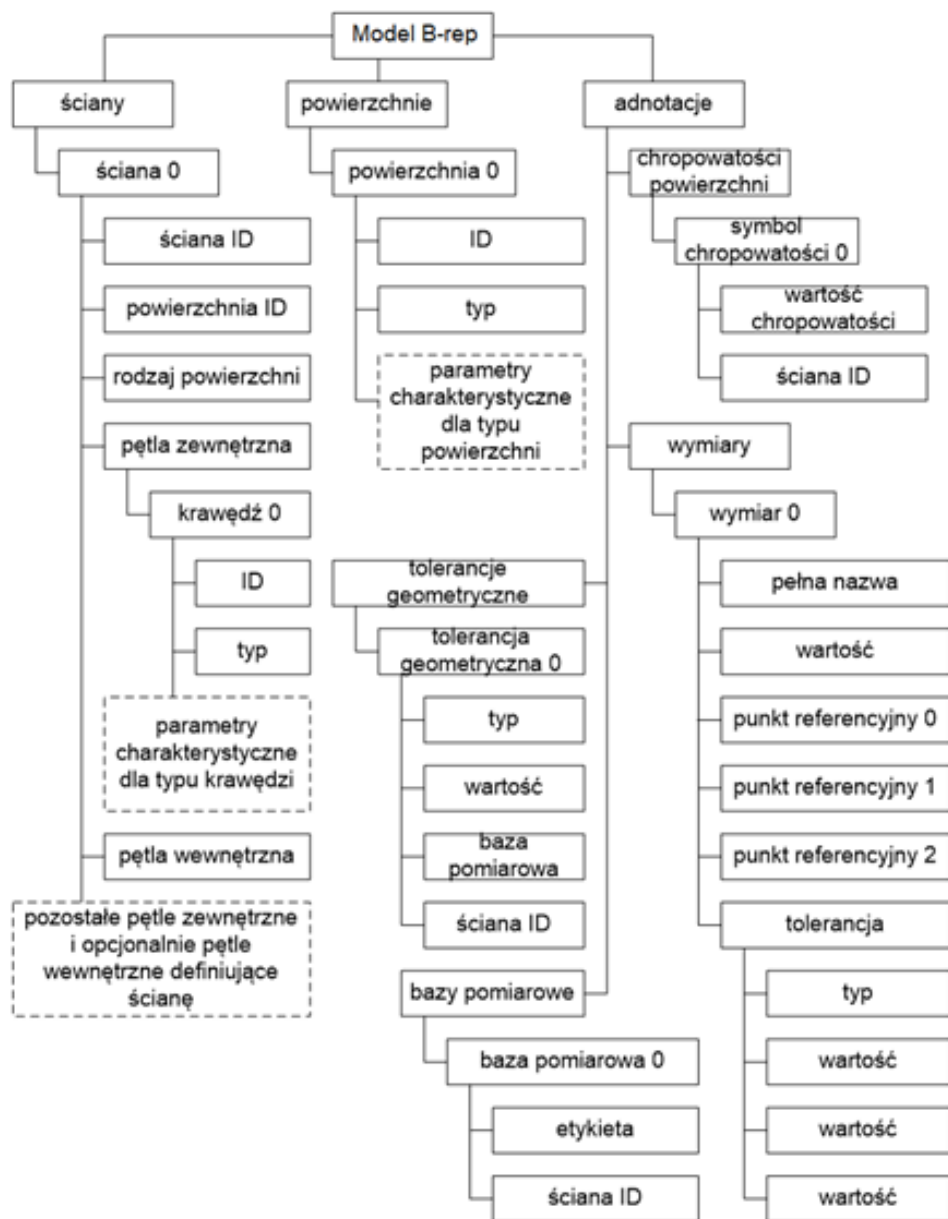
powiązane są z danymi geometrycznymi, co po odpowiednim przetworzeniu umożliwia potraktowanie danych z modeli CAD części jako danych wejściowych do systemu CAPP.

Model geometryczny w reprezentacji brzegowej zapisywany jest w postaci zbioru ścian. Ściana (ang. *face*) jest fragmentem powierzchni (ang. *surface*) ograniczonym pętlą (ang. *loop*). Opcjonalnie ściana może mieć dowolną liczbę pętli wewnętrznych, wyłączających fragmenty powierzchni ze ściany. W przypadku każdej ściany prawdziwy jest warunek, że jej dwa dowolne punkty można połączyć krzywą bądź łańcuchem krzywych leżących na tej ścianie w taki sposób, że każdy punkt krzywej będzie należał do ściany. Pętla jest z kolei zbiorem krzywych. Pętle dzielą się na wewnętrzne (ang. *inner loop*), które wyłączają pewien obszar wewnątrz ściany, i pętle zewnętrzne (ang. *outer loop*), które ograniczają ścianę z zewnątrz (Zou i Feng, 2022). Każda pętla składa się z krzywych (ang. *curve*), które w systemie SolidWorks mogą być odcinkami, łukami lub krzywymi. Krzywe parametryzowane są przez określenie ich typu i zbioru definiujących je wierzchołków (ang. *vertex*). Na rysunku 1.10 przedstawiono ogólną strukturę reprezentującą model CAD 3D w reprezentacji brzegowej w systemie SolidWorks.



Rys. 1.10. Struktura danych w modelu CAD 3D części w systemie SolidWorks.

Źródło: (Dassault_Systèmes, 2024)



Rys. 1.11. Hierarchiczna struktura bazy danych parametrów modelu CAD 3D.

Źródło: oprac. własne na podstawie: (Chlebus i in., 2011)

Termin *Konstrukcyjny Obiekt Elementarny* (KOE) (rys. 1.10) odnosi się do pojedynczej operacji modyfikacji geometrii części przez dodanie lub usunięcie pewnej bryły (objętości) (rys. 1.10). Konstrukcyjne Obiekty Elementarne

dodawane są do hierarchicznej struktury opisującej część, zapisanej w drzewie operacji. Pojedynczy obiekt opisywany jest za pomocą zarówno zestawu specyficznych, zależnych od rodzaju obiektu parametrów, jak i zbioru ścian, z których się składa. Operacja dodania objętości przez translację szkicu 2D w kierunku ortogonalnym do płaszczyzny szkicu tworzy obiekt opisany za pomocą szkicu i parametru określającego długość i kierunek lub kierunki dodania objętości. Każda operacja modyfikująca geometrię części wprowadza pewne zmiany w strukturze reprezentacji brzegowej. Modyfikacjom ulegają pętle i ściany, mogą być usuwane te powstałe wcześniej lub dodawane nowe. Powiązania i zależności w strukturze danych w reprezentacji brzegowej w systemie SolidWorks, które są udostępnione przez API, umożliwiają transformację danych modelu do własnych struktur (Chlebus, Krot i Kuliberda, 2011). Przykład takiej struktury przedstawia rys. 1.11.

Powyższe struktury danych pozwalają na selektywne odwoływanie się do danych modelu CAD z możliwością uzupełnienia danych geometrycznych o odpowiednie parametry wymiarowe, dokładnościowe lub powiązania topologiczne. W dalszej części rozdziału opisano wykorzystanie danych modelu CAD zapisanych w reprezentacji brzegowej do identyfikacji OE na potrzeby planowania procesów w systemach CAPP.

1.6. Hipotezy badawcze w planowaniu procesów

Z analizy stanu wiedzy w zakresie metod i technik wykorzystywanych w generacyjnym planowaniu procesów wynika, że nadal istnieje luka w obszarze definiowania wymagań funkcjonalnych produktów oraz efektywnego przetwarzania danych CAD na potrzeby planowania wytwarzania.

Mając na względzie wyżej przedstawione zagadnienia, postawiono następujące hipotezy badawcze:

Hipoteza pierwsza

Wprowadzenie systematyki OE uwzględniającej FOE umożliwi ukierunkowane oddziaływanie na proces konstituowania konstrukcyjnych i technologicznych OE. Proces ten pozwoli na uwzględnienie parametrów i wytycznych charakteryzujących produkt opisanych w FOE ze szczególnym uwzględnieniem aspektów wpływających na procesy recyklingu i ponownego użycia produktów.

Hipoteza druga

Opracowanie metody identyfikacji TOE bazującej na modyfikowalnych regułach pozwoli na transformację danych modelu CAD 3D na zestaw TOE dostosowany do wymagań użytkownika, z możliwością przypisywania im procesów obróbkowych.

W podrozdziale 1.7 zaproponowano szczegółową definicję OE stosowanych w procesach rozwoju produktu, uwzględniającą elementarne obiekty funkcjonalne, konstrukcyjne, technologiczne i obróbkowe. Podrozdział 1.8 zawiera opis wyników prac badawczych dotyczących deklaratywnego, możliwego do modyfikowania przez użytkownika zapisu wiedzy w postaci reguł decyzyjnych do identyfikacji OE w danych CAD na potrzeby planowania procesów oraz reguł przyporządkowania zidentyfikowanym obiektom operacji obróbkowych.

1.7. Integracja systemów CAD i CAPP z zastosowaniem obiektów elementarnych

Jedną z metod przetwarzania danych konstrukcyjnych do postaci przydatnej w opracowywaniu procesów technologicznych jest integracja za pomocą OE. Obiekty te można podzielić na dwie podstawowe klasy (Wang, 2013; Wang, Lu, li i li, 2015):

- Konstrukcyjne Obiekty Elementarne – obejmują wszystkie charakterystyczne elementy projektowanych podzespołów bądź złożeń, istotne w zapisie konstrukcji.
- Technologiczne Obiekty Elementarne – zawierają dane istotne z punktu widzenia planowania technologicznego oraz wytwarzania komponentów.

W literaturze przedmiotu przedstawiane są fragmentaryczne rozwiązania uwzględniające zastosowanie OE w obszarach:

- projektowania koncepcyjnego (Mun, Han, Junhwan i Oh, 2003; Erden i Komoto, 2008);
- rozwoju produkcji z wykorzystaniem narzędzi CAE (Xue, Marchi, Parashar i Li, 2015);
- planowania procesów wytwarzania (Li, Liu, Gao i Maropolus, 2012; Liu i To, 2017);

- projektowania procesów montażu (Khabbazi, Wikander, Onori i Maffei, 2018).

Precyzyjny podział i klasyfikacja OE nie są jednoznacznie określone i formalnie ustandaryzowane (Li, Zheng, Yang, Leng, Cheng, Xie, Jiang i Ma, 2020). Skutkiem tego jest wiele trudności przy opracowywaniu uniwersalnych narzędzi w systemach CAPP, pozwalających na wprowadzanie danych konstrukcyjnych i technologicznych, w celu ich wykorzystania w planowaniu procesów wytwarzania.

W publikacji (Chlebus i Krot, 2016) opisano wyniki prac dotyczących systematyki obiektów elementarnych, jak również identyfikacji TOE na podstawie danych CAD 3D. Istotnym efektem prac jest uporządkowanie terminologii z zakresu OE, stosowanej w projektowaniu i wytwarzaniu przez wprowadzenie czterech głównych kategorii obiektów, tj. obiektów funkcjonalnych (FOE), konstrukcyjnych (KOE), technologicznych (TOE) i obróbkowych (OOE). Ponadto zaproponowano strukturę bazy danych parametrów konstrukcyjno-technologicznych, pozwalającą na swobodne odwoływanie się do wybranych wartości charakteryzujących zapis konstrukcji i technologii projektowanego wyrobu.

W ramach kontynuacji prac nad zagadnieniami z zakresu przetwarzania danych produktu w procesie jego rozwoju rozbudowano i uporządkowano zaproponowaną wcześniej systematykę, wprowadzając nowe podgrupy (rys. 1.12).

W grupie FOE zaproponowano dwie podgrupy, rozdzielając wymagania funkcjonalne możliwe do sprecyzowania za pomocą wartości mierzalnych od wymagań niemierzalnych, często opisywanych za pomocą słów (np. estetyka, modułowość) lub nieprecyzyjnych określeń (np. ułatwiony recykling).

Mierzalne Funkcjonalne Obiekty Elementarne (MFOE), wyrażalne za pomocą wartości liczbowych, definiowane są przez wymagania w zakresie parametrów jak:

- wartości własności mechanicznych (np. wytrzymałość na zginanie, rozciąganie, ciśnienie);
- odporność na czynniki zewnętrzne: temperaturę pracy, czynniki chemiczne, promieniowanie słoneczne, stopień ochrony przed wnikaniem czynników zewnętrznych (ang. *ingress protection*);
- trwałość produktu w jednostkach czasu (przewidywany czas użytkowania);
- ograniczenia wymiarowe;
- masa maksymalna/minimalna.

Podobnie zaproponowano charakterystykę Niemierzalnych Funkcjonalnych Obiektów Elementarnych (NFOE) z wykorzystaniem pojęć charakteryzujących te obiekty, lecz trudnych do określania mierzalnymi wartościami liczbowymi. Znalazły się wśród nich np.:

- modułowość konstrukcji;
- kolorystyka (stonowana, pastelowa, jaskrawa, krzykliwa);
- oddziaływanie na środowisko naturalne podczas produkcji czy użytkowania;
- podatność na recykling, ponowne użytkowanie.

Do formalnego zapisu FOE proponowany jest zapis tabelaryczny z uwzględnieniem wag parametrów FOE (tabela 1.1). Podobnie jak w metodach wspomagania procesów decyzyjnych (Szybka i Pabian, 2021; Pilch, 2022; Więckowski i Sałabun, 2025), do przypisania FOE stopnia ważności proponuje się przyjęcie współczynników wagi w_j .

Wprowadzenie współczynników wagi umożliwia po ustaleniu ich wartości świadome oddziaływanie na kolejne etapy w procesie rozwoju produktu, tj. konstytuowanie KOE, a następnie TOE i OOE.

Wymagania funkcjonalne dotyczyć mogą czynników zewnętrznych wpływających na wyrób, a związanych z dyrektywami, trendami społeczno-gospodarczymi czy przyjętą polityką firmy. Funkcjonalne Obiekty Elementarne są właściwym narzędziem do definiowania założonego ogólnie stopnia oddziaływania na środowisko naturalne. Oddziaływanie to może być realizowane za pośrednictwem zrównoważonego projektowania i wytwarzania czy w formie zrównoważonego produktu (ang. *sustainable design, manufacturing, sustaina-*

Tabela 1.1. Przykładowy wykaz FOE produktu
wraz z przypisanymi im współczynnikami wagi

FOE _i , gdzie $i = 1, \dots, n$	Nazwa	Wartość	Współczynniki wagi FOE w_j
FOE ₁	stopień ochrony IP	67	0,25
FOE ₂	masa maksymalna	5 kg	0,25
FOE ₃	kolorystyka zewnętrzna	pastelowa	0,10
...	...	...	...
FOE _n	...	...	w_n
			$\Sigma w_n = 1$

ble product development) (Rai, Mehrotra, Priya, Gnansounou i Sharma, 2021; Ghimouz i in., 2023; Mengistu, Dieste, Panizzolo i Biazzo, 2024).

Wpływ produktów na środowisko naturalne może być definiowany na podstawie środowiskowej oceny cyklu życia produktu (ang. *life cycle assessment* – LCE) (He, Zhang i Lu, 2025), przeprowadzanej na podstawie wytycznych zawartych w normie ISO 14040–14044. Z założenia oddziaływanie produktów, procesów lub usług na środowisko powinno być szacowane na każdym etapie: od pozyskania surowców, przez produkcję i użytkowanie aż po utylizację. W wielu przypadkach jest jednak ograniczone do określonego systemu produkcyjnego i obejmuje wewnętrzne procesy produkcyjne i transportowe, do etapu przekazania produktu do użytkowania klientom.

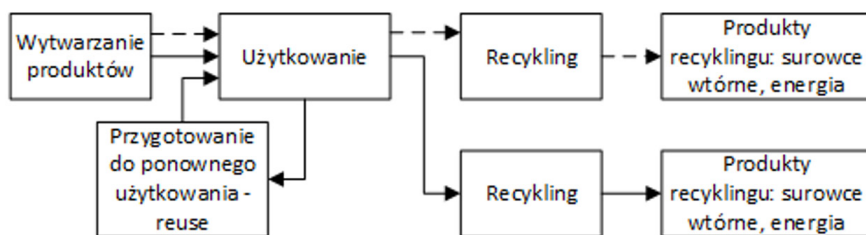
W pracy (Pedersen i Arne, 2022) opisano stan wiedzy na temat metod i narzędzi informatycznych do określania śladu środowiskowego produktu (ang. *product environmental footprint* – PEF), czyli stopnia wpływu produktu wraz z technologią jego produkcji, dystrybucji i użytkowania na środowisko naturalne. Brane są pod uwagę różne czynniki środowiskowe. Popularnym wskaźnikiem jest ślad węglowy (ang. *product carbon footprint* – PCF), który określa wielkość całkowitej emisji gazów cieplarnianych podczas pełnego cyklu życia produktu, wyrażony w ekwiwalencie CO₂ (Wiedemann i Minx, 2008; Jaeger, 2022; Faiz, Kaneda, Wang, Osi, Sharma, Chen i Jiang, 2023; Moradaschew i Tackenberg, 2024). Oprócz śladu węglowego przyjmowanych jest znacznie więcej wskaźników oddziaływania na środowisko naturalne. W pracy (He i in., 2025) wymieniane są takie, które mogą być dotyczyć nie tylko produktów, ale również usług:

- ślad wodny (ang. *water footprint* – WF);
- ślad energetyczny (ang. *energy footprint* – EF);
- ślad węglowy (ang. *carbon footprint* – CF);
- ślad fosforowy (ang. *phosphorus footprint* – PF);
- ślad azotowy (ang. *nitrogen footprint* – NF);
- ślad gruntowy (ang. *land footprint* – LF);
- ślad bioróżnorodności (ang. *biodiversity footprint* – BF);
- ślad materiałowy (ang. *material footprint* – MF).

Wymienione wskaźniki mogą być używane jako jedne z FOE charakteryzujących wartości docelowe, którym należy podporządkować wszystkie kolejne procesy w ramach rozwoju produktu, związane z doбором materiałów konstrukcyjnych, półfabrykatów, postaci geometrycznej oraz technologii wytwarzania. Postępowanie takie umożliwi wytwarzanie produktów o określonych

parametrach oddziaływania na środowisko, a nie tylko wtórną ocenę tego oddziaływania w produktach już eksploatowanych.

W ramach prac badawczych dotyczących systematyki FOE proponuje się uwzględnienie możliwości określania założeń dotyczących ponownego użytkowania całego produktu lub jego wybranych komponentów. Przyjęte na etapie definiowania FOE założone wartości śladów PEF należy uzupełnić o wartość wskaźnika określającego możliwość ponownego użycia. W pracy (Bubinek, Knaack i Cimpan, 2025) przedstawiona jest koncepcja modyfikacji cyklu życia produktu przez dodanie pętli z podsystemem przygotowania produktu lub jego elementów do ponownego użycia (rys. 1.13). Zaproponowana modyfikacja przebiega zgodnie z modelem oznaczonym linią ciągłą, klasyczny model oznaczono linią przerywaną. Pętla przygotowania do ponownego użytkowania nie określa, ile razy produkt lub jego elementy mogą być ponownie użyte. Będzie to zależało od indywidualnych właściwości produktów i materiałów, z których są wytworzone, i będzie powtarzane aż do całkowitej utraty możliwości przetworzenia w celu ponownego użytkowania i finalnie przekazania do recyklingu. W celu sparametryzowania FOE o nazwie *reuse*, określającego podatność produktu na przetworzenie i ponowne użytkowanie można posłużyć się wartością procentową, opisującą część produktu nadającą się do ponownego wprowadzenia do użytkowania.

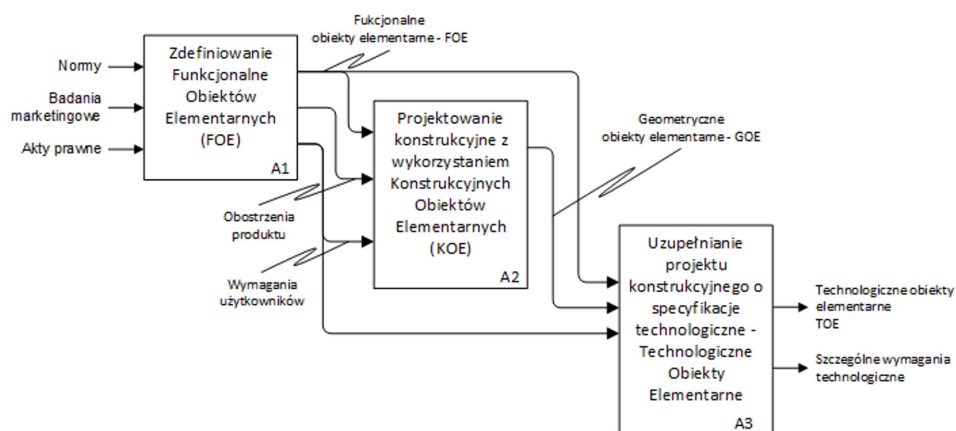


Rys. 1.13. Modyfikacja cyklu życia produktu poprzez dodanie modułu *reuse*;

linia przerywana – klasyczny model cyklu życia produktu, linia ciągła – model cyklu życia produktu z pętlą przygotowania do ponownego użytkowania produktów. Źródło: oprac. własne na podstawie: (Bubinek i in., 2025)

Mierzalny FOE *reuse* o wartości 40% oznacza w tak przyjętej notacji, że 40% podsystemów technicznych i materiałów wchodzących w skład produktu zostanie tak skonstruowanych i wytworzonych, że możliwe będzie ich przygotowanie do ponownego użytkowania i ponownie użytkowane.

Projektowanie konstrukcyjne nowego wyrobu realizowane jest na podstawie wytycznych przekazanych konstruktorowi w określonej formie. W standardach obiegu dokumentów wymagania te mogą być ujęte w zestawie FOE. Geometria projektowanej części we współczesnych systemach CAD 3D jest przygotowywana z wykorzystaniem dostępnych obiektów konstrukcyjnych, wraz z parametrami określającymi te obiekty. Modelowanie geometrii części i uzupełnianie jej o Konstrukcyjne Obiekty Elementarne można potraktować jako proces (rys. 1.14).



Rys. 1.14. Proces przekształcania FOE w konstrukcyjne i technologiczne.

Źródło: oprac. własne na podstawie: (Chlebus, Krot i Kuliberda, 2005)

Obiekty Funkcyjne w technicznym przygotowaniu produkcji często są marginalizowane, a za początkowe stadium całego procesu uważa się opracowanie konstrukcyjne wyrobu. Takie uproszczenie prowadzi do pomijania kluczowych aspektów ujętych w FOE, wpływających na kolejne etapy rozwoju produktu oraz jego cykl życia. Omawiane zagadnienia są istotne w różnych sektorach gospodarki i można zauważyć pierwsze efekty zmian opracowań wprowadzanych w produktach i strategiach działalności gospodarczej przedsiębiorstw. Udostępniane są moduły w systemach CAD/CAM umożliwiające zapis istotnych danych wpływających na środowisko naturalne i umożliwiających zrównoważony rozwój. W systemie SolidWorks dostępny jest moduł *Sustainability*, który pozwala na szacunkową ocenę oddziaływania na środowisko jako integralnej części procesu projektowania produktu. Zaproponowana systematyka obiektów elementarnych dostarcza możliwości opracowania

formalnej definicji i zapisu Funkcjonalnych Obiektów Elementarnych, a przez to oddziaływania na kolejne etapy rozwoju produktu, tj. na:

- KOE w procesie projektowana;
- TOE i OOE w procesie planowania technologii wytwarzania.

Wymogi dotyczące podatności produktu na recykling lub możliwości jego ponownego użytkowania można opisać z wykorzystaniem zaproponowanych FOE. Determinują one pewne ograniczenia w procesie projektowania konstrukcji, doborze materiałów konstrukcyjnych, jak również w metodach i technikach stosowanych na ostatnich etapach cyklu życia produktu: wycofania z użytkowania, dostosowania do ponownego użytkowania oraz recyklingu. W monografii opisano to na przykładzie udoskonalania procesów recyklingu i ponownego użycia fragmentów kompozytowych obudów sprzętu chłodniczego (por. rozdz. 2).

Planowanie procesów wytwarzania może dotyczyć również transportu komponentów, podczas którego realizowany jest proces technologiczny. Dotyczy to procesów produkcji o charakterze ciągłym: nagrzewania, chłodzenia, płukania czy wytrawiania chemicznego. Wymagania funkcjonalne narzucające określone metody transportu, zdefiniowane w FOE mogą determinować określone techniki transportu technologicznego, co w pracy przedstawiono na przykładzie rozwiązań transportu fluidalnego (por. rozdz. 3).

Opracowaną systematykę OE można zastosować nie tylko w definiowaniu wymagań funkcjonalnych produktu i oddziaływaniu na kolejne etapy cyklu życia. W podrozdziale 1.8 opisano wspomaganie planowania procesów wytwarzania poprzez identyfikację TOE z danych CAD 3D. Zbudowano strukturę reguł decyzyjnych, które mogą być dostosowane do wymagań użytkownika i wykorzystane w identyfikacji TOE w planowaniu procesów wytwarzania.

1.8. Identyfikacja TOE

Definicja i systematyka OE są równie istotne, jak metody ekstrakcji lub identyfikacji obiektów z danych konstrukcyjnych czy wymagania funkcjonalne. Wśród metod identyfikacji TOE (Shi, Yicha, Xia i Harik, 2020) znajdują się takie, które:

- Bazują na regułach implementowanych w systemach ekspertowych.
- Wykorzystują wskazówki w dwuetapowej procedurze rozpoznawania obiektów: w pierwszym kroku wskazówki są generowane przez reguły eks-

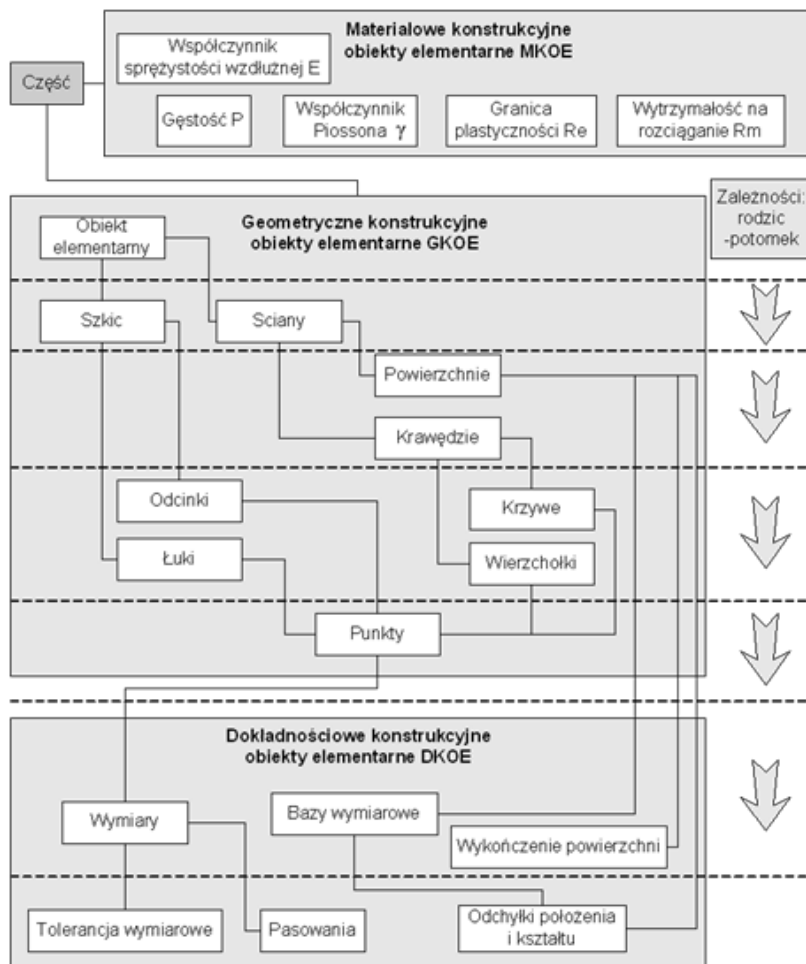
trakcji oparte na różnych atrybutach, takich jak zależności geometryczne i topologiczne, taksonomia obiektów i łączone prawdopodobieństwa uporządkowania potencjalnych wskazówek TOE, w drugim kroku wskazówki są przetwarzane i mogą być dopasowane do wzorców obiektów.

- Bazują na wykresach (ang. *attributed adjacency graph*) i opisują zależności między ścianami rozgraniczonymi krawędziami w modelu geometrycznym CAD w reprezentacji brzegowej. Fragmenty wykresów charakterystyczne dla określonych TOE definiowane są jako wzorce tych obiektów.
- Dekomponują objętości, co oznacza, że przetwarzana jest geometria od zdefiniowanej objętości półfabrykatu, przez usuwanie kolejnych objętości pośrednich materiału aż do otrzymania docelowej postaci geometrycznej rozpatrywanej części. Objętości pośrednie identyfikowane są jako TOE.
- Wykorzystują sztuczne sieci neuronowe, a więc pozwalają identyfikować TOE z wykorzystaniem niejawnych wzorców, zdefiniowanych w strukturze sieci neuronowych po etapie opracowania struktury i treningu sieci, umożliwiając identyfikację obiektów z pewnym przybliżeniem.
- Mają charakter hybrydowy.

Wymienione metody identyfikacji obiektów są wprawdzie najczęściej stosowane i najbardziej obiecujące w przyszłych aplikacjach, mają jednak pewne ograniczenia i selektywną zdolność do identyfikacji określonych klas obiektów. Z uwagi na to proponowane są właśnie rozwiązania hybrydowe, wykorzystujące wybrane cechy powyższych metod w celu uniknięcia niedociągnięć metod pojedynczych.

W monografii opisano praktyczne zastosowanie metody opartej na regułach przy opracowywaniu elementów systemu ekspertowego do identyfikacji TOE za pomocą danych modelu CAD 3D, zapisanych w reprezentacji brzegowej. Dane, zapisane w zdefiniowanej strukturze, udostępniane poprzez interfejsy API mogą być wykorzystane w różnych obszarach rozwoju produktu. W pracy (Krot i Kuliberda, 2008) zaproponowano ogólny model identyfikacji OE na podstawie danych pobieranych z systemu CAD 3D za pośrednictwem API. Zależności pomiędzy geometrycznymi, dokładnościowymi, materiałowymi i konstrukcyjnymi OE w strukturze danych API systemu SolidWorks są powiązane hierarchicznie na zasadzie rodzic–potomek (rys. 1.15).

W strukturze na rysunku 1.15 ujęto geometryczne dane modelu części oraz powiązane z nimi dane definiujące wymiary i parametry wykończenia powierzchni. Bez powiązań w strukturze są dane materiałowe, określające wła-

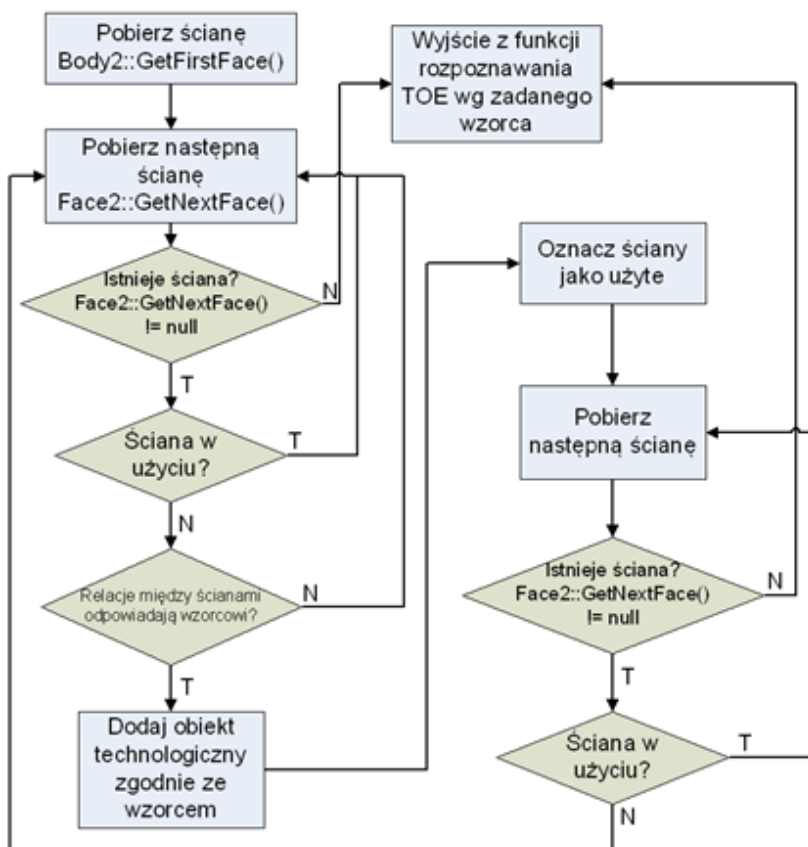


Rys. 1.15. Struktura danych API parametrów części w systemie SolidWorks.

Źródło: (Krot i Chlebus, 2007)

sności fizyczne materiału, z którego projektowana jest część. Wzorce obiektów elementarnych wymagają zdefiniowania zależności między parametrami geometrycznymi pobranymi za pomocą API (Chlebus, Krot i Kuliberda, 2011a). Ogólny algorytm identyfikacji TOE na podstawie danych modelu w reprezentacji brzegowej, zaimportowanych z wykorzystaniem API z systemu SolidWorks podano na rys. 1.16.

Rozwijając algorytm, opracowano prototypowe oprogramowanie, które umożliwia ekspercki wgląd i parametryzację warunków definiujących określone wzorce (Chlebus, Krot i Kuliberda, 2011a). Zaprojektowany system eks-

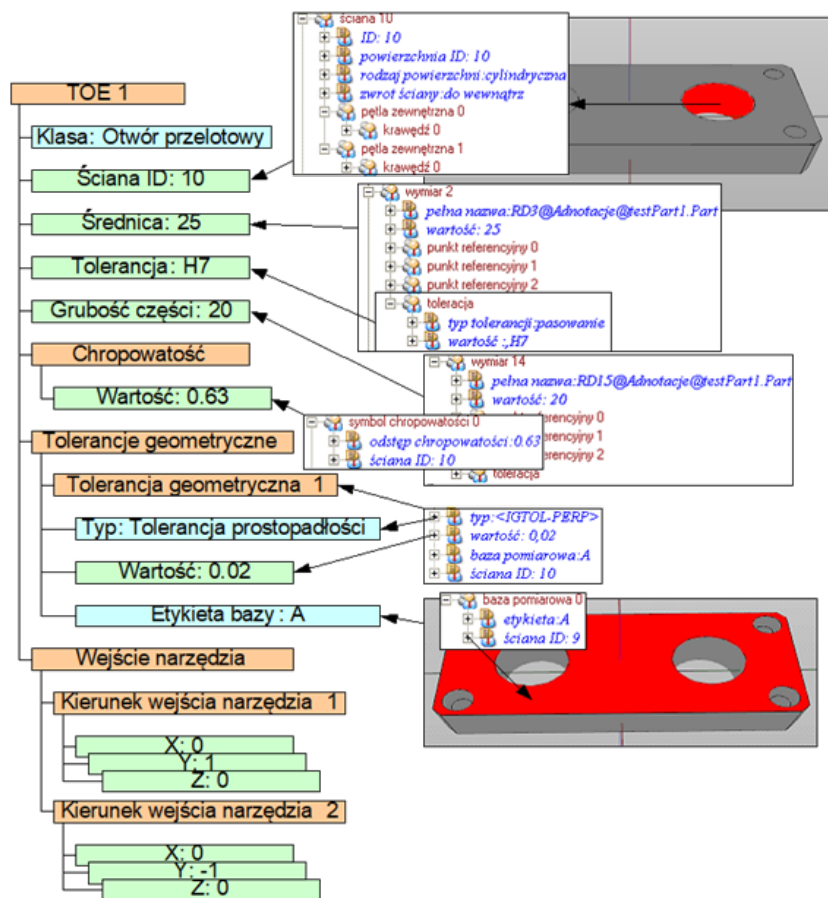


Rys. 1.16. Ogólny algorytm identyfikacji TOE z danych modelu CAD pobieranych za pośrednictwem interfejsu API (Krot i Kuliberda, 2008)

pertowy umożliwia modelowanie struktur hierarchicznych oraz zawiera dodatkowe klasy reguł decyzyjnych pozwalających na:

- identyfikacji TOE;
- przyporządkowywaniu operacji obróbkowych poszczególnym TOE;
- parametryzowaniu operacji obróbkowych;
- grupowaniu TOE w zamocowania;
- sortowaniu TOE.

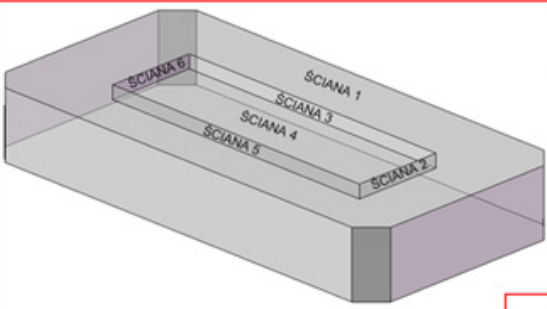
Hierarchiczna struktura bazy wiedzy (rys. 1.17) umożliwia modelowanie relacji typu rodzic–potomek. W konsekwencji obiekt nie jest identyfikowany wyłącznie na podstawie nazwy, ale również położenia w strukturze bazy wiedzy. Dzięki temu możliwe stało się dublowanie nazw w obrębie różnych podstruktur i stosowanie nazewnictwa adekwatnego do określanych cech.



Rys. 1.17. Fragment struktury hierarchicznej bazy wiedzy technologicznej (Chlebus, Krot i Kuliberda, 2010)

W oknie prototypowego oprogramowania użytkownik może swobodnie modyfikować zależności geometryczne prowadzące do identyfikacji TOE i jego klasyfikacji do określonego typu.

Przypisywanie wariantów procesu technologicznego do TOE wcześniej zidentyfikowanych przebiega podobnie jak sama identyfikacja TOE. Zwykle do jednego obiektu mogą być przypisane różne warianty realizacji tego procesu, dlatego identyfikację operacji obróbkowych w odniesieniu do hierarchicznej bazy wiedzy można określić jako proces dodawania fragmentu struktury z jednym obiektem nadrzędnym. Struktura modyfikowana jest w określonej lokalizacji na podstawie wartości atrybutów istniejącego już obiektu. Danymi wejściowymi, na podstawie których określone są operacje obróbkowe, są



Model części z rozpoznawanym obiektem (ściana 1 - ściana zagnieżdżająca nie należącą do obiektu, ściana 4 - ściana podstawy)

Edycja reguły identyfikującej technologiczny obiekt elementarny

nazwa obiektu: liczba ścian:

Edycja właściwości ścian

typ powierzchni: ☒ ściana należy do obiektu ☐ może posiadać pętle wewnętrzne

id	powierzchnia	należy do obiektu	pętle wewnętrzne
1	planarna	nie	dozwolone
2	planarna	tak	niedozwolone
3	planarna	tak	niedozwolone
4	planarna	tak	dozwolone
5	planarna	tak	niedozwolone
6	planarna	tak	niedozwolone

☐ osobny obiekt dla obróbki wykorzystującej

Edycja warunków

ściana: relacja: ściana:

ściana	relacja	ściana
ściana5	prostopadła_wklęsła	ściana6
ściana5	prostopadła_wklęsła	ściana3
ściana2	wspólna_krawędź	ściana4

Edycja funkcji ścian

☒ standardowa funkcja

standardowa funkcja ściany:

niestandardowa funkcja: nazwa funkcji:

Edycja atrybutów obiektu technologicznego

nazwa:

☐ wartość liczbową ☐ wartość tekstową

☐ cecha ściany:

☒ relacja między ścianami:

nazwa TOE
liczba ścian wymaganych do zdefiniowania TOE
parametry dodanych ścian
parametry dodawanej ściany
utworzenie drugiego obiektu z tej samej grupy ścian
relacje między ścianami
cechy poszczególnych ścian
funkcje ścian w TOE

Rys. 1.18. Formularz definiowania parametrów i warunków identyfikowania TOE (Chlebus, Krot i Kuliberda, 2011a)

parametry TOE. Zapis w pseudokodzie przykładowej reguły modyfikującej strukturę może wyglądać następująco:

Jeśli istnieje

*Obiekt **otwór przelotowy*** będący potomkiem obiektu **TOE***

o atrybutach spełniających następujące zależności:

średnica ≥ 1.5

głębokość / długość ≤ 10

klasa dokładności == 11

to

*dodaj do obiektu **otwór przelotowy****

*obiekt **Wariant procesu**, zawierający:*

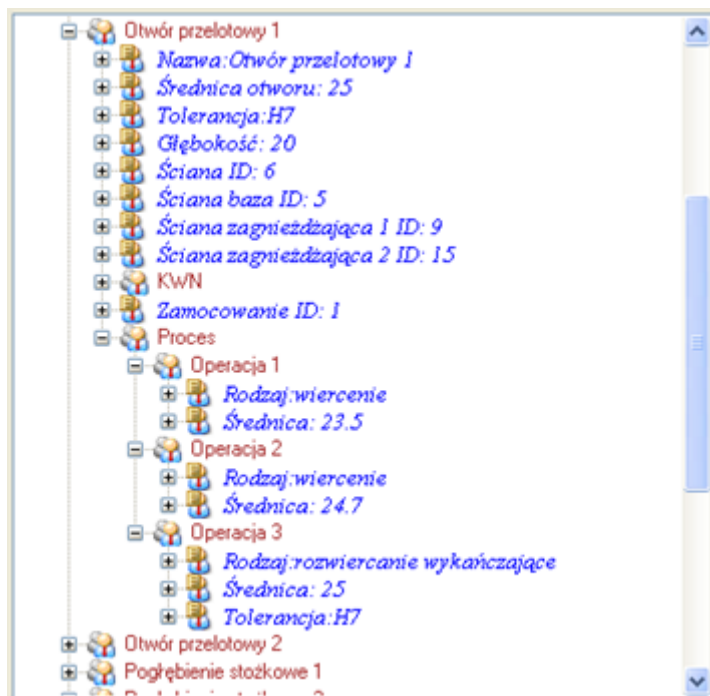
*obiekt **Operacja 1** z atrybutami **Rodzaj == wiercenie i Średnica = 1.4***

Efektem wykonania powyższej reguły jest dodanie fragmentu struktury hierarchicznej zawierającej parametry procesu w określonym miejscu bazy wiedzy (rys. 1.19).

Definiowanie warunków reguł oraz zależności między obiektami geometrycznymi wymaga specjalistycznej wiedzy na temat struktur danych w systemach CAD, jak również zapoznania się z systematyką OE na etapie technicznego przygotowania produkcji. Testy użyteczności oprogramowania przeprowadzone na osobach o wiedzy ogólnotechnicznej dowiodły, że jest ono za mało intuicyjne i zbyt skomplikowane w obsłudze. Mając na względzie komercjalizację oprogramowania, wymagane jest uproszczenie interfejsu użytkownika lub wprowadzenie predefiniowanych wzorców identyfikacji, a pozostawienie użytkownikowi jedynie możliwości modyfikowania reguł według własnych potrzeb.

Opisana funkcjonalność pozwala na swobodę interpretacji danych modelu CAD i dostosowanie ich do uwarunkowań konkretnego systemu produkcyjnego, a dotychczas nie było precyzyjnej, ustandaryzowanej klasyfikacji OE.

Z konstrukcyjnego punktu widzenia najwygodniejszy jest brak jakichkolwiek ograniczeń w zakresie sporządzania dokumentacji konstrukcyjnej. Dotyczy to ograniczeń wynikających z wymagań systemu CAPP, poza oczywistymi zasadami zapisu konstrukcji: jednoznaczności w zakresie specyfikacji geometrii, przedstawienia rzutów i modeli 3D, wymiarowania i wprowadzania charakterystyk technologicznych określających odchyłki wymiarowe, chropowatości powierzchni, odchyłków położenia i kształtu, baz pomiarowych. Z uwagi na powyższe aspekty systemy CAPP powinny bazować na danych z natywnych formatów plików, uniwersalnych formatach wymiany danych lub odwoływać się bezpośrednio do systemu CAD (Krot i Chlebus, 2007).



Rys. 1.19. Struktura bazy wiedzy opisująca proces obróbkowy
(Chlebus, Krot i Kuliberda, 2011a)

Opis mechanizmu identyfikacji TOE i opis przypisywania wariantów procesu technologicznego do zidentyfikowanych wcześniej TOE są podobne. Za pomocą różnych technik obróbkowych, prowadzących do otrzymania tej samej geometrii i wymaganych parametrów dokładnościowych możliwe jest otrzymanie jednego TOE (Kuliberda i Krot, 2010). Można więc przyporządkować mu kilka wariantów zabiegu obróbkowego (rys. 1.20). Powiązanie TOE z identyfikacją operacji obróbkowych w odniesieniu do hierarchicznej bazy wiedzy można określić jako proces dodawania fragmentu struktury z jednym obiektem nadrzędnym do określonej lokalizacji na podstawie wartości atrybutów określonego, istniejącego już obiektu. Danymi wejściowymi, na podstawie których określone są operacje obróbkowe, są parametry TOE.

Zaproponowano zastosowanie metody bazującej na regułach w procesie opracowywania elementów systemu ekspertowego do identyfikacji TOE, jak również do przypisywania im operacji obróbkowych przez rozszerzanie struktur baz wiedzy z wykazem zidentyfikowanych TOE.

Edycja reguły przeszukującej dodającej obiekt do bazy wiedzy

nazwa reguły: Obróbka otworów (1.5 ≤ d ≤ 3)

przestrzeń poszukiwań (obiekt nadrzędny): TOE

maska nazwy poszukiwanego obiektu: otwór przelotowy

Lokalizacja dodawanego obiektu:

- ☒ potomek obiektu spełniającego listę warunków
- ☐ potomek wskazanego obiektu

Edycja warunków

nazwa atrybutu	relacja	wartość
"średnica"	≥	1.5
"średnica"	≤	3
"głębokość"/"średnica"	≤	10

porównanie wartości liczbowych ☒ / porównanie wartości tekstowych ☐

lewa strona (wyrażenie): [Usunięty]

relacja: ≤

prawa strona (wartość): [Pusty]

Edycja dodawanej struktury bazy wiedzy

- Wiercenie
- Narzędzie: Wiertło kręte
- Rozwiercanie wykarczające
- Narzędzie: Rozwiertak wykarczak

edycja obiektów i atrybutów dodawanej struktury

nazwa obiektu: [Pusty] nazwa atrybutu: Narzędzie wartość: Rozwiertak wykarczak

☐ numeryczny całkowity ☐ numeryczny rzeczywisty ☒ tekstowy

Dodaj regułę Anuluj Pomoc

Rys. 1.20. Formularz definiowania reguł przypisujących parametry obróbki do TOE (Chlebus i Kuliberda, 2011a)

1.9. Podsumowanie

W rozdziale 1 opisano opracowaną systematykę Obiektów Elementarnych, uwzględniającą nie tylko klasycznie wyróżniane Technologiczne i Konstrukcyjne, ale także Funkcjonalne Obiekty Elementarne z możliwością definiowania parametrów i cech produktów wpływających na dalsze etapy rozwoju produktu. Etapy te pozwalają na kreowanie świadomego oddziaływania na środowisko naturalne przez dobór materiałów, geometrii i procesów techno-

logicznych decydujących o okresie eksploatacji produktu, jak również jego wycofaniu z rynku, obejmującym recykling i, o ile to możliwe, ponowne użytkowanie.

Zaproponowano definicję otwartej dla użytkownika struktury reguł decyzyjnych, umożliwiającej swobodne definiowanie parametrów obiektów technologicznych. Pozwala to na dowolność w zakresie formułowania postaci, parametrów i reguł identyfikujących TOE, wymaga jednak zaawansowanych umiejętności przy definiowaniu zależności pomiędzy modyfikacjami wprowadzanymi do reguł.

Powyższe rozwiązania można wykorzystać podczas projektowania algorytmów działania systemów CAD/CAE/CAPP. Oprogramowanie powinno umożliwiać wprowadzenie dodatkowej metryki produktu pozwalającej na definiowanie FOE oraz śledzenie, w toku rozwoju produktu, procesów podporządkowania się określonym wymaganiom.

Opisane wyniki prac badawczych dowiodły słuszności postawionych hipotez badawczych. Funkcjonalne Obiekty Elementarne uwzględniające aspekty recyklingu i ponownego użycia wpływają na proces konstytuowania KOE i TOE. Opracowana metoda identyfikacji TOE pozwala na przekształcanie danych modelu CAD 3D w zestaw OE, których definicja oraz reguły identyfikowania umożliwiają wprowadzanie modyfikacji przez użytkownika.

Systematyka OE pozwala na definiowanie FOE, które mają wpływ na dalsze etapy cyklu życia produktu, również fazę wycofania z użytkowania. Opisane powyżej rozwiązania mogą być wskazówkami dla projektantów i inżynierów oprogramowania klasy CAD/CAE/CAPP. W rozdziale scharakteryzowano możliwości modyfikacji i usprawniania procesów recyklingu i ponownego użycia produktów.

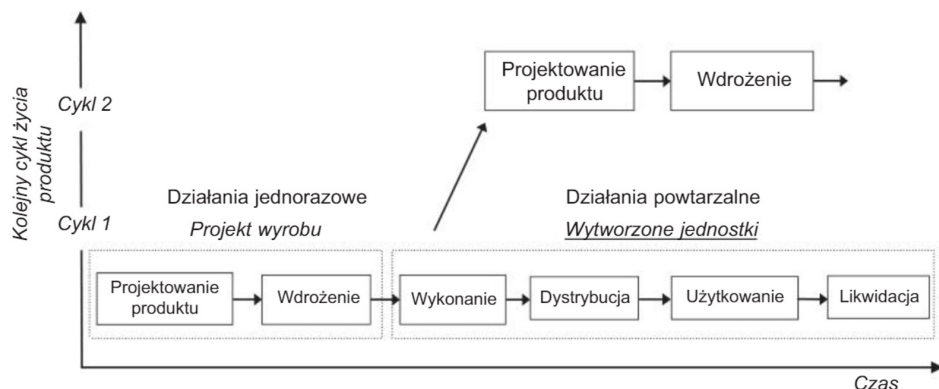
Recykling wielomateriałowych kompozytów warstwowych

Rozwiązania opisane w rozdziale 1 dotyczą usprawniania planowania procesów technologicznych wytwarzania z zastosowaniem OE. Jeśli wymagania określające produkt w FOE dotyczą etapu wycofania produktu z użytkowania, konieczne jest dostosowanie do nich procesów ponownego użytkowania oraz recyklingu. W dalszej części monografii opisano innowacje w recyklingu wielomateriałowych kompozytów warstwowych.

Współczesna gospodarka światowa zmaga się z szeregiem problemów w zakresie ochrony środowiska wynikających z nadmiernej emisji dwutlenku węgla. Podejmowanych jest wiele działań i wprowadzanych wiele regulacji prawnych w celu rozwiązania tych problemów. Należą do nich podatek węglowy (ang. *carbon tax*), którego wysokość jest proporcjonalna do ilości gazów cieplarnianych emitowanych przy spalaniu paliw kopalnych. Kolejnymi działaniami są modyfikacja modeli cyklu życia produktu oraz przywracanie cech użytkowych produktom lub ich fragmentom po okresie eksploatacji u klienta (Kans i Löfing, 2024; Xia, Chen, Wang i Wang, 2024; Zwickl-Bernhard, 2024). Regeneracja lub ponowne przetwarzanie wyeksploatowanych produktów jest obecnie tematem prac badawczych i publikacji naukowych na świecie (Sundin, 2019; Paul, Kerkhoff, Ballenberger, Reinbold i Reinhart, 2024).

Kompleksowy cykl życia produktu składa się nie tylko z rozwoju produktu i technologii jego wytwarzania, ale również z produkcji, dystrybucji, okresu użytkowania i wycofania z rynku. W publikacji (Hamrol, 2023) cykl życia wyrobu podzielono na sześć głównych etapów (rys. 2.1).

Ostatnim etapem jest likwidacja – tak ogólnie określane są wszystkie procesy związane z wycofaniem wyrobu z użytkowania. Procesy te obejmują również recykling, tj. odzysk materiałów wykorzystanych do wyprodukowania wyrobu oraz przygotowanie wyrobów ponownego wprowadzenia do użytkowania. Wymienione aspekty są szeroko opisywane w publikacjach dotyczących gospodarki o obiegu zamkniętym (ang. *circular economy*) czy zrówno-



Rys. 2.1. Cykl życia produktu. Źródło: (Hamrol, 2023)

ważonych praktyk, minimalizujących wpływ wyrobów na środowisko (Tian, Sharma, Wu i Pawar, 2024; Bressanelli i Saccani, 2025; Lecock, Terhorst, King i Scroggie, 2025).

2.1. Recykling urządzeń chłodniczych

W gospodarce o obiegu zamkniętym stosowane są następujące praktyki (Aryee i Kanda, 2024) ukierunkowane na końcowe aspekty cyklu życia produktu:

- recykling (ang. *recycle*),
- redukcja (ang. *reduction*),
- ponowne użytkowanie (ang. *reuse*),
- przepakowanie (ang. *repackage*),
- przetworzenie (ang. *remanufacture*),
- naprawa (ang. *repair*),
- redystrybucja (ang. *redistribution*),
- przeprojektowanie (ang. *redesign*),
- wyremontowanie (ang. *recondition*),
- odsprzedaż (ang. *resell*),
- uzupełnienie (ang. *restock*).

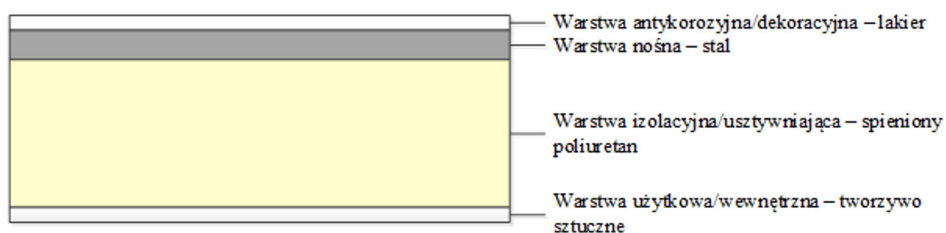
Komisja Europejska w materiałach EU Science Hub (European Commission, *Definition of recycling*) definiuje recykling jako: “[...] any recovery operation by which waste materials are reprocessed into products, materials or substances whether for the original or other purposes” [„każda operacja odzyskiwania, w ramach której materiały odpadowe są ponownie przetwarzane na

produkty, materiały lub substancje w pierwotnym lub w innym celu” [tłum. autor monografii]).

Wielkogabarytowe, domowe urządzenia chłodnicze jak lodówki, chłodziarki czy zamrażarki wymienione są w dyrektywie UE w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (*Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/19/UE...*). Zaleca się, aby urządzenia te były kontrolowane i wycofywane z rynku oraz poddawane procesom recyklingu.

Obudowy wielkogabarytowego sprzętu chłodniczego stanowią odpad uciążliwy w recyklingu. Powodem jest głównie warstwa izolacyjna, wykonana najczęściej z pianki poliuretanowej PUR. Pianka ta jest trwale związana z sąsiadującymi warstwami kompozytu, co wynika z technologii wytwarzania obudów: pianka PUR w postaci płynnej wprowadzana jest pomiędzy przygotowaną preformę z tworzywa sztucznego, a odpowiednio ukształtowaną blachę, a po stwardnieniu tworzy trwałe połączenie z sąsiadującymi warstwami obudowy. Taka struktura utrudnia recykling obudów sprzętu chłodniczego, wręcz uniemożliwia łatwe i szybkie odseparowanie pojedynczych materiałów składających się na kompozyt.

Kompozyty wielomateriałowe składają się z dwóch lub większej liczby materiałów trwale połączonych ze sobą, których indywidualne cechy użytkowe uzupełniają się i wpływają na ostateczną funkcjonalność materiału (Karsandik, Sabuncuoglu, Yildirim i Silberschmidt, 2023). Przykładem takich materiałów są wielomateriałowe kompozyty warstwowe stosowane w sprzęcie chłodniczym, a dokładniej w obudowach oraz drzwiach tych urządzeń. Analizując typową strukturę kompozytów, można wyróżnić zewnętrzną warstwę nośną, warstwę zapewniającą izolację termiczną i warstwę użytkową, która wchodzi w kontakt z żywnością (rys. 2.2). Wyprodukowanie kompozytu o takiej strukturze trwa stosunkowo krótko, proces jego wycofania z użytkowania (recykling) jest jednak bardzo kłopotliwy.



Rys. 2.2. Struktura kompozytu warstwowego w obudowach urządzeń chłodniczych

Do recyklingu domowego sprzętu chłodniczego projektowane są specjalistyczne, kompleksowe linie technologiczne. Głównymi etapami recyklingu są (Qin, Huang, Ma, Dong, Li, Wang, Xu i Chen, 2024):

- identyfikacja czynnika chłodzącego, czynnika spieniającego pianę PUR;
- opróżnianie układu z czynnika;
- demontaż głównych komponentów urządzenia chłodniczego;
- mechaniczne rozdrabnianie obudów (ang. *crushing*);
- separacja materiałów po rozdrabnianiu.

Materiałami otrzymywanymi w wyniku recyklingu są: szkło, tworzywa sztuczne (PS, ABS), rozdrobniona pianka PUR, stal, aluminium, miedź.

2.2. Hipoteza badawcza w recyklingu wielomateriałowych kompozytów warstwowych

Wyżej przedstawione klasyczne podejście do recyklingu sprzętu chłodniczego zawiera etap mechanicznego rozdrabniania (niszczenia) kompozytowych obudów i separacji pokruszonych obudów na materiały składowe. Technologia taka jest efektywna na skalę przemysłową, lecz prowadzi do bezpowrotnej utraty możliwości ponownego wykorzystania pierwotnych kompleksowych własności struktur kompozytowych. Odseparowane, pojedyncze materiały można natomiast przetwarzać i ponownie wprowadzać do obiegu, przetwarzając złom metali, produkując granulaty z tworzyw sztucznych, wykorzystując rozdrobnioną piankę PUR jako wysokoenergetyczne paliwo lub sorbent do usuwania wycieków oleju.

W celu zmniejszenia udziału destrukcyjnych operacji rozdrabniania kompozytowych obudów sprzętu chłodniczego w procesie recyklingu opracowano alternatywne rozwiązania technologiczne. Postawiono następującą hipotezę badawczą:

Możliwe jest opracowanie kontrolowanego procesu przecinania laserowego wielomateriałowych kompozytów warstwowych stosowanych w obudowach sprzętu chłodniczego przez dobór odpowiednich urządzeń i parametrów procesu oraz wyposażenia pomocniczego, w celu wycinania powtarzalnych geometrycznie fragmentów o określonym kształcie umożliwiającym ich przetwarzanie i ponowne wprowadzanie do użytkowania lub w celu zrealizowanie procesu re-

cyklingu prowadzącego do otrzymania produktów recyklingu o wysokiej czystości i wartości rynkowej.

Na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej zrealizowano prace badawcze w ramach projektu WND-POIG.01.03.01-02-046/08 *Linia technologiczna do demontażu sprzętu AGD z wykorzystaniem obróbki laserowej*. Celem przeprowadzonych badań było opracowanie alternatywnych rozwiązań w recyklingu obudów urządzeń chłodniczych z kompozytów wielomateriałowych.

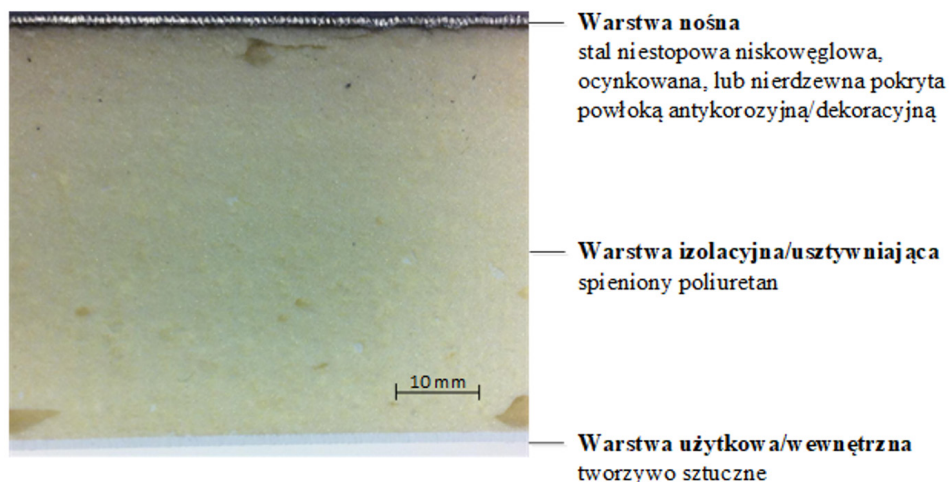
Przyjęto założenie, że należy dążyć do maksymalnego wykorzystania pierwotnych cech użytkowych kompozytów i minimalizacji destrukcyjnego rozdrabniania kompozytów w procesach recyklingu. W efekcie możliwe byłoby częściowe ponowne użytkowanie obudów w postaci złożonych z warstw fragmentów do izolacji termicznej w budownictwie. Takie postępowanie jest zgodne z dążeniem do wyróżnienia cech pozostałych w produktach wycofanych z użytkowania i wykorzystania ich w przypadku ponownego wprowadzenia produktu na rynek, w zastosowaniu podobnym lub innym niż pierwotny produkt (Modak, Sinha i Ghosh, 2023). Na bazie tej idei powstała koncepcja technologii laserowego wycinania fragmentów obudów sprzętu chłodniczego w celu uzyskania paneli z potencjałem do ponownego wprowadzenia ich do użytkowania, tj. wykorzystania ich jako izolatorów termicznych.

2.3. Wielomateriałowe kompozyty warstwowe w urządzeniach chłodniczych

Funkcje, które spełniają warstwowe kompozyty w urządzeniach chłodniczych, to zapewnienie:

- wymaganej wytrzymałości mechanicznej i stateczności konstrukcji urządzenia;
- izolacji termicznej wnętrza urządzenia chłodniczego od środowiska zewnętrznego;
- bezpiecznego przechowywania żywności w urządzeniu.

Typowy przekrój kompozytowej obudowy urządzenia chłodniczego przedstawiono na rys. 2.3. Próbkę otrzymano w wyniku mechanicznego przecięcia obudowy chłodziarki.



Rys. 2.3. Fotografia kompozytu warstwowego obudowy chłodziarki – przekrój

W strukturze kompozytowej przedstawionej na rys. 2.3 warstwą nośną jest blacha ze stali niskowęglowej. W zależności od producenta i części obudowy może nią być również blacha ocynkowana lub nierdzewna. Wymienione rodzaje stali charakteryzuje wysoka podatność na kształtowanie plastyczne na zimno uzyskiwana dzięki procesowi wytwarzania, odpowiedniemu doborowi składu chemicznego (niskiej zawartości węgla) oraz odpowiedniej mikrostrukturze (ferrytu lub austenitu). Wytwarzane są w postaci blach lub taśm o zakresach grubości podanych w tabeli 2.1.

Zewnętrzna, formowana z blachy warstwa materiału kompozytowego pokryta jest powłoką lakierniczą dekoracyjną i/lub antykorozyjną. Powłoki te (lakier proszkowe wytwarzane na bazie żywic epoksydowych i poliestrowych) zabezpieczają powierzchnię obudowy przed korozją.

Żywice epoksydowe należą do polimerów chemoutwardzalnych. W stanie usieciowionym są twarde, kruche, bardzo wytrzymałe (tabela 2.3) i odporne na starzenie. Cechuje je również bardzo dobra przyczepność do metalowego podłoża (Koszkul, 1999; Broniewski, Kabko, Płaczek i Thomala, 2000; Dobrzański, 2002). W zależności od rodzaju utwardzacza dodanego przez producenta utwardza się je na zimno lub na gorąco. Dostępne są proszki na bazie żywicy z dodatkiem utwardzaczy obniżających palność.

Nienasycone żywice poliestrowe utwardzane są na drodze kopolimeryzacji rodnikowej, na zimno i na gorąco. Podobnie jak żywice epoksydowe mogą być wytwarzane w odmianach samogasnących (tabela 2.3). Parametr palności jest szczególnie istotny z uwagi na technologię przecinania laserowego.

Tabela 2.1. Własności blach stalowych
stosowanych w warstwowych kompozytach urządzeń chłodniczych

Material	Postać	Grubość [mm]	Skład chemiczny
Stal niestopowa	blacha czarna	0,30–0,5	%C ≤ 0,12 domieszki: S, P, Mn, Si
Stal niestopowa ocynkowana	blacha czarna	0,30–1,0	%C ≤ 0,12 domieszki: S, P, Mn, Si
	powłoka cynkowa	0,0025–0,01	elektrolityczna: Zn
		100–600 gm ⁻²	ogniowa: Zn dodatki: Al., Pb, Sb
Stal nierdzewna	blacha	0,30–1,0	%C ≤ 0,10 %Cr = 11,5–18 %Ni = 7–11 domieszki: S, P, Mn, Si, Ti, Nb, N
		0,30–1,0	%C ≤ 0,08 %Cr = 11,5–18 domieszki: S, P, Mn, Si, Ti, Nb, Al

Źródło: oprac. własne na podstawie: (Blacharski, 2024).

Tabela 2.3. Podstawowe własności żywic
stosowanych do wytwarzania lakierów proszkowych

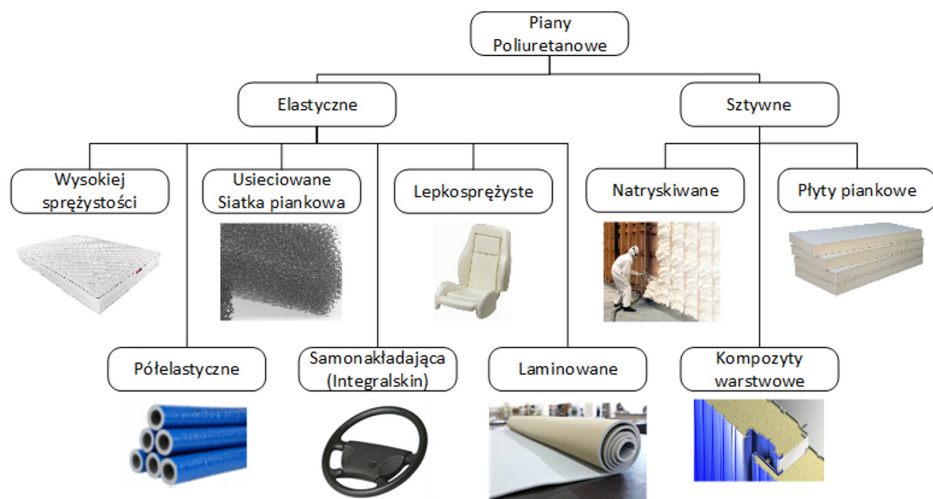
Material	Gęstość [g/cm ⁻³]	Temperatura zeszklenia [°C]	Moduł Younga [GPa]	Wytrzymałość na rozciąganie [N/mm ²]	Przewodność cieplna [W/m ⁻¹ K ⁻¹]	Pojemność cieplna wł. [J/kg ⁻¹ K ⁻¹]	Palność
EP	1,2–1,4	107	2,1–5,5	40–85	0,2–0,5	1700–2000	gaśnie
UP	1,1–1,4	67	1,3–4,5	45–85	0,2–0,4	1200–2400	gaśnie

Źródło: oprac. własne na podstawie: (Koszkul, 1999; Broniewski, Kabko, Płaczek i Thomala, 2000; Dobrzański, 2002).

Izolację termiczną i dodatkową sztywność struktury w omawianym wielomateriałowym kompozycie warstwowym zapewnia warstwa izolacyjna z pianki poliuretanowej PUR. Współczynnik przewodzenia ciepła λ tego materiału, w zależności od jego źródła, wynosi 0,02–0,05 W/mK (Winkler-Skalna i Łoboda, 2020; Zygmun Kowalska, Szajding, Zakrzewska, Kuźnia, Stanik i Gude, 2024). W zależności od właściwości pianki PUR są klasyfikowane do

kilku kategorii (rys. 2.4) (Peyrton i Avérous, 2021). Sztywne pianki poliuretanowe wytwarza się z polioli, tj. poliestrów i polieterów, przynajmniej trifunkcyjnych, w celu mocniejszego usieciowania polimeru w procesie spieniania. Spienianie masy poliuretanowej może odbywać się (Prociak, Rokicki i Ryszkowska, 2016):

- chemicznie, tj. na drodze reakcji cyjanianu z wodą, z wydzielaniem CO_2 ;
- fizycznie, tj. przez dodanie organicznej cieczy o niskiej temperaturze wrzenia, ulegającej odparowaniu w czasie egzotermicznego procesu syntezy poliuretanu lub też przez mieszanie przy wtłaczaniu powietrza.



Rys. 2.4. Podział pian poliuretanowych.

Źródło: oprac. własne na podstawie: (Peyrton i Avérous, 2021)

Metoda fizycznego spieniania jest stosowana w wytwarzaniu pianek sztywnych, o wysokich własnościach izolacyjnych. Jako środki spieniające szeroko stosowane były chlorofluorowęglowodory (CFCs, inaczej: freony) oraz wodorochlorofluorowęglowodory (HCFCs), ze względu na ich bardzo dobrą rozpuszczalność w izocyjanianach i polioliach, brak rozpuszczalności w poliuretanach, wysoką stabilność, nietoksyczność, niepalność, bezwonność, niekanцерogenność oraz niską cenę.

W grupie stosowanych środków spieniających znajdują się (Ibrahim, Kadhim, Hammoodi, Rashid i Askar, 2024):

- Chlorofluorowęglowodory (CFCs), z których najczęściej stosowane były:
 - CFC-11 (trichlorofluorometan – CCl_3F),
 - CFC-12 (dichlorodifluorometan – CCl_2F_2),

- CFC-113 (trichloro-trifluoroetan – $\text{CCl}_2\text{FCCLF}_2$),
- CFC-114 (dichloro-tetrfluoroetan – $\text{CClF}_2\text{CClF}_2$),
- CFC-115 (chloro pentafluoroetan – CClF_2CF_3).
- Wodorochlorofluorowęglowodory (HCFCs), alternatywne dla CFCs, jednakowo obwiniane za dziurę ozonową i ocieplenie klimatu, stosowane w Europie od 1994 roku:
 - HCFC 141b ($\text{CH}_3\text{CCl}_2\text{F}$),
 - HCFC 142b (CH_3CClF_2),
 - HCFC 22 (CHClF_2).
- Wodorofluorowęglowodory – stanowiące bardziej akceptowalną grupę (z powodu braku zawartości chloru) niż CFCs i HCFCs, wprowadzone na rynek w 1994 roku:
 - HFC 134a (CH_2FCF_3),
 - HFC 143a (CH_3CF_3),
 - HFC 227 (C_3HF_7),
 - HFC 245fa ($\text{CHF}_2\text{CH}_2\text{CF}_3$).
- Cyklopentan (C_5H_{10}), np. cyklopentan 70/30 – stabilny, łatwopalny, stosowany w Polsce od 2004 roku.

Chociaż porofory (CFCs i HCFCs) nie powinny być stosowane w Europie od 01.01.2004 roku, urządzenia je zawierające po wycofywaniu z rynku nadal mogą być kierowane do recyklingu (Macchi-Tejeda, Opatová i Leducq, 2007a, 2007b).

Poza środkami spieniającymi w produkcji pianek sztywnych stosuje się inne środki pomocnicze (Olczyk, 1968):

- katalizatory aktywne – 2,2,2-dwuazodwucyklootan i 1,2,4-trójmetylopiperazy w ilości 0,1–01,0%;
- środki powierzchniowo czynne – preparaty silikonowe, kopolimery tlenu propylenu i etylenu w ilości 0,1–01,0%;
- środki zmniejszające palność – siarczany, fosforany, węglany metali, tlenki cynku, antymonu i glinu, związki zawierające fosfor, siarkę, azot i chlorowce, związki boru i tytanu, związki organiczne fosforu, i chlorowane polimery zawierające fosfor, aminy, chlorowane alkohole, etery, estry, chlorowane węglowodory;
- wypełniacze – włókna bawełniane syntetyczne, mączka drzewna, włókna szklane, mika, krzemionka, sole i tlenki nieorganiczne (tlenek antymonu i fosforanu amonowego).

Pianki PUR odznaczają się wyjątkowo niskim przewodnictwem cieplnym, odpornością na długie oddziaływanie temperatury z zakresu -50 – 120°C oraz bardzo dobrą przyczepnością do innych materiałów, co utrudnia ich separację w procesie recyklingu.

W tabeli 2.4 podano przyczepność pianek poliuretanowych do różnych materiałów, mierzoną wytrzymałością połączenia na rozciąganie.

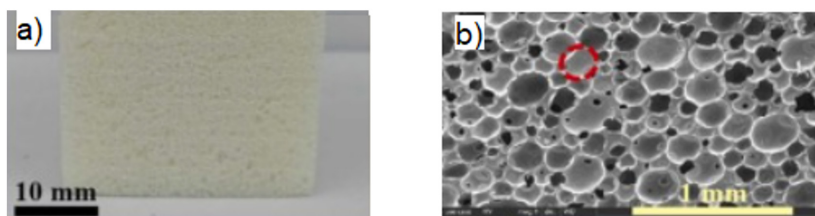
Tabela 2.4. Przyczepność sztywnych pianek poliuretanowych (o gęstości $0,032 \text{ M/gm}^{-3}$) do różnych materiałów

Material	Wytrzymałość połączenia na rozciąganie [MPa]	
	pianka polieterowa	pianka poliestrowa
Stal	0,132	0,294
Aluminium	0,111	0,318
Tworzywo akrylowe	0,097	0,420
Wytrzymałość pianki PUR na rozciąganie [MPa]	0,147	0,455

W kompozytach warstwowych, z których wykonane są obudowy sprzętu chłodniczego, to właśnie przyczepność pianki PUR do blachy oraz wytłoczki z tworzywa sztucznego zapewniają utworzenie sztywnej, stabilnej konstrukcji.

W zależności od warunków wytwarzania komórki zamknięte zawierające gaz mogą stanowić 30–90% pianki PUR. W pracy (Fu, Qiu, Ni, Ye, Zou, Luo i Liang, 2024) opisano termiczne i akustyczne właściwości izolacyjne sztywnych pianek PUR, które zależały od średniego rozmiaru komórek i współczynnika zamkniętych komórek. Przewodność cieplna tych pianek wahała się w zakresie $0,0398$ – $0,0515 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$, a strata transmisji dźwięku w ich przypadku przekraczała 25 dB w zakresie 500–5000 Hz.

Przykładową strukturę sztywnej pianki PUR o gęstości 148 kg/m^3 wraz z analizą wielkości komórek przedstawia rys. 2.5.



Rys. 2.5. Struktura sztywnej pianki PUR: a) przekrój próbki, b) obraz SEM.

Źródło: oprac. własne na podstawie: (Fu i in., 2024)

Na podstawie literatury przedmiotu (Olczyk, 1968; Liu, Salmeia, Rentsch, Hao i Gaan, 2017; Czech-Polak, Oliwa, Oleksy i Budzik, 2018) oszacowano wartości temperatury zapłonu sztywnych pianek PUR (tabela 2.5).

Tabela 2.5. Wybrane własności sztywnej pianki PUR

Material	Postać	Grubość [mm]	Gęstość [M/gm ³]	Temperatura		Przewodność cieplna [W/(m·K)]
				zapłonu [°C]	samozapłonu [°C]	
Poliuretan (PUR)	Pianka sztywna	40–100	0,020–0,045	310	415	0,018–0,034

Źródło: oprac. własne na podstawie (Olczyk, 1968; Liu i in., 2017; Czech-Polak i in., 2018).

W ramach badań nie tylko korzystano z wiedzy zawartej w literaturze przedmiotu, prowadzono również rozmowy z przedsiębiorcami zajmującymi się recyklingiem urządzeń chłodniczych. Ustalono, że warstwa użytkowa (wewnętrzna) kompozytu warstwowego zbudowana jest z jednego z materiałów (Kijęński, Błędzki i Jeziórska, 2011; Chylińska, Trojanowski, Podgórski i Niemcewicz, 2018):

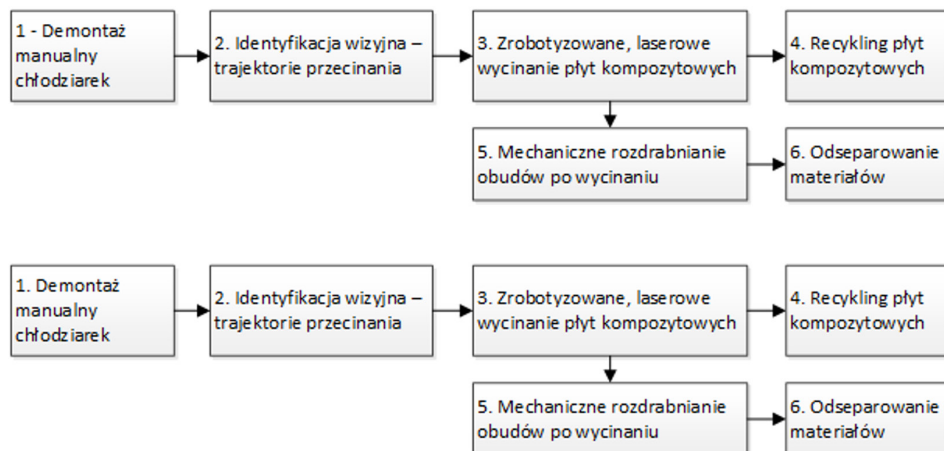
- polipropylenu (PP) i jego modyfikacje;
- polistyren (PS) i jego modyfikacje wysokoudarowe, w tym najistotniejszy wśród nich terpolimer akrylonitryl+styren+butadien (ABS).

2.4. Linia technologiczna do recyklingu z obróbką laserową

Złożona budowa kompozytów warstwowych pochodzących z urządzeń chłodniczych jest w czasie klasycznego procesu recyklingu mechanicznie rozdrabniana, a następnie materiały składowe kompozytu są sortowane. Opracowana, nowa technologia polega na wykorzystaniu obróbki laserowej do przecinania obudów sprzętu chłodniczego w celu szybkiego przygotowania fragmentów w formie fragmentów płyt kompozytowych. Założenia dotyczące linii technologicznej do recyklingu domowego sprzętu chłodniczego obejmowały sześć głównych etapów (rys. 2.6):

1. Demontaż ręczny podzespołów chłodziarki: szuflad, półek, szkła oraz usuwanie czynnika chłodniczego, oleju, agregatu, skraplacza, przewodów elektrycznych.

2. Identyfikacja wizyjna demontowanego urządzenia, przetwarzanie danych geometrycznych, wyznaczanie trajektorii przecinania.
3. Zrobotyzowana obróbka laserowa, wycinanie płyt kompozytowych z obudowy.
4. Recykling wyciętych płyt kompozytowych.
5. Rozdrabnianie pozostałych po wycineru części obudowy.
6. Odseparowanie materiałów po rozdrabnianiu.



Rys. 2.6. Główne etapy linii do recyklingu sprzętu chłodniczego z obróbką laserową

Procesy na poszczególnych etapach recyklingu umożliwiają otrzymywanie z płyt kompozytowych nowych kategorii materiałów, niemożliwych do uzyskania w klasycznym podejściu. Są to:

- panele izolacyjne z pianki PUR odzyskanej w postaci płyt;
- arkusze blachy oddzielone od warstwy pianki PUR;
- polistyren lub polipropylen oczyszczony z pozostałości pianki PUR.

Odpowiednia segregacja urządzeń chłodniczych i pakietowanie wstępne z uwagi na takie same tworzywa stosowane jako warstwa wewnętrzna urządzeń pozwalają na otrzymanie jednorodnego pod względem materiałowym, czystego granulatu o znacznie wyższej wartości rynkowej niż granulatu po klasycznych procesach rozdrabniania. Część procesów w przedstawionej linii technologicznej zachodzi z zastosowaniem klasycznego rozdrabniania kompozytowych korpusów obudów, a następnie separacji po zmieleniu, co prowadzi do otrzymywania w wyniku recyklingu obudów urządzeń chłodniczych znanych materiałów:

- rozdrobnionych drobin metalu,
- zmielonego tworzywa sztucznego,
- cząstek pianki PUR.

Największym wyzwaniem badawczym było opracowanie metody i urządzeń pozwalających na wdrożenie do recyklingu wielomateriałowych kompozytów warstwowych technologii obróbki laserowej.

2.5. Laserowe przecinanie wielomateriałowych kompozytów warstwowych

Obróbka materiałów kompozytowych jest procesem wymagającym uwzględnienia możliwości kształtowania co najmniej dwóch materiałów składających się na kompozyt. Możliwości obróbki jednego z materiałów mogą bowiem odbiegać od obrabialności pozostałych materiałów składowych kompozytu. Powodowałoby to szereg wyzwań podczas doboru technologii obróbki, narzędzi oraz parametrów realizacji procesów (Davim, 2013; Trzepieciński, 2018; Peng, Tian, Xiang, Yu, Niu, Gao i Gao, 2025).

Problematyka obróbki materiałów warstwowych jest aktualnym i ważnym zagadnieniem w wytwarzaniu. W publikacji (Ma, Shi, Han, Li, Guo, Li i Yan, 2025) opisano wyniki badań nad nowymi narzędziami o bionicznych kształtach do procesów wiercenia i frezowania w kompozytowych materiałach warstwowych. Prace miały na celu minimalizację delaminacji struktur kompozytowych podczas procesów obróbki. Możliwości kształtowania kompozytów z węgla krzemu wzmocnionych włóknem węglowym przez obróbkę frezowaniem opisano w artykule (Srinivas, Shyam, Sankar, Khatri i Udayakumar, 2024).

Wielomateriałowe kompozyty warstwowe (tj. złożone z blachy, pianki PUR i tworzywa sztucznego) ze względu na własności fizykochemiczne materiałów składowych zaliczyć można do materiałów trudnoobrabialnych. Materiały te różnią się znacząco wytrzymałością mechaniczną, temperaturą topnienia i temperaturą zapłonu (Birman i Kardomateas, 2018). Temperatura topnienia stali w zależności od gatunku waha się w granicach 1400÷1500°C (Dobrzański, 2002), natomiast temperatura zapłonu sztywnych pianek PUR wynosi ok. 310°C.

W metodach przecinania laserowego materiałów znajdują zastosowanie następujące techniki (Naresh i Khatak, 2022), (Sharma i Yadava, 2018):

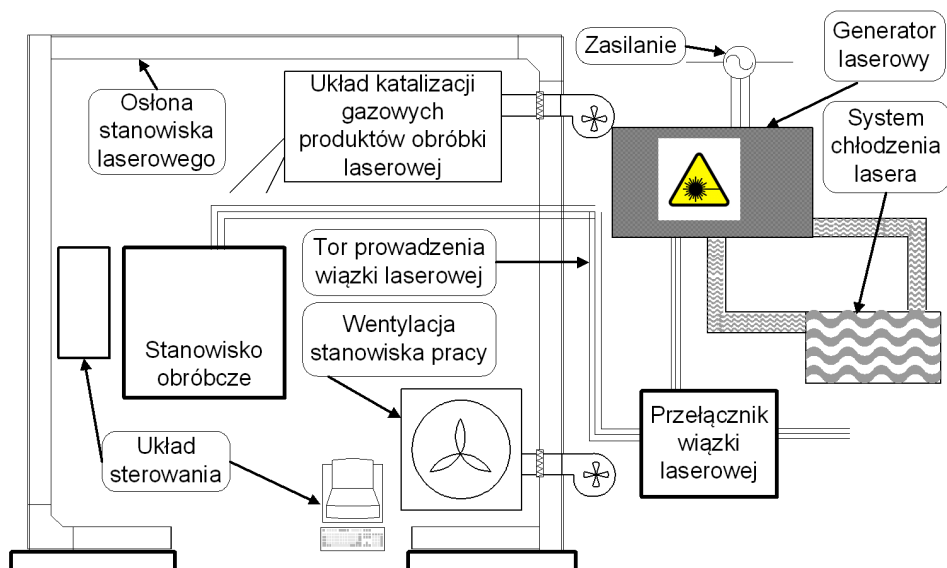
- odparowanie materiału – sublimacja;
- stopienie i wydmuchanie;
- przecinanie reaktywne – spalanie;
- pękanie na skutek wywołanych naprężeń cieplnych;
- procesy degradacji chemicznej.

Z uwagi na warstwową strukturę rozpatrywanego kompozytu zdecydowano się na przeprowadzenie badań z wykorzystaniem techniki przecinania przez stopienie i wydmuchanie.

Prace badawcze w zakresie opracowania metody laserowego przecinania kompozytów warstwowych dotyczyły przede wszystkim wykorzystania energii stopionej promieniowaniem laserowym blachy stalowej oraz gorącego strumienia gazów do przecinania pozostałych warstw kompozytu, aż do jego całkowitego przecięcia.

Główne stanowisko badawcze składało się z następujących komponentów (rys. 2.7):

- laseru ROFIN SINAR DC020 CO₂ o mocy 2,0 kW;
- statycznego toru prowadzenia wiązki z systemem chłodzonych lusterek miedzianych;
- 4-osiowego stołu obróbczego BKOX dostosowanego do obróbki laserowej;
- sterownika CNC IBH Laser Macro 10;
- systemu chłodzenia z glikolowym czynnikiem chłodzącym.



Rys. 2.7. Schemat stanowiska badawczego do laserowego przecinania kompozytów warstwowych

Laserowe przecinanie kompozytów warstwowych przeprowadzano na płytach wyciętych mechanicznie z obudów chłodziarek (rys. 2.8).



Rys. 2.8. Płyta kompozytowa wycięta mechanicznie z obudowy chłodziarki

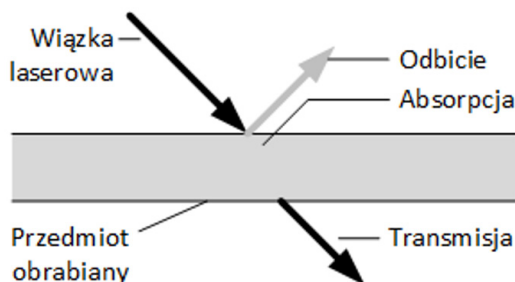
Widok na rzeczywiste stanowisko badawcze obróbki laserowej przedstawia rys. 2.9.



Rys. 2.9. Stanowisko badawcze
do laserowego przecinania kompozytów warstwowych

Cięcie laserowe to proces cięcia termicznego, w którym skupiona energia wiązki laserowej jest absorbowana przez powierzchnię obrabianego, metalowego przedmiotu i zamieniana na ciepło, czego efektem jest topienie i przecinanie metalu (ISO 9013, 2017) przy udziale sprężonego gazu wspomagającego (np. tlenu) (Riveiro, Quintero, Lusquiños, Comesaña, del Val i Pou, 2011).

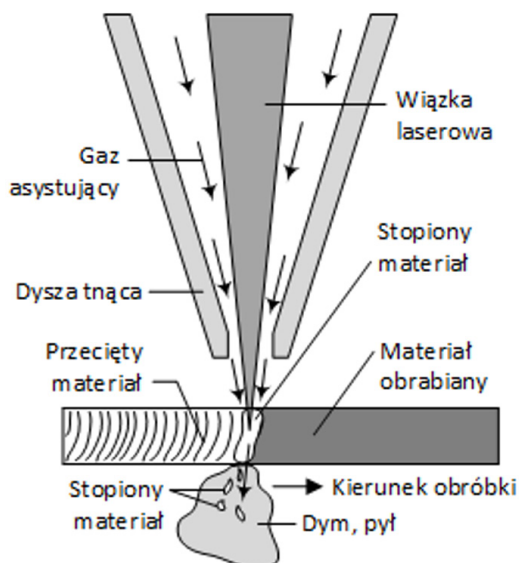
Cięcie odbywa się w momencie uderzenia wiązki w przedmiot obrabiany. Podczas tej operacji jedna część wiązki laserowej jest absorbowana przez przedmiot, druga część jest odbijana, a trzecia część przechodzi przez przedmiot obrabiany (rys. 2.10).



Rys. 2.10. Interakcja pomiędzy wiązką laserową a materiałem.

Źródło: oprac. własne na podstawie (Kanyilmaz, 2019)

Stopień absorpcji, odbicia i transmisji jest definiowany za pomocą długości fali promieniowania laserowego, polaryzacji i kąta padania wiązki laserowej oraz właściwości materiału, temperatury, geometrii i stan powierzchni przedmiotu obrabianego. Proces laserowego przecinania materiałów metalicznych metodą stopienia i wydmuchania schematycznie przedstawiono na rys. 2.11.



Rys. 2.11. Przecinanie laserowe przez stopienie i wydmuchanie.

Źródło: oprac. własne na podstawie (Kanyilmaz, 2019)

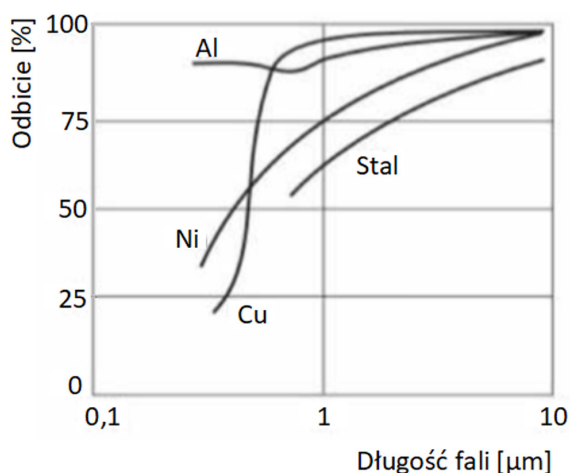
Dobór parametrów cięcia laserem zależy od termodynamicznych i fizykochemicznych właściwości materiału, takich jak: zdolność wchłaniania energii lasera, tj. zdolność absorpcyjna (ang. *absorptance*), zdolność odbicia promieniowania, przewodność cieplna, temperatura wrzenia.

Zdolność absorpcyjna ciała lub substancji jest wielkością fizyczną charakteryzującą stopień pochłaniania promieniowania elektromagnetycznego przez to ciało lub substancję. Określana jest stosunkiem strumienia energii promieniowania pochłoniętego przez dane ciało do strumienia padającego na nie (Indhu, Vivek, Sarathkumar, Bharatish i Soundarapandian, 2018; Volpp, 2023):

$$A = \frac{\Phi_A}{\Phi} \quad (2.1)$$

gdzie A oznacza zdolność absorpcyjną, Φ_A – strumień energii promieniowania pochłonięty przez dane ciało, Φ – strumień energii padający na ciało.

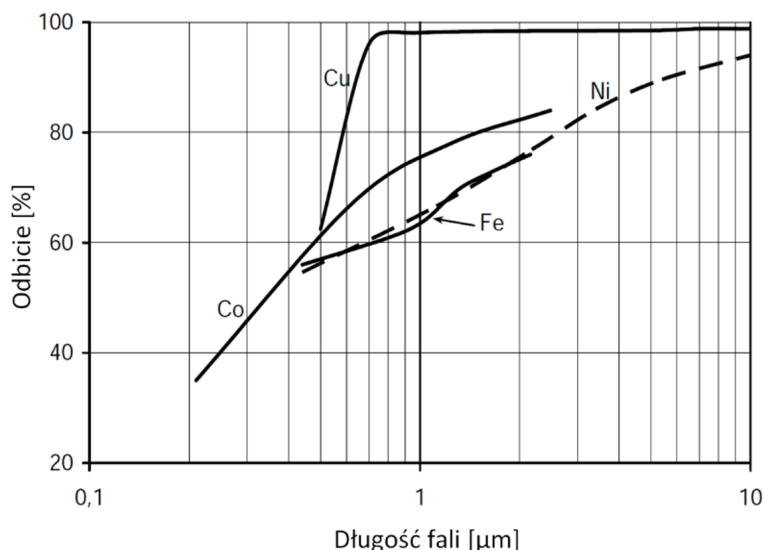
Zdolność absorpcyjna jest wielkością bezwymiarową. Zależność odbicia promieniowania laserowego od długości fali dla wybranych metali, tj. stali, glinu (Al.), niklu (Ni) i miedzi (Cu), przedstawiono na rys. 2.12.



Rys. 2.12. Wpływ długości fali promieniowania laserowego na absorpcję energii wiązki laserowej na powierzchni przedmiotów metalowych.

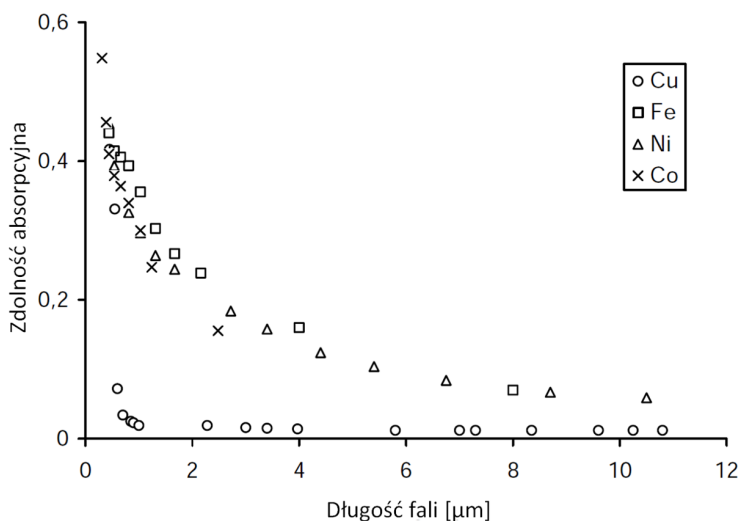
Źródło: (Klimpel, 2012)

W pracy (Yadroitsev, 2009) przedstawiono wyniki dla kobaltu (Co), Cu, czystego żelaza (Fe) oraz Ni (rys. 2.13).



Rys. 2.13. Współczynnik odbicia powłok metalicznych w funkcji długości fali promieniowania laserowego. Źródło: (Yadroitsev, 2009)

Można zauważyć drobne rozbieżności w przedstawionych powyżej danych, ale charakter krzywych dla stali i Fe jest podobny na obu wykresach. Zdolność pochłaniania promieniowania jest tym większa, im mniejsza jest długość fali (rys. 2.14).



Rys. 2.14. Zdolność absorpcyjna czystych postaci wybranych metali w temperaturze pokojowej. Źródło: (Yadroitsev, 2009)

Zdolność absorpcyjna zależy od wielu czynników, w tym od temperatury, chropowatości powierzchni, stopnia utlenienia oraz zmian w morfologii powierzchni. Jest monotoniczna, a jej wzrost następuje wraz z temperaturą (Yadroitsev, 2009). Tabela 2.6 zawiera wartości współczynników powierzchniowego odbicia i pochłaniania energii wiązki lasera dla żelaza, przy długości fal charakterystycznej dla lasera Nd:YAG i CO₂.

Tabela 2.6. Zdolność absorpcyjna oraz współczynnik odbicia żelaza (Fe)

Laser	Nd:YAG	CO ₂
Długość fali	$\lambda = 1,06 \text{ } [\mu\text{m}]$	$\lambda = 10,6 \text{ } [\mu\text{m}]$
Zdolność absorpcyjna, A	0,36	0,03
Współczynnik odbicia, R	0,64	0,97

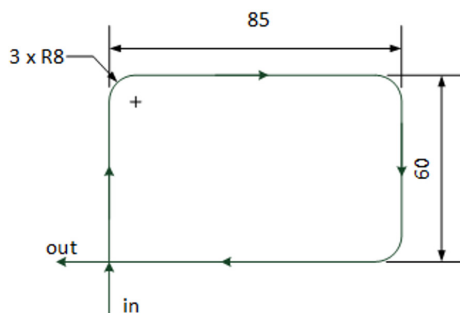
Źródło: oprac. własne na podstawie: (Yadroitsev, 2009).

Ze względu na powyższe dane oraz na to, że grubość blachy stalowej w kompozytach warstwowych na obudowy chłodnicze wynosi 0,3–1,0 mm, można stwierdzić, że stosowanie lasera CO₂ będzie skuteczne podczas laserowego przecinania kompozytów warstwowych od strony blachy.

Planując testy laboratoryjne, przyjęto następujące założenia:

1. Przecinanie płyty kompozytowej realizowane będzie od strony blachy.
2. Wiązka laserowa ogniskowana będzie tak, żeby doprowadzić do stopienia blachy.
3. Produkty stopienia blachy wydmuchiwane będą z pomocą gazu asystującego przez pozostałe warstwy kompozytu.

Zaprojektowano kształt próbek jak na (rys. 2.15). W celu minimalizacji koncentracji energii cieplnej w wyniku oddziaływania wiązki laserowej przewidziano zaokrąglenia R8 mm na narożach wycinanego kształtu.



Rys. 2.15. Geometria próbek wycinanych laserowo z płyt kompozytowych

Na potrzeby realizacji laserowego przecinania stanowisko badawcze wyposażono w stół grzebieniowy, umożliwiający swobodne wydostawanie się gazów i pyłów pod wycinanymi próbkami (Chlebus i Krot, 2011).

Na początku laserowego wycinania próbek przyjęto:

- laser CO₂;
- moc lasera: 1 kW;
- prędkość przecinania: 1 m/s,
- odległość wylotu dyszy głowicy od materiału obrabianego: 0,5 mm;
- ciśnienie nadmuchiwanego powietrza: 10 bar.

Podczas realizacji procesu zaobserwowano ciemny, drażniący dym, pojedyncze płomienie, a podczas wycinania jednej z próbek zapaliła się cała płyta kompozytowa (rys. 2.16).



a)



b)

Rys. 2.16. Laserowe przecinanie kompozytowej płyty z obudowy chłodziarki:

a) spalona płyta b) nadpalona, wycięta próbka

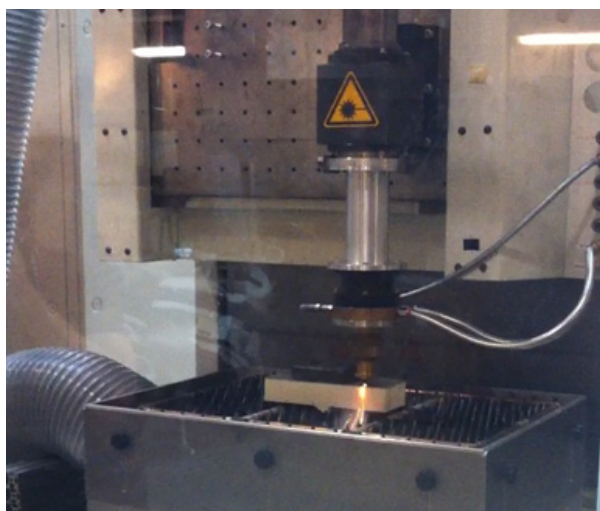
Z uwagi na bezpieczeństwo podczas kontynuowania prac badawczych stanowisko wyposażono w komponenty. Zewnętrznemu laboratorium specjalizującemu się w pomiarach jakości powietrza oraz gazowych produktach spalania zlecono wykonanie testów składu chemicznego gazów emitowanych podczas laserowego przecinania omawianych kompozytów.

Na podstawie raportu z przeprowadzonych pomiarów dobrano wysokowydajny system filtrujący gazowe produkty przecinania laserowego. Do stanowiska dołączono system odciągu i filtracji firmy Purex International Ltd., model Laserex 4000 (rys. 2.17).



Rys. 2.17. System filtracji PUREX Laserex 4000

Wieloetapowy system filtracji składa się z filtra wstępnego, labiryntowego, HEPA, głównego filtra węglowego. Maksymalna wydajność urządzenia filtrującego wynosi 4000 m³/h. System filtracji podłączono do stołu grzebienio-wego elastycznym przewodem o średnicy 200 mm (rys. 2.18). Na stanowisku widoczna jest przecinana laserowo płyta kompozytowa. Opisane rozwiązanie zapewniło efektywne odprowadzania gazów i pyłów ze strefy przecinania.



Rys. 2.18. Stanowisko laserowego przecinania kompozytów podczas testów

Wyniki pomiarów unosu zanieczyszczeń na kanale dolotowym do filtra oraz pomiaru emisji zanieczyszczeń na wylocie z układu oczyszczającego przedstawiono w tabeli 3.7.

Tabela 2.7. Wyniki pomiarów unosu i emisji zanieczyszczeń w laserowym przecinaniu kompozytu warstwowego

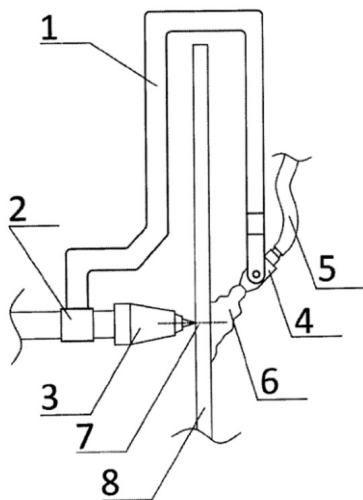
Zanieczyszczenie	Unos [mg/m ³]	Emisja [mg/m ³]	Skuteczność [%]
Pył ogółem	28,3	< 0,21	> 99,1
	33,8	< 0,39	> 98,8
CO	1,5	< 1,3	> 13,3
	2,3	< 1,3	> 43,5
Aceton	6,43	< 1,1	> 82,9
	< 0,9	< 0,92	–
Lotne związki organiczne (LZO) w przeliczeniu na całkowity węgiel organiczny (TOZ)	14,15	1,53	89,2
	10,48	1,25	88,1
Styren	2,72	< 1,1	> 59,6
	< 0,90	< 0,92	–
Węglowodory alifatyczne	3,92	1,53	61
	4,59	1,2	73,9
Węglowodory aromatyczne	4,08	1,55	62
	4,81	1,27	73,6

Źródło: (Krot, Chlebus i Kuźnicka, 2017).

Na podstawie wyników pomiarów oceniono skuteczność działania układu oczyszczającego gazowe produkty przecinania laserowego. Głównymi zanieczyszczeniami powstającymi podczas cięcia laserowego kompozytu złożonego z warstw stali, pianki PUR i PS są pył oraz lotne związki organiczne. Skuteczność usuwania pyłu wyniosła ponad 99%, natomiast skuteczność usuwania LZO była bliska 90%. Analiza ilościowa wykazała ponadto występowanie w gazach wylotowych acetonu i styrenu, będących prawdopodobnie produktami utlenienia polistyrenu. Analiza jakościowa próbki gazów emitowanych podczas cięcia wykazała obecność benzenu, butanolu, cykloheksanu oraz octanu winylu, ale w śladowych ilościach niemożliwych do oznaczenia.

Produkty stapiania w strefie przycinania stali otrzymywane w wyniku przecinania laserowego kompozytów od strony blachy stalowej miały wysoką temperaturę (ok. 1400°C). Wysoka temperatura procesu, łatwopalna piana PUR oraz tlen z powietrza sprzyjały możliwości zapalenia się kompozytu podczas przecinania. Konieczne było więc wyeliminowanie środowiska tlenowego w tym procesie. W tym celu opracowano rozwiązania techniczne, umożliwiające podawanie niepalnych gazów do strefy przecinania.

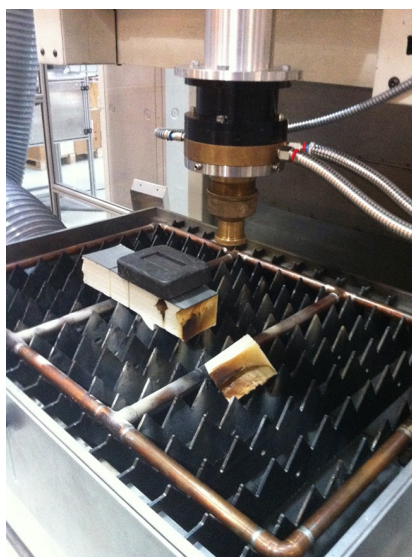
Opracowane urządzenie do cięcia laserowego, w szczególności te przeznaczone do cięcia kompozytów warstwowych w atmosferze niepalnych gazów, zgłoszono do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej. Rozwiązanie zostało objęte ochroną patentową jako *Urządzenie do cięcia laserowego* – patent nr PL 218122 (Chlebus, Krot, Kuliberda i Antończak, 2014). Istotę urządzenia (rys. 2.19) stanowi głowica laserowa (3) wyposażona w obrotowy uchwyt (2) zintegrowany ze stelażem (1), na końcu którego zamocowana jest co najmniej jedna dysza gazu niepalnego (4), połączona z przewodem gazu niepalnego (5). Dysza gazu niepalnego ustawiona jest pod kątem do powierzchni przecinanego obiektu. Pomiędzy głowicą laserową a dyszą gazu niepalnego umieszczony jest przesuwnie przecinany płaski obiekt (8). Wylot dyszy gazu niepalnego skierowany jest bezpośrednio na krawędź cięcia przecinanego obiektu, co pozwala na skuteczny nadmuch gazem (6) od przeciwnej strony przecinanego obiektu w miejscu jego cięcia (7).



Rys. 2.19. Urządzenie do cięcia laserowego.

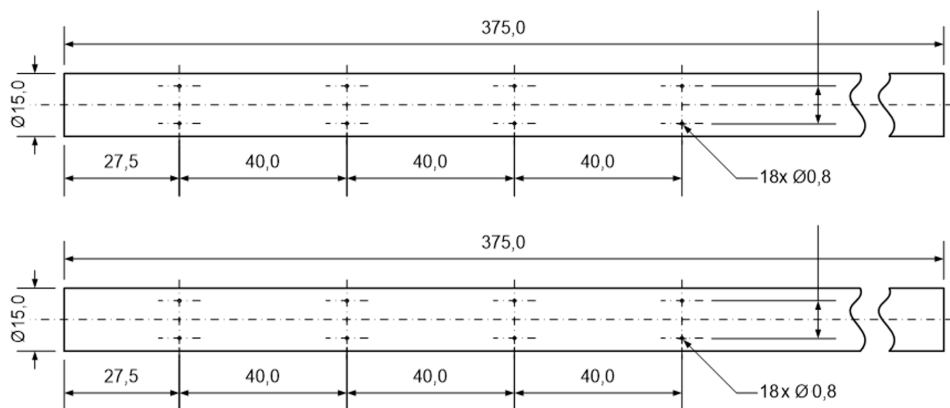
Źródło: (Chlebus, Krot, Kuliberda i Antończak, 2014)

Ideę powyższego patentu zastosowano praktycznie na stanowisku badawczym. Dodatkowy nadmuch niepalnym gazem zrealizowano, budując odpowiednią instalację z rur miedzianych o średnicy zewnętrznej 15 mm, których ścianki miały grubość 1 mm. Odcinki rur połączono za pomocą kształtek, a miejsca połączeń zalutowano, uzyskując w ten sposób odpowiednią szczelność (rys. 2.20).



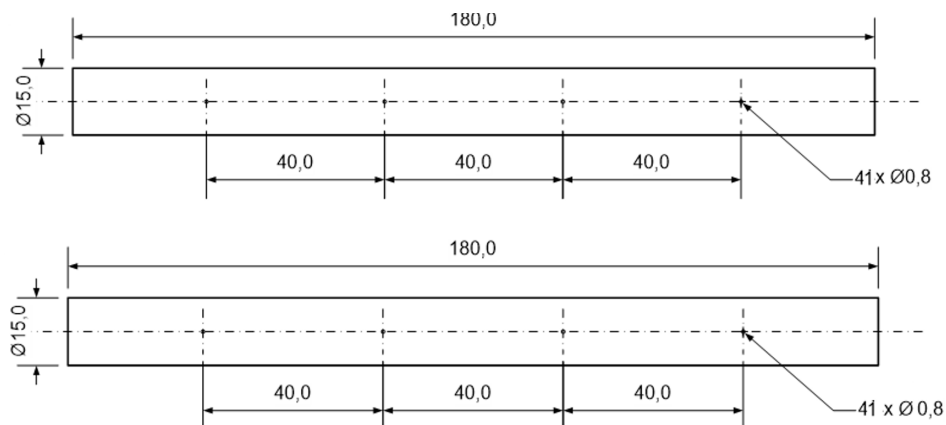
Rys. 2.20. Stół grzebieniowy z instalacją nadmuchu gazem

W centralnej części instalacji, w dwóch rurach, wykonano po 18 otworów o średnicy 0,8 mm, w odległościach do 40 mm, symetrycznie względem płaszczyzny przechodzącej przez środek rur w rozstawie 90° (rys. 2.21).



Rys. 2.21. Instalacja nadmuchu gazem – otwory w rurach środkowych

W rurach, na obwodzie, wykonano w sumie 41 otworów o średnicy 0,8 mm w górnej części instalacji (rys. 2.22). Podczas procesu przecinania laserowego podawany był niepalny gaz, w celu utworzenia pod przecinanym kompozytem „poduszki gazowej”, minimalizującej możliwość zapłonu piany PUR.

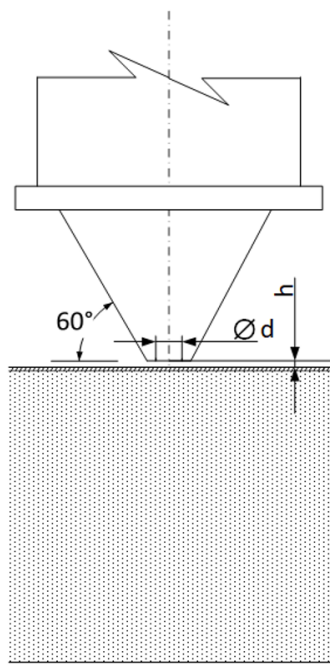


Rys. 2.22. Instalacja nadmuchu gazem – otwory w rurach na obwodzie

Powyższe rozwiązania (system odciągu i filtracji oraz nadmuch niepalnym gazem) zapewniły możliwość bezpiecznego kontynuowania prac badawczych oraz dobór parametrów przecinania laserowego kompozytów warstwowych. Przeprowadzono próby z wykorzystaniem różnych zestawień parametrów przecinania. Istotne było zastosowanie niepalnego gazu nie tylko jako gazu procesowego do wydmuchania materiału podczas cięcia, ale również jako gazu osłonowego, stanowiącego ochronę przed zapłonem pianki poliuretanowej. Zastosowano azot techniczny o czystości 99,99%, klasy 4.0. Ciśnienie azotu wynosiło 5 barów.

Do testów użyta została płyta kompozytowa wycięta mechanicznie z bocznej ścianki chłodziarki o wymiarach 435x415 mm. Grubość płyty, ze względu na liczne występy i żebra po wewnętrznej stronie chłodziarki, zmieniała się w przedziale 40–60 mm. Wydajność procesu przecinania istotnie zależy od prędkości posuwu głowicy lasera. W celu porównania uzyskanych wyników testy przeprowadzono przy zmiennej mocy lasera, ale przy stałych wartościach poniższych parametrów przycinania (rys. 2.23):

- prędkości posuwu, V_f : 1 m/min;
- ciśnienia gazu roboczego (azotu, P): 15 bar;
- średnicy wylotowej dyszy, $\varnothing d$: 1,5 mm;
- odległości wylotu dyszy od materiału, h : 0,5 mm;
- wydajności odciągu gazów, q : 800 m³/h (45%).



Rys. 2.23. Parametry geometryczne w procesie przecinania laserowego

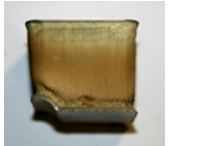
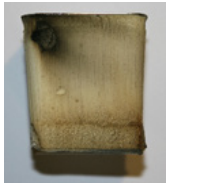
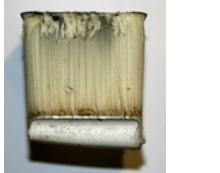
Efekty laserowego przecinania kompozytów warstwowych powierzchni bocznych (cięcia) wyciętych próbek przedstawiono w tabeli 2.8.

Na ściankach bocznych próbek P1, P2, P4, P4, P6, P7 nie stwierdzono śladów znaczących nadpaleń i zwęgleń. Próbki wycięte przy największych z zastosowanych wartościach mocy lasera, tj. 1,6 i 1,8 kW, charakteryzowała najlepsza jakość przeciętej powierzchni, bez śladów miejscowych zwęgleń. Podobnie kształt powierzchni bocznych tych próbek był regularny i podobny w każdym przypadku.

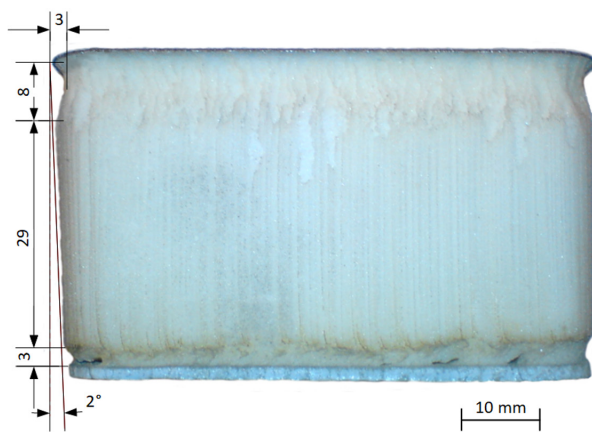
W celach porównawczych próbka P5 została wycięta bez gazu osłonowego, którego brak spowodował częściowe zwęglenie powierzchni bocznej. Pojawił się płomień pod powierzchnią płyty oraz nastąpiło miejscowe nadtopienie wewnętrznej warstwy pianki PUR. Pozostałe próby jednoznacznie wykazały, że dodatkowy nadmuch gazu osłonowego pod powierzchnią płyty rozwiązuje problem zapłonu płyty i znacznie poprawia jakość przecinania laserowego.

Na próbkach P2, P3, P4 i P6 można zauważyć ślady lokalnego stopienia na powierzchni bocznej warstwy pianki poliuretanowej. Nie oznacza to jednak złej jakości efektów przecinania, ale skutek pojawienia się płomienia pod powierzchnią płyty podczas wycinania próbki P5, bez gazu osłonowego.

Tabela 2.8. Próbkki kompozytu warstwowego wycięte laserowo

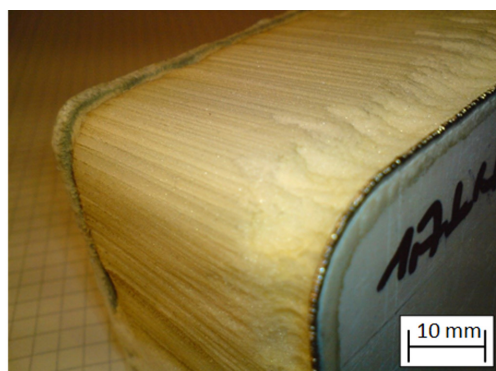
Nr próbki	Boczne powierzchnie próbek [mm]		Moc lasera [kW]	Grubość próbki [mm]
	85	60		
P1			0,8	47,5
P2			1,2	49,4
P3			1,3	63,4
P4			1,5	61,7
P5			1,5	50,6
P6			1,6	50,4
P7			1,8	49,3

Wstępnie poddano analizie geometrię ścianek bocznych kompozytu warstwowego po przecinaniu laserowym (rys. 2.24). Charakterystyczne jest, że po przecięciu górnej warstwy kompozytu (blachy stalowej) strumień gorących gazów i pyłu wypala/wyrywa w piance PUR lej o głębokości ok. 8 mm i średnicy ok. 6 mm w najszerszym miejscu. W ścianach bocznych pianki PUR w tym obszarze widoczne są szerokie na ok. 1,5 mm podłużne żłobienia o głębokości ok. 0,5 mm, ułożone zgodnie z kierunkiem przepływu gazów i pyłów.



Rys. 2.24. Geometria ścian bocznych kompozytu warstwowego po przecinaniu laserowym

W kolejnym obszarze, o zakresie ok. 29 mm wprawdzie nadal widoczne są podłużne żłobienia, mają one jednak regularny kształt równoległych rowków o głębokości ok. 0,5 mm (rys. 2.25).



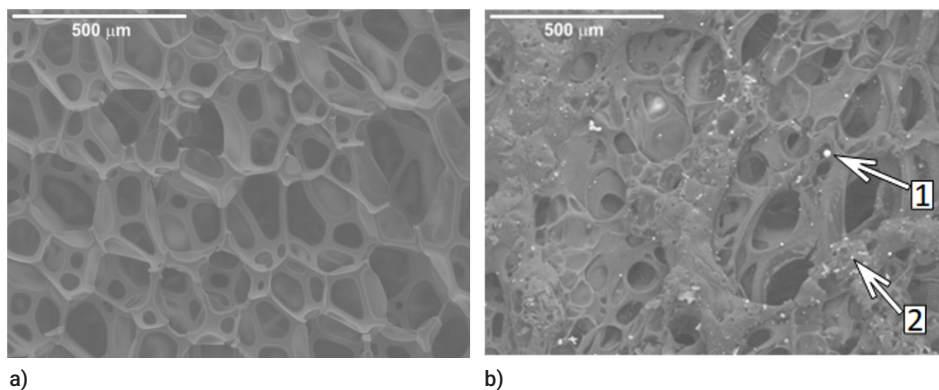
Rys. 2.25. Rowki na ścianie bocznej kompozytu warstwowego po przecinaniu laserowym

W środkowym obszarze (rys. 2.24) ścianki boczne wycięte są pod kątem ok. 2° względem pionowej osi wiązki laserowej padającej prostopadłe do przecinanej płyty kompozytowej. Zbieżność wartości kąta nachylenia ścian bocznych próbki spowodowana jest stożkowym kształtem strumienia pyłu i gazów po przecięciu blachy stalowej.

W dolnej części próbki powstaje kolejny obszar z ubytkiem pianki PUR. Kształtem przypomina lej w górnej części próbki, lecz ma mniejsze wymiary: wysokość ok. 3 mm, głębokość ok. 1 mm. Ubytek ten spowodowany jest wypaleniem pianki PUR przez strumień gazów i pyłów odbity od kolejnej warstwy kompozytu – polistyrenu. Warstwa ta jest całkowicie przecięta, jednak boczna krawędź ma nieregularny kształt – występy oraz zagłębienia na ok. 0,5 mm.

Po usunięciu z obudowy chłodziarki warstwy tworzywa sztucznego przeprowadzono kontrolną próbę przecinania za pomocą lasera CO_2 otrzymanego dwuwarstwowego kompozytu wielomateriałowego, tj. złożonego z blachy stalowej i pianki PUR. Moc lasera wynosiła 1,5 kW, a jako gaz pomocniczy zastosowano azot techniczny o czystości 99,99%, klasy 4.0, o ciśnienie 5 barów.

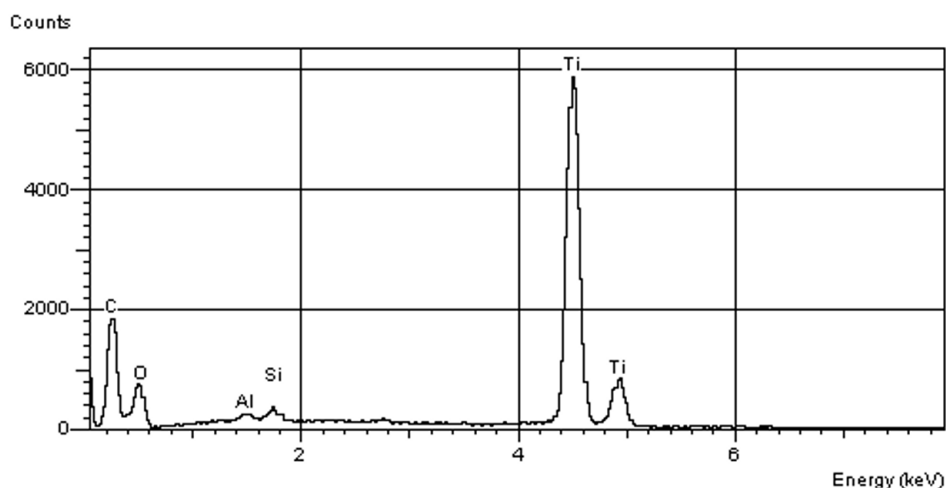
Analizując efekty, stwierdzono, że na powierzchni pianki (rys. 2.26) pozostają stałe cząstki związków metali i niemetałów w postaci tlenków i węglików, siarczków oraz tlenków krzemu.



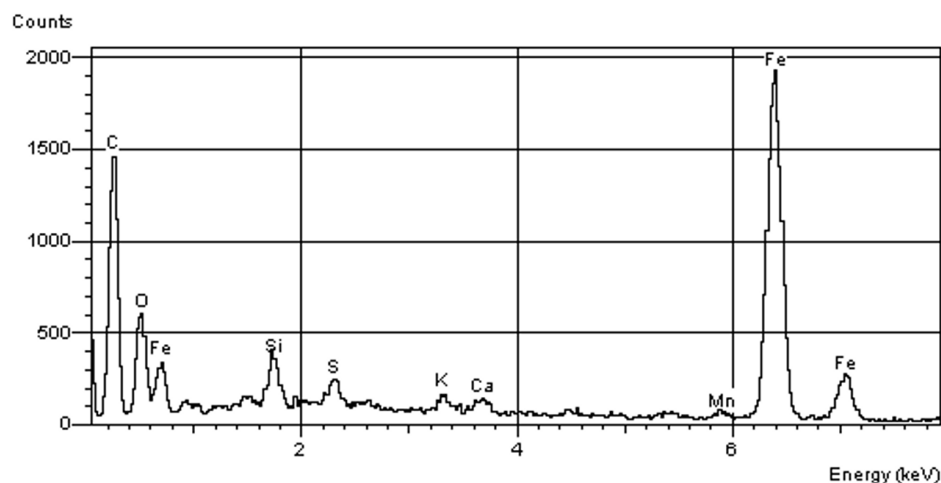
Rys. 2.26. Powierzchnia pianki PUR po przecinaniu mechanicznym (a) i laserowym (b), SEM. Źródło: (Krot, Chlebus i Kuźnicka, 2017)

Próbki przebadano z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronicznej (SEM) z analizą widma energetycznego promieniowania rentgenowskiego (ang. *energy dispersive spectrometry* – EDS). Na podstawie widm EDS (rys.

2.27 i 2.28) cząstek wskazanych na rys. 2.26b strzałkami 1 i 2 można sądzić, że pierwiastki: tytan (Ti), Al, krzem (Si), siarka (S) mogą pochodzić ze środków powierzchniowo czynnych, które w procesie otrzymywania pianek PUR są dodawane jako regulatory wielkości i równomierności tworzonych pęcherzyków; żelazo i siarka (w postaci FeS) mogą pochodzić z blachy stalowej, przecinanej razem z pianką.



Rys. 2.27. Widmo EDS obszaru wskazanego na rys. 2.26b strzałką 1. Źródło: (Krot, Chlebus i Kuźnicka, 2017)



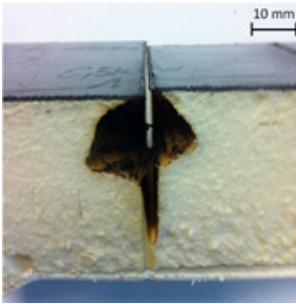
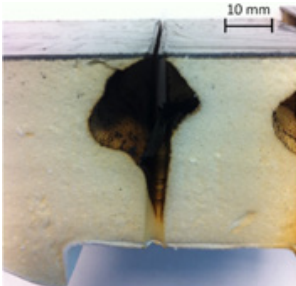
Rys. 2.28. Widmo EDS obszaru wskazanego na rys. 2.26b strzałką 2. Źródło: (Krot, Chlebus i Kuźnicka, 2017)

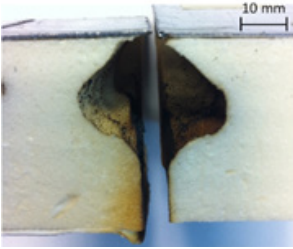
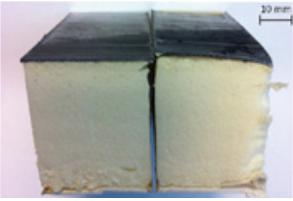
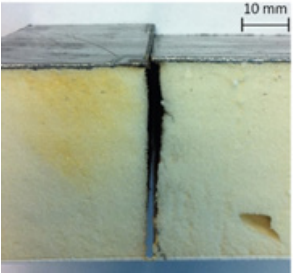
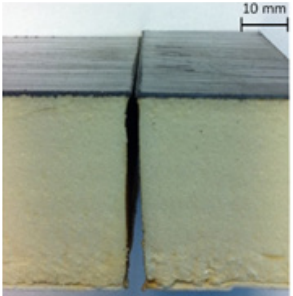
Wyniki badań opisano szczegółowo w publikacji (Krot, Chlebus i Kuźnicka, 2017).

Kolejne prace badawcze prowadzono w celu doboru gazów procesowych (asystujących). Instalacja gazowa była wspólna i doprowadzała gaz zarówno do laserowej głowicy procesowej, jak i do instalacji utrzymującej niepalną atmosferę pod przecinanym kompozytem. W testach wykorzystano następujące gazy asystujące: azot (N), hel (He), argon (Ar), mieszanekę azotu i argonu w stosunku 50:50. Wymienione gazy stosowano do przecinania prostokątnej próbki o wymiarach 80 x 220 mm i grubości 40 mm. Próbkę wycięto mechanicznie z obudowy chłodziarki.

Wyniki testów przecinania z zastosowaniem różnych gazów procesowych zestawiono w tabeli 2.9. Próby przeprowadzono laserem ROFIN SINAR DC020 CO₂ o mocy maksymalnej 2,0 kW, prędkości przecinania 1 m/s, przy ciśnieniu gazu asystującego wynoszącym 15 barów.

Tabela 2.9. Testy przecinania kompozytów warstwowych z zastosowaniem różnych gazów asystujących

Gaz asystujący	Moc lasera [kW]	Efekty procesu przecinania	Uwagi
Hel	0,5		• brak pełnego przecięcia kompozytu, • krater w pianie PUR, poniżej blachy stalowej
Hel	0,75		• brak pełnego przecięcia kompozytu, • krater w pianie PUR, poniżej blachy stalowej

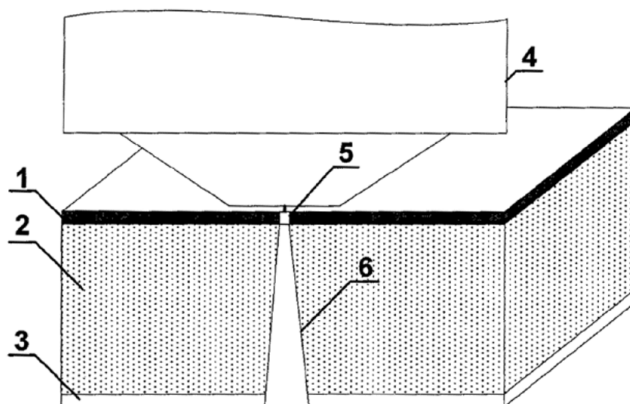
Hel	1		• pełne przecięcie kompozytu, • szeroki krater w pianie PUR, o średnicy ok. 25 mm
Azot/argon 50%/50%	0,5		• pełne przecięcie kompozytu, • wąska szczelina
Argon	0,5		• pełne przecięcie kompozytu, • wąska szczelina, • znaczne zadymienie podczas procesu
Azot	0,5		• pełne przecięcie kompozytu, • wąska szczelina, • znaczne zadymienie podczas procesu

Z przeprowadzonych testów można wnioskować o wpływie gazów asystujących na proces przecinania oraz jakość uzyskanych efektów. Zaobserwowano niewielką przydatność helu: otrzymana powierzchnia była złej jakości, z kraterami o znacznych rozmiarach. W celu całkowitego przecięcia kompozytu konieczne było stosowanie promieniowania laserowego o dużej mocy. Zaobserwowano, że podczas stosowania helu powstawało niewiele substancji lotnych, tj. dymu oraz pyłów. W przypadku mieszanki czystego azotu i czystego argonu w stosunku 50:50 powierzchnia próbek po przecinaniu była podobnie dobrej jakości, bez krateru obserwowanego po zastosowaniu helu. Przecięcie

próbki na wskroś otrzymano już wtedy, gdy moc lasera wynosiła 0,5 kW. Sam proces przecinania przebiegał jednak w inny sposób, zauważono inny proces spalania materiału, w wyniku którego powstawało więcej dymu oraz pyłów.

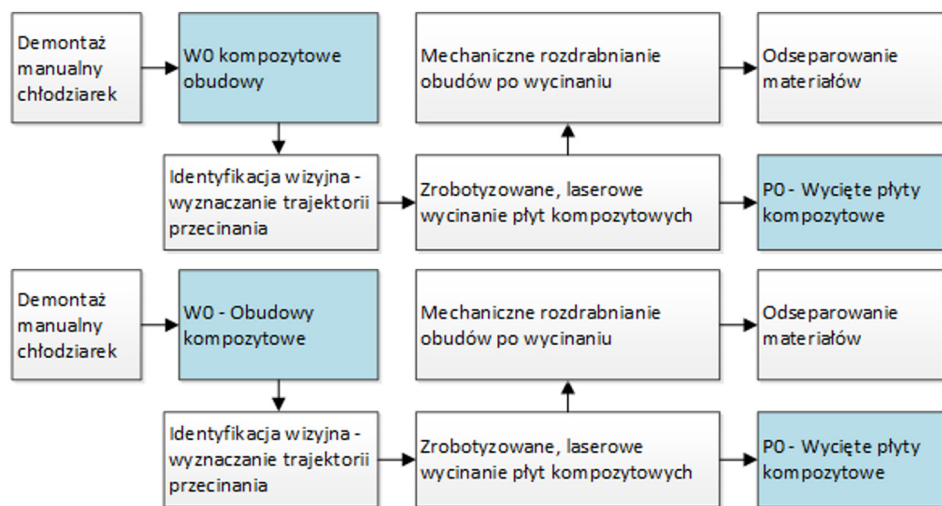
Z uwagi na różne ceny gazów (cena helu jest ok. 10 razy wyższa od ceny azotu, argon natomiast jest 3 razy droższy od azotu) oraz podobne efekty przecinania uzyskane po zastosowaniu azotu, argonu oraz mieszanki azot-argon można przyjąć, że najkorzystniejsze w procesach przecinania laserowego kompozytów warstwowych z obudów izolacyjnych chłodziarek jest stosowanie azotu jako gazu wspomagającego proces przecinania i równocześnie wytwarzającego niepalną atmosferę w strefie przecinania pod kompozytem.

Metoda przecinania kompozytów warstwowych nazwana *Sposób przecinania kompozytów warstwowych* i zgłoszona do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej została objęta ochroną patentową – patent nr PL 218123 (Chlebus, Krot, Kuliberda i Antończak, 2014). Polega ona (rys. 2.29) na tym, że wzdłuż linii cięcia kompozytu warstwowego topi się i/lub odparowuje górną warstwę metaliczną (1). Jednocześnie stopiony metal ze strefy przecinania metalu (5) kompozytu warstwowego wydmuchuje się dodatkowym strumieniem gazu procesowego z obszaru przecinania w kierunku kolejnych warstw kompozytu, tj. warstwy środkowej warstwy pianki poliuretanowej (2) i dolnej warstwy tworzywa sztucznego (3), które przecina się stopionym metalem i/lub jego parami. Efektem jest powstanie szczeliny (6) wzdłuż linii cięcia. Ponadto wzdłuż linii cięcia, ale przy spodniej warstwie tworzywa sztucznego z gazu niepalnego wytwarza się rodzaj poduszki.



Rys. 2.29. Sposób przecinania kompozytów warstwowych. Źródło: (Chlebus, Krot, Kuliberda i Antończak, 2014)

Bazując na wynikach prób i testów przeprowadzonych na stanowisku laboratoryjnym do badań laserowego przecinania kompozytów, opracowano projekty wstępne istotnych stanowisk linii technologicznej do recyklingu sprzętu chłodniczego. Główne elementy linii do recyklingu z uwzględnieniem obudów kompozytowych (W0) oraz produktów recyklingu, tj. płyt kompozytowych (P0), przedstawiono na rys. 2.30.



Rys. 2.50. Proces recyklingu obudów kompozytowych (W0) do etapu produktu (P0)

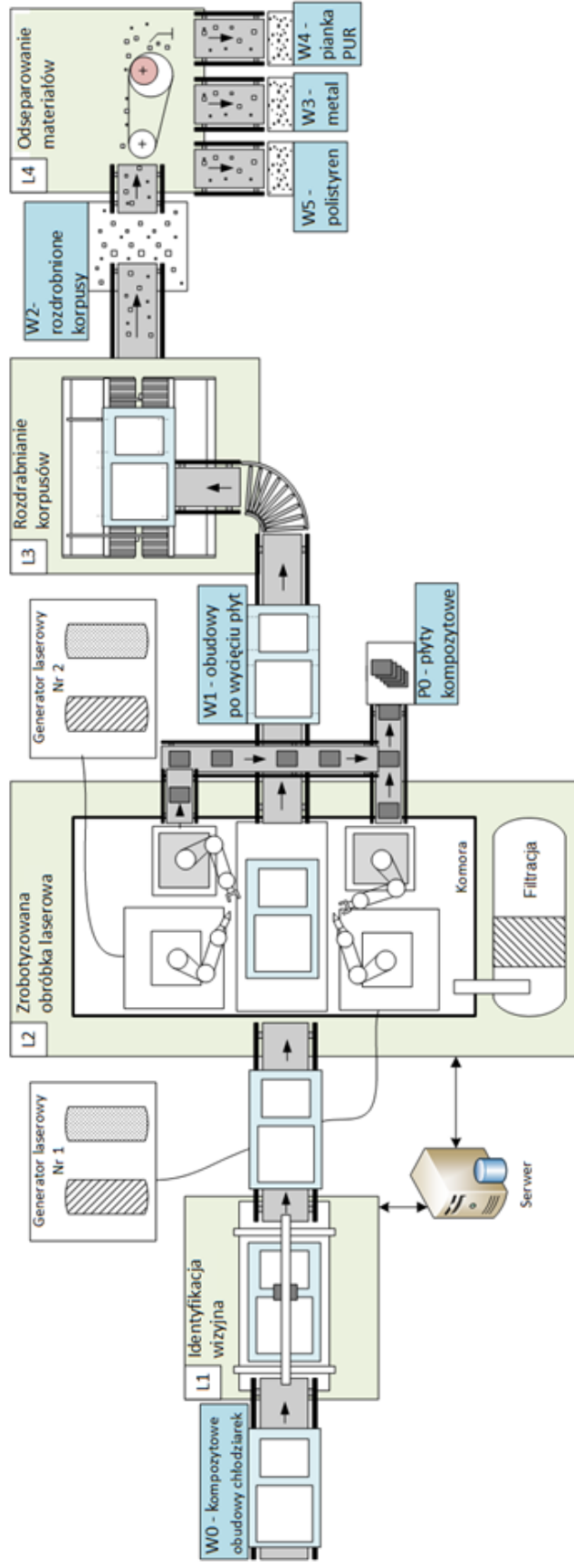
Mając na uwadze wykorzystanie technologii laserowego przecinania kompozytów warstwowych, za najistotniejsze uznano stanowisko obróbki laserowej (rys. 2.50). Opracowano projekt koncepcyjny linii technologicznej z uwzględnieniem materiałów wejściowych, procesów oraz produktów po każdym etapie, jak również procesów transportu międzyoperacyjnego (rys. 2.51). Początkowy etap recyklingu wymaga zastosowania znanych metod wstępnego demontażu manualnego, tj. procesów manualnych polegających na usunięciu półek, szuflad, odcięciu przewodów elektrycznych, opróżnieniu układu z czynnika, usunięciu agregatu i skraplacza.

Kolejne etapy, w klasycznym podejściu, przewidywały mechaniczne rozdrabnianie obudów i separację materiałów po rozdrabnianiu. W koncepcji przedstawionej na rys. 2.51 obudowy chłodziarek stanowią materiał wsadowy na kolejnych etapach, tj. na etapie:

- identyfikacji wizyjnej (L1), której efektem jest wygenerowana trajektoria możliwych do wycięcia płyt kompozytowych z bocznych ścian obudowy;
- laserowego wycinania płyt kompozytowych (L2);
- rozdrabniania mechanicznego obudowy po wycięciu płyt;
- odseparowania materiałów po rozdrabnianiu.

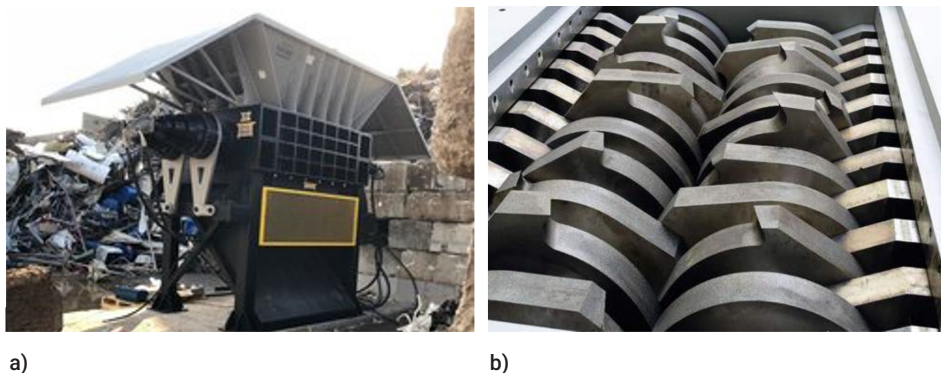
Istotne aspekty etapu identyfikacji wizyjnej (L1) opisano w publikacjach (Chlebus, Jodkowski, Krot, Kuliberda i Musiał, 2012; Chlebus, Krot, Kuliberda i Jodkowski, 2012).

W wyniku zaproponowanej metody recyklingu otrzymywane są płyty o strukturze warstwowego kompozytu wielomateriałowego (P0). W przypadku zapotrzebowania na takie płyty konfiguracja linii technologicznej może zostać zakończona na tym etapie, tj. z uwzględnieniem wytwarzania produktu (P0) i przetwarzania pozostałości korpusów po obróbce laserowej. Rozdrabnianie korpusów (stanowisko L3) oraz odseparowanie poszczególnych materiałów z rozdrobnionych korpusów (stanowisko L4) realizowane jest z zastosowywaniem znanych powszechnie technologii rozdrabniania i separacji materiałów. Procesy te prowadzą do otrzymania kawałków metalu (W3), rozdrobnionego polistyrenu (W4) oraz drobin pianki PUR (W5). Dodatkowe separatory pozwalają na kolejny stopień oddzielenia materiałów metalicznych i wyodrębnienie ferromagnetyków od metali nieżelaznych. Doświadczenia laboratoryjne wykorzystano do zaprojektowania stanowiska wycinania laserowego na potrzeby linii technologicznej. Prowadzenie tego procesu na skalę przemysłową byłoby praktycznie niemożliwe przy zastosowaniu lasera CO₂. Powodem byłby głównie sztywny tor prowadzenia wiązki laserowej, umożliwiający zmianę parametrów geometrycznych procesu jedynie wzdłuż ortogonalnych osi w trójwymiarowej przestrzeni X, Y, Z. Planując proces, uwzględniono swobodę w programowaniu trajektorii pracy głowicy laserowej, jaką oferują roboty przemysłowe o sześciu sterowanych osiach. Ze względu na możliwość prowadzenia wiązki laserowej elastycznym światłowodem zdecydowano o zastosowaniu laserów na ciele stałym: Nd:YAG. Przewidziano dwa roboty z laserowymi głowicami procesowymi do wycinania elementów z obudów oraz dwa roboty asystujące do odstawy wyciętych płyt kompozytowych na przenośnik taśmowy. Rozdrabnianie korpusów pozostałych po laserowym wycinaniu płyt realizowane jest z wykorzystaniem znanych technologii rozdrabniania mechanicznego, np. z wykorzystaniem dwuwiałowej strzępiarki Forrec typu FX-5000 firmy Bronneberg (rys. 2.52).

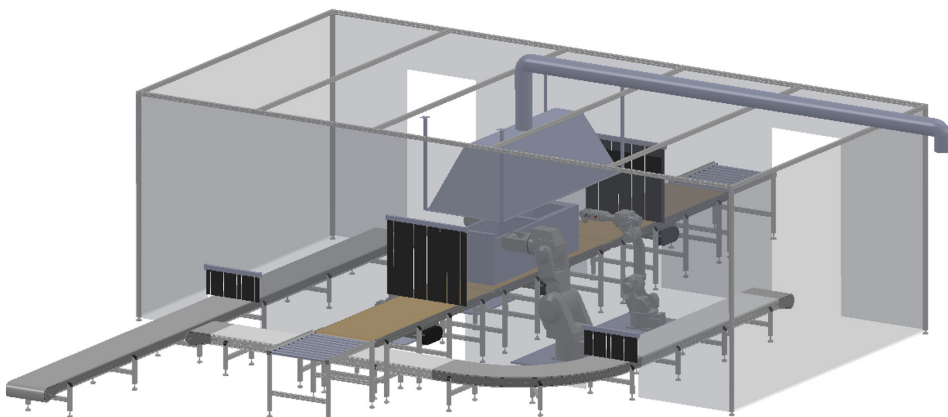


Rys. 2.51. Projekt wstępny stanowisk linii do recyklingu kompozytowych obudów sprzętu chłodniczego

Na rynku znane są również urządzenia umożliwiające odseparowanie materiałów po procesach rozdrabniania mechanicznego. W ramach rozbudowy projektu stanowiska zrobotyzowanego wycinania laserowego płyt kompozytowych z obudów chłodziarek opracowano model geometryczny urządzenia w środowisku CAD 3D CATIA V5 R19 (rys. 2.53–2.55).



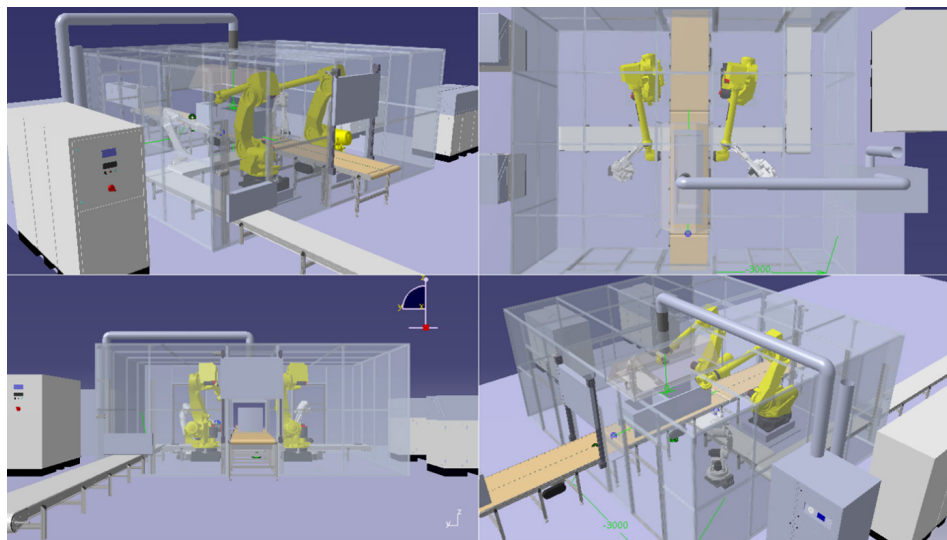
Rys. 2.52. Dwuwałowa strzępiarka firmy Bronneberg: a) widok ogólny, b) widok na wały robocze. Źródło: (Bronneberg, 2024)



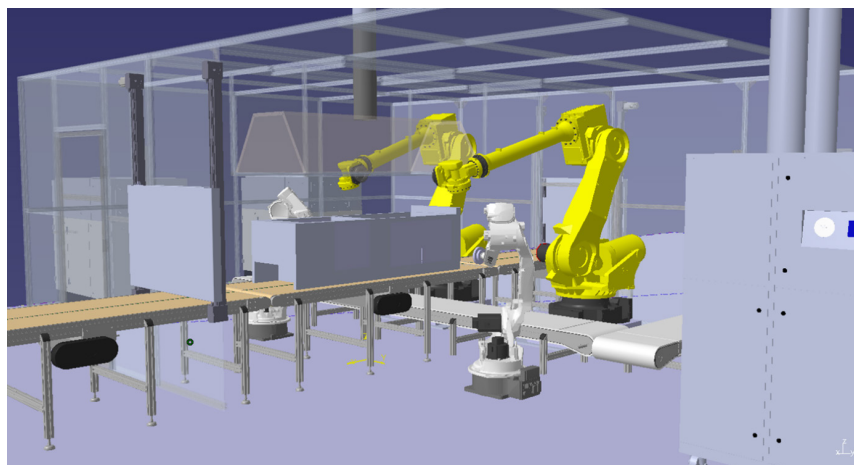
Rys. 2.53. Model CAD 3D stanowiska zrobotyzowanego laserowego wycinania

Model geometryczny wykorzystano do opracowania wirtualnego modelu stanowiska pracy w systemie do projektowania i walidacji procesów – Delmia (moduł Process Detailing & Validation). Do procesów wycinania laserowego dobrano sześćoosiowego robota przemysłowego Kawasaki FS 20C o zasięgu 1303 mm i udźwigu 20 kg. Oprócz modelu geometrycznego stanowiska i osadzenia w nich modeli CAD 3D robotów (rys. 2.54 i 2.55) zaprogramowa-

no pracę robotów, sterowniki przenośników taśmowych oraz automatycznych drzwi uszczelniających komorę roboczą.



Rys. 2.54. Model CAD 3D stanowiska zrobotyzowanego laserowego wycinania



Rys. 2.55. Model CAD 3D stanowiska zrobotyzowanego laserowego wycinania
– wewnątrz komory roboczej

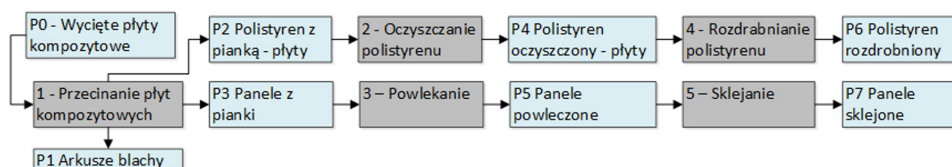
Odbiór wyciętych płyt kompozytowych zrealizowano z zastosowaniem sześćoosiowego robota przemysłowego Motoman HP6 o zasięgu 1378 mm i udźwigu 6 kg. Z uwagi na symetrię obudów chłodziarek oraz wycinanie

kształtów po ich dwóch stronach zaproponowano dwa zestawy robotów: robot procesowy Kawasaki i robot transportowy Motoman.

2.6. Recykling płyt kompozytowych

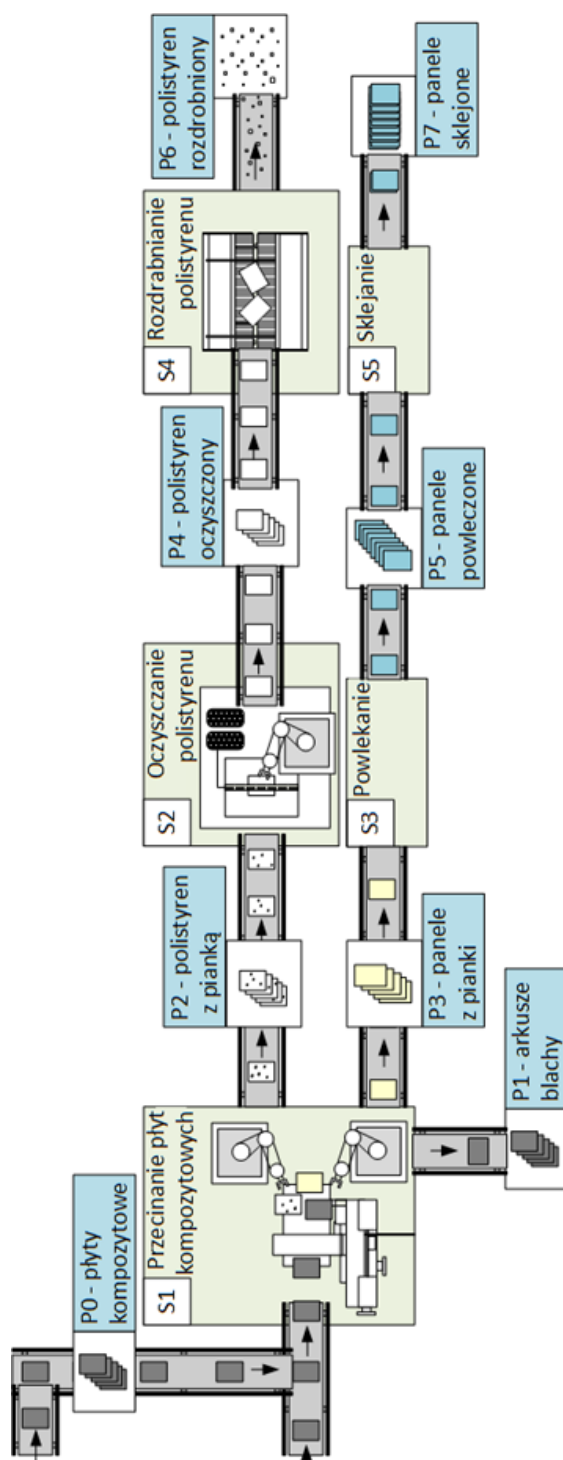
Przedstawioną powyżej technologię laserowego przecinania kompozytów warstwowych można wykorzystać do wycinania powtarzalnych geometrycznie płyt kompozytowych. Powierzchnia tych płyt od strony tworzywa termoplastycznego jest nieregularna, co spowodowane jest budową wewnętrzną chłodziarek: wnękami bądź wypustkami do osadzania półek i szuflad.

Opracowane warianty linii technologicznej do recyklingu sprzętu chłodniczego umożliwiają dostosowanie projektu docelowego do wymagań klienta. Proces recyklingu może zostać zakończony na etapie wycinania płyt kompozytowych. Otwarta struktura ścian bocznych z pianką PUR takich płyt może jednak okazać się niekorzystna w przyszłych zastosowaniach. Z uwagi na to zaproponowano oddzielanie trzech materiałów tworzących warstwy kompozytu i zaprojektowano wariant linii pozwalającej na przetwarzania płyt kompozytowych etapami (rys. 2.56).



Rys. 2.56. Etapy recyklingu płyt kompozytowych (P0)

Podobnie jak w przypadku stanowiska przecinania laserowego na podstawie schematu blokowego etapów recyklingu płyt kompozytowych opracowano projekt koncepcyjny (rys. 2.57). Przedstawiony sposób przetwarzania miał umożliwić odseparowanie poszczególnych materiałów składających się na strukturę kompozytu, jednak nie poprzez mechaniczne rozdrobnienie. Zaproponowano urządzenie do mechanicznego przecinania płyt (P0) w płaszczynach warstw kompozytu i oddzielania arkuszy blachy (P1), arkuszy polistyrenu (P2) oraz paneli z pianki PUR (P3). Obok pojedynczych stanowisk zaprojektowano system automatycznego transportu międzyoperacyjnego (Musiś, Chlebus, Krot i Chrapek, 2012).



Rys. 2.57. Projekt koncepcyjny stanowisk recyklingu płyt kompozytowych z obudów chłodziarek

Technologia mechanicznego przecinania materiałów w celu otrzymania warstw o określonej grubości jest znana i można ją realizować na wiele sposobów, m.in. dostosowując do procesu maszyny przeznaczone do obróbki drewna np. urządzenia firmy Holzmann (rys. 2.58).



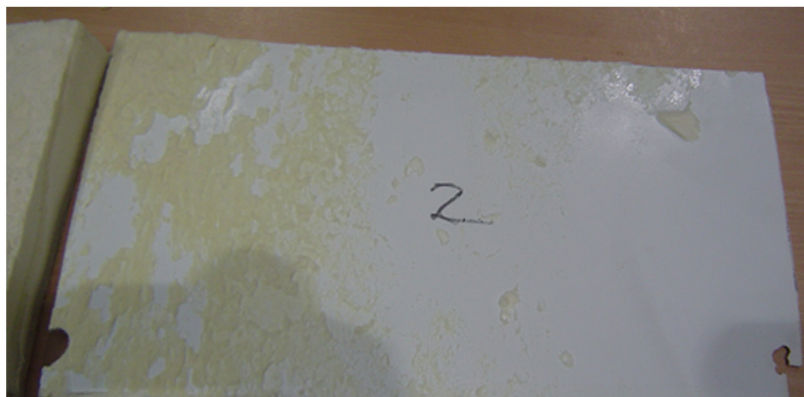
Rys. 2.58. Trak – piła taśmowa pozioma Holzmann BBS350.

Źródło: (Maszyny do obróbki drewna/Holzmann, 2025).

Powyższe rozwiązanie w docelowym projekcie linii technologicznej należałoby dostosować do wymagań w zakresie stopnia robotyzacji/automatyzacji procesu oraz specyfiki przecinanego materiału (pianki PUR). Wymagałoby to przeprowadzenia prób produkcyjnych, doboru odpowiednich narzędzi oraz ustalenie parametrów procesu.

Jeżeli firma zajmująca się recyklingiem uzna, że stan produktów: (P1), (P2) i (P3) jest zadowalający i mają one spodziewaną wartość rynkową konfiguracja linii może zostać zakończona. W tym wariantcie produktami końcowymi linii do recyklingu będą arkusze blachy zanieczyszczone polistyrenem (P1), polistyren zanieczyszczony pianką (P2), panele z pianki (P3). Arkusze blachy (P1) pokryte z zewnątrz powłoką antykorozyjną o funkcjach dekoracyjnych mogą być przekazywane do dalszych etapów przetwarzania jako złom stalowy. Jeżeli jednak (P2) i (P3), zdaniem osób planujących procesy recyklingu, nie miałyby spodziewanej wartości rynkowej, w dalszej części pracy opisano metody zwiększania tej wartości w kolejnych procesach przetwarzania.

W warunkach laboratoryjnych oddzielono mechanicznie materiały kompozytu warstwowego i zauważono znaczne pozostałości pianki PUR, trwale związanej z warstwą blachy oraz polistyrenu (rys. 2.59).



Rys. 2.59. Płyta polistyrenowa z pozostałościami pianki, odcięta od warstwy pianki PUR kompozytu warstwowego

Cena rynkowa zanieczyszczonych tworzyw sztucznych jest znacznie niższa od ceny tworzyw bez innych wtrąceń. Z uwagi na to firmy recyklingowe zainteresowane są otrzymywaniem materiałów o jak największym stopniu czystości. Prowadzono prace badawcze zmierzające do opracowania skutecznej technologii dalszego przetwarzania płyt polistyrenowych (P2) i usuwania z nich pozostałości pianki PUR. Zadowalające wyniki osiągnięto dzięki zastosowaniu wysokoenergetycznego strumienia cieczy. Badania prowadzono na stanowisku wyposażonym w urządzenie D 26/250 TS T firmy Kränzle, które umożliwia osiągnięcie ciśnienia roboczego o wartości 250 barów i wydajności 1560 l/h (rys. 3.60 i 3.61).

Ciśnienie cieczy procesowej (wody) kierowane było przez instalację do czterech dysz natryskowych. Analizując dostępne rozwiązania techniczne w zakresie dysz, dobrano dyszę rotacyjną jako najbardziej efektywną. Działanie takiej dyszy polega na wygenerowaniu punktowego strumienia o dużej sile skupionej na niewielkiej powierzchni. Dodatkowo ciśnienie cieczy przepływającej przez korpus dyszy wprawia w ruch rotor, który powoduje ruch okrężny strumienia wokół własnej osi. Takie rozwiązanie zapewnia skuteczność oddziaływania cieczy jaką ma ciecz w dyszach punktowych, ale zwiększa dynamikę procesu i poszerza obszar roboczy. Zaprojektowano więc układ hydrauliczny składający się z czterech dysz rotacyjnych, rozdzielacza mono-



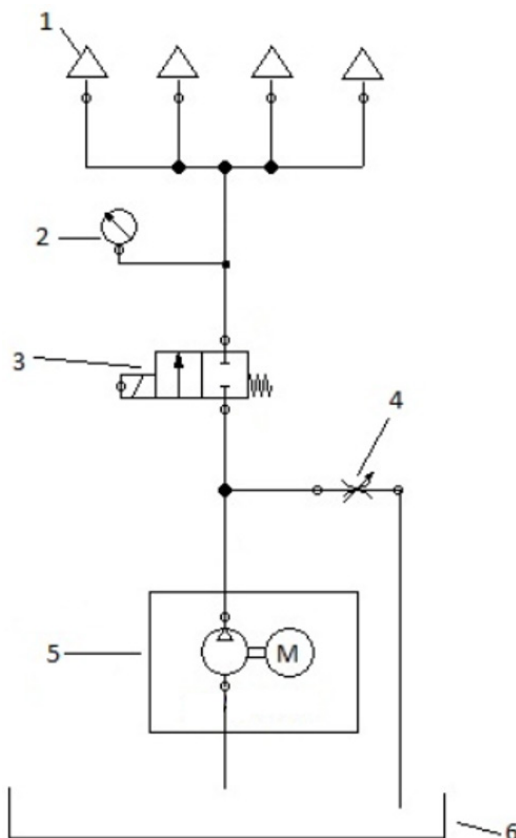
Rys. 3.60. Stanowisko badawcze do prób oczyszczania polistyrenu z pozostałości pianki



Rys. 3.61. Stanowisko badawcze do prób oczyszczania, wyposażone w urządzenie firmy Kränzle

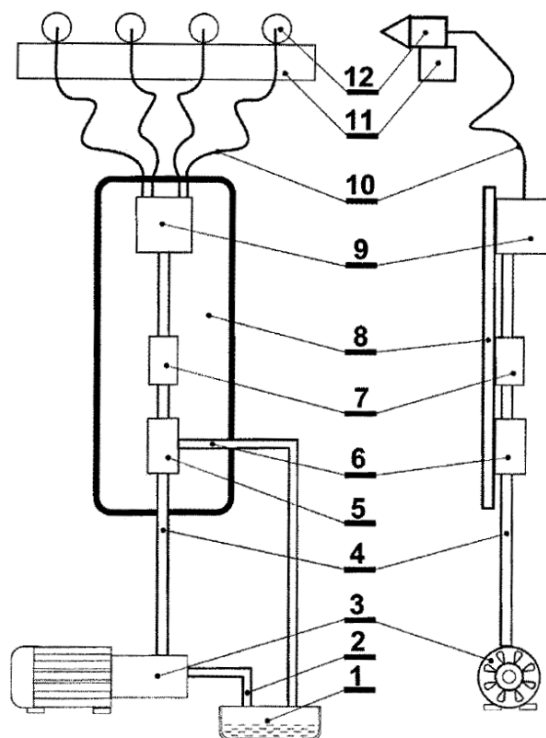
stabilnego sterowanego cewką z możliwością ręcznego przesterowania, zaworu regulującego natężenie przepływu oraz manometru do pomiaru ciśnienia w układzie (rys. 2.62).

Urządzenie do oczyszczania powierzchni, w szczególności powierzchni tworzywa sztucznego zgłoszono do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej. Postępowanie zakończyło się przyznaniem patentu nr PL214786 (Krot, Chlebus, Chrapek i Jodkowski, 2013). Opatentowane urządzenie (rys. 2.63) składa się z liniowej głowicy czyszcząco-myjącą w postaci belki (11), w której zamocowana jest co najmniej jedna dysza (12) rozpylająca ciecz pod wysokim ciśnieniem, skierowana wylotem w kierunku czyszczonej powierzchni. Dysze połączone są elastycznymi przewodami (10) przez rozdzielacz (9) strumienia cieczy, zawór (7), trójnik z zaworem dławiącym (5) i przewód łączący pompę (3) z układem czyszczącym (4). Zadaniem pompy jest podawanie do układu cieczy pod wysokim ciśnieniem.



Rys. 2.62. Schemat układu hydraulicznego do oczyszczania polistyrenu:

- 1 – dysze rotacyjne, 2 – manometr ciśnieniowy, 3 – rozdzielacz suwakowy,
4 – zawór dławiący, regulator przepływu, 5 – urządzenie wysokociśnieniowe,
6 – zbiornik

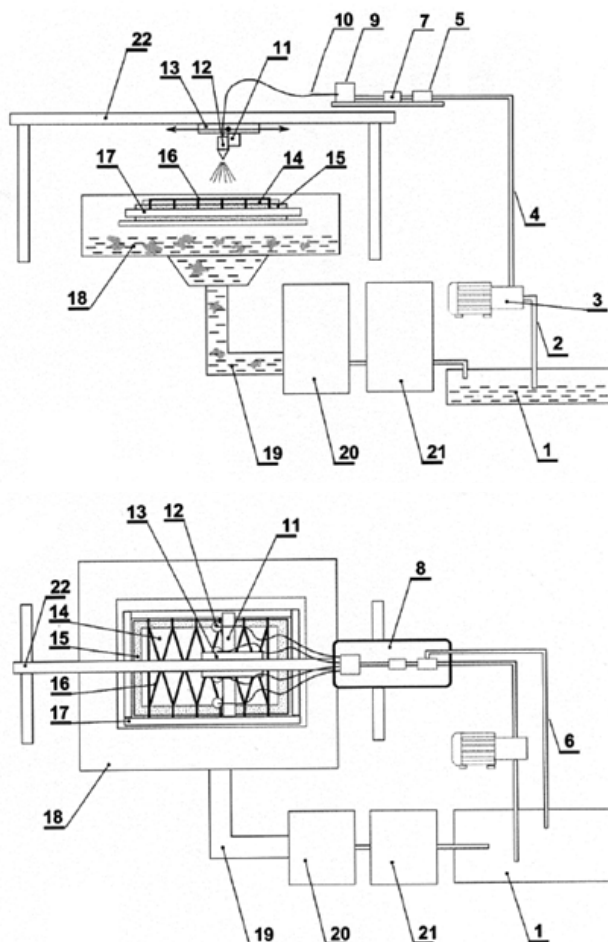


Rys. 2.63. Urządzenie do oczyszczania powierzchni, w szczególności powierzchni tworzywa sztucznego.

Źródło: (Krot, Chlebus, Chrapek i Jodkowski, 2013)

Trójnik z zaworem dławiącym (5) połączony jest przewodem odprowadzającym nadmiar cieczy (6) ze zbiornikiem cieczy (1). Ze zbiornikiem przewodem doprowadzenia cieczy (2) połączona jest również pompa (2). Opatentowane urządzenie charakteryzuje to, że:

- liniowa głowica czyszcząco-myjąca (11), rozdzielacz (9) strumienia cieczy, zawór (7) i zawór dławiący (5) zamocowane są na płycie montażowej (8);
- liniowa głowica czyszcząco-myjąca (11) zamocowana jest na manipulatorze;
- liniowa głowica czyszcząco-myjąca (11) zamocowana jest na sterowanym wysięgniku
- zawór (7) jest elektrozaworem;
- do zaworu dławiącego (5) podłączony jest dodatkowy przewód (6) usuwający nadmiar cieczy z układu;
- dysze (12) są dyszami rotacyjnymi.



Rys. 2.64. Układ do oczyszczania płyt polistyrenowych z zanieczyszczeń pianką PUR; 1 – zbiornik cieczy procesowej, 2 – przewód doprowadzający ciecz do pompy, 3 – pompa, 4 – przewód łączący pompę z układem do oczyszczania, 5 – zawór, 6 – przewód odprowadzający nadmiar cieczy do zbiornika, 7 – zawór dławiący, 8 – płyta montażowa, 9 – rozdzielacz, 10 – przewody elastyczne doprowadzające ciecz do dysz procesowych, 11 – belka poprzeczna, 12 – dysze procesowe, 13 – wózek napędu liniowego, 14 – oczyszczane tworzywo sztuczne, 15 – podłoże, 16 – siatka mocująca tworzywo, 17 – rama dociskowa, 18 – wanna procesowa, 19 – przewód odprowadzający zanieczyszczoną ciecz, 20 – urządzenie oczyszczające, 21 – urządzenie filtrujące, 22 – napęd liniowy.
Źródło: (Krot, Chlebus, Jodkowski i Chrapek, 2013)

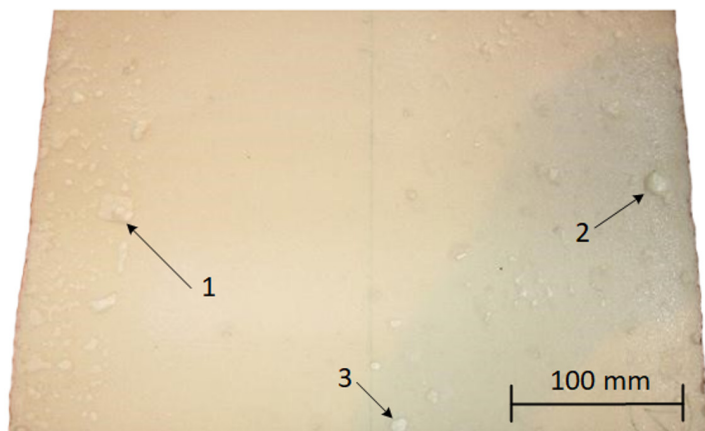
Efektem prac badawczych było również drugie zgłoszenie patentowe dotyczące sposobu wykorzystania powyższego urządzenia do oczyszczania powierzchni. Zaprojektowano układ techniczny urządzeń z systemem filtracji zanieczyszczeń oraz zamocowanym oczyszczanym arkuszem tworzywa sztucznego (rys. 2.64). Sposób oczyszczania powierzchni tworzywa sztucznego z pozostałości pianki poliuretanowej i układ do oczyszczania powierzchni tworzywa sztucznego z pozostałości pianki poliuretanowej zgłoszono do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej. Procedura zakończyła się przyznaniem patentu nr PL 214787 (Krot, Chlebus, Jodkowski i Chrapek, 2013).

Opatentowany sposób oczyszczania polega na tym, że arkusz zanieczyszczanego tworzywa sztucznego umieszcza się na podatnym, elastycznym podłożu i zabezpiecza siatką. Na oczyszczaną powierzchnię tworzywa kierowane są przez dysze procesowe strumienie cieczy pod wysokim ciśnieniem (rzędu 250 barów), które usuwają pozostałości pianki poliuretanowej. W celu automatyzacji procesu przewidziano osadzenie dysz procesowych na wózku napędu liniowego. Rozwiązanie takie umożliwia kontrolowanie czasu oddziaływania cieczy na powierzchnię oczyszczaną przez sterowanie prędkością przesuwu układu oczyszczającego względem oczyszczanej powierzchni.

W efekcie procesu oczyszczania możliwe jest odzyskanie polistyrenu w oczyszczonej postaci (rys. 2.57, oznaczenie P4). Jeżeli arkusze polistyrenu nie są pożądaną postacią handlową tego materiału, możliwe jest uzyskanie polistyrenu rozdrobnionego (P6) na stanowisku do rozdrabniania polistyrenu (S4).

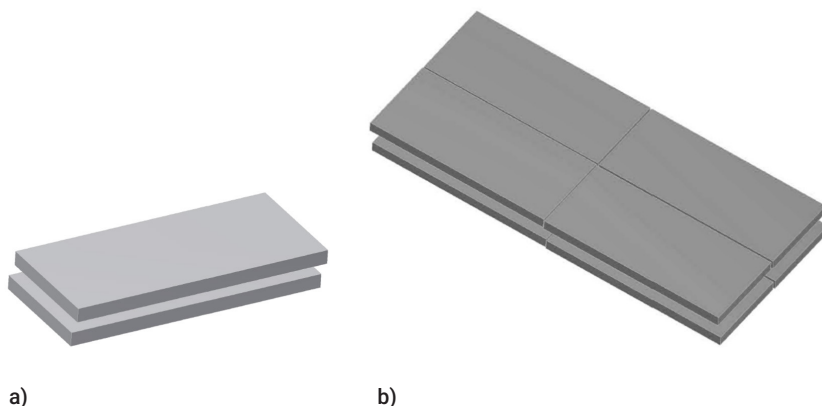
Przedstawiona na rys. 2.57 druga gałąź linii technologicznej przeznaczona jest do przeprowadzania procesu przetwarzania paneli z pianki PUR (P3). Mechaniczne przecinanie płyt kompozytowych (P0) powoduje otwarcie porów pianki poliuretanowej. Widoczne stają się ponadto dosyć duże obszary niewypełnione pianką w procesie wytwarzania kompozytowych obudów chłodziarek. Rysunek 2.65 przedstawia panel z pianki PUR o wymiarach 40x300x400 mm z zagłębieniami w strukturze pianki o średnicy 20–25 mm, powstałymi w wyniku niedoskonałego procesu spieniania. Takie panele nie mogą być wykorzystane do produkcji materiałów izolacyjnych. Odsłonięta struktura porów pianki jest wysoce higroskopijna, a przez to z upływem czasu pogorszeniu ulegają parametry izolacyjności termicznej. Z uwagi na to zaprojektowano kolejne etapy przetwarzania. Etap pierwszy polega na zabezpieczeniu paneli pianki PUR przed czynnikami zewnętrznymi na stanowisku (S3) do powlekania paneli. Powlekanie może być realizowane na drodze np. powlekania zanurzeniowego. Należy jednak kontrolować temperaturę kąpieli, pa-

miętając o odporności termicznej paneli z pianki PUR (temp. zapłonu wynosi 310 °C – por. tabela 2.5). Możliwe jest również stosowanie innych wariantów powlekania, np. obkurczanie folią polietylenową (PE).



Rys. 2.65. Panel pianki PUR wycięty z płyty kompozytowej;
1–3 – zagłębienia w strukturze pianki o średnicy 20–25 mm

Pojedyncze panele po procesie powlekania wodno- i paroszczelną powłoką (P5) stanowią jeden z wariantów produktu końcowego linii do recyklingu (rys. 2.57). W celu poprawy własności izolacyjnych paneli pojedyncze płyty sklejane są z przesunięciem umożliwiającym układanie płyt na zakładkę, co będzie sprzyjało eliminowaniu szczelin między płytami, tzw. mostków termicznych (rys. 2.66).



Rys. 2.66. Panele izolacyjne: a) moduł sklejony z dwóch pojedynczych płyt,
b) ułożona warstwa izolacyjna

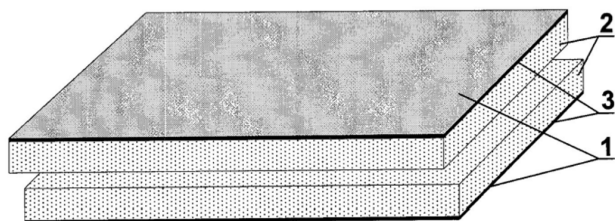
Otwarte pory paneli z pianki poliuretanowej wymagają zabezpieczenia przed oddziaływaniem czynników środowiskowych, np. wilgoci. W związku z tym przeprowadzono próby laboratoryjne z obkurczaniem termicznym folią polietylenową wstępnie sklejonych paneli (rys. 2.67).



Rys. 2.67. Obkurczanie folią polietylenową sklejonych paneli z pianki PUR

Wyniki prób nie były jednak zadowalające. Folia nie przylegała dokładnie do wklęsłych powierzchni. Zabezpieczała co prawda piankę PUR przed wnikaniem wilgoci, ale nie umożliwiała układania płyt z wykorzystaniem połączenia kształtowego. Lepsze zabezpieczenie paneli można osiągnąć przez malowanie natryskowe środkami tworzącymi nieprzepuszczalne powłoki jak folie winylowe. Izolacyjność termiczna paneli może ulec poprawie dzięki dodaniu warstw ekranujących promieniowanie ciepłe z takich materiałów jak folia aluminiowa (Krot, Jodkowski, Chlebus i Faliński, 2012).

Ten sposób wytwarzania paneli do izolacji termicznej w procesach recyklingu polegający na wycinaniu tych części obudów chłodziarek, które mają strukturę kompozytu warstwowego (rys. 2.68), zgłoszono do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej. Metoda została objęta patentem nr PL220490 (Chlebus, Krot i Kuliberda, 2015).



Rys. 2.68. Panele izolacyjne z recyklingu obudów chłodziarek.

Źródło: (Chlebus, Krot i Kuliberda, 2015)

Z wyciętej płyty kompozytowej usuwa się zewnętrzną warstwę metalową i wewnętrzną warstwę z tworzywa sztucznego. Otrzymane sztywne płyty z pianki PUR (2) o regularnym, prostokątnym kształcie skleja się warstwami z zachowaniem przesunięcia. Warstwy izolacji termicznej (2) skleja się jako co najmniej dwie warstwy, a na co najmniej jedną powierzchnię sklejonych warstw nakleja się kolejno warstwę kartonu (1) i dodatkowy izolator ekranujący promieniowanie cieplne (3).

2.7. Podsumowanie

Przedstawione wyniki prac badawczych umożliwiają modyfikacje klasycznego podejścia do recyklingu obudów urządzeń chłodniczych i osiągnięcie produktów recyklingu o większej wartości rynkowej. Udoskonalony recykling tego rodzaju produktów oraz ponowne użytkowanie ich fragmentów mogą być odpowiedzią na wytyczne dotyczące wycofania produktu z użytkowania, określone w FOE. Opisano model linii do recyklingu sprzętu chłodniczego z obróbką laserową obudów urządzeń chłodniczych. Przedstawiono wyniki badań z zakresu laserowego przecinania wielomateriałowych kompozytów warstwowych stosowanych w obudowach sprzętu chłodniczego. Implementujący tę technologię nowy sposób recyklingu płyt kompozytowych wyciętych laserowo z obudów sprzętu chłodniczego, charakteryzuje się ograniczeniem destrukcyjnego rozdrabniania struktur kompozytowych. Opisano opcjonalne konfigurowanie procesów recyklingu, a przez to otrzymywanie różnych produktów recyklingu. Przedstawione rozwiązania pozwalają na praktycznie wdrożenie w recyklingu koncepcji ponownego użytkowania fragmentów obudów wyciętych laserowo jako paneli do izolacji termicznej.

Zaprezentowane wyniki badań oraz patenty dowodzą słuszności hipotezy postawionej w rozdziale 2.2, że możliwe jest prowadzenie kontrolowanego procesu przecinania laserowego wielomateriałowych kompozytów warstwowych, stosowanych w obudowach sprzętu chłodniczego. Opracowana technologia umożliwia wycinanie z tych kompozytowych obudów fragmentów o powtarzalnych kształtach i w ten sposób ich ponowne wprowadzenie do użytkowania. Ponadto efektem opisanych procesów recyklingu takich obudów są produkty recyklingu o wysokiej czystości i wartości rynkowej.

Inżynierowie projektujący linie technologiczne do recyklingu obudów sprzętu chłodniczego lub innych produktów z kompozytów warstwowych od-

najdą w powyżej opisanych wynikach prac badawczych rozwiązania umożliwiające otrzymanie produktów z recyklingu o wysokiej czystości oraz pozwalające na wdrożenie koncepcji ponownego użytkowania produktów.

Wymagania dotyczące produktu określone w FOE opcjonalnie mogą odnosić się do etapu wytwarzania, podobnie jak do opisanego powyżej etapu wycofania z użytkowania. Szczególne uwarunkowania narzucane na proces produkcyjny określają oczekiwaną niezawodność procesów. W rozdziale 3 przedstawiono wariantowe rozwiązania transportu technologicznego zmniejszające prawdopodobieństwo przestojów produkcyjnych wywołanych uszkodzeniami transportowanych elementów.

Transport fluidalny w procesach obróbki chemicznej

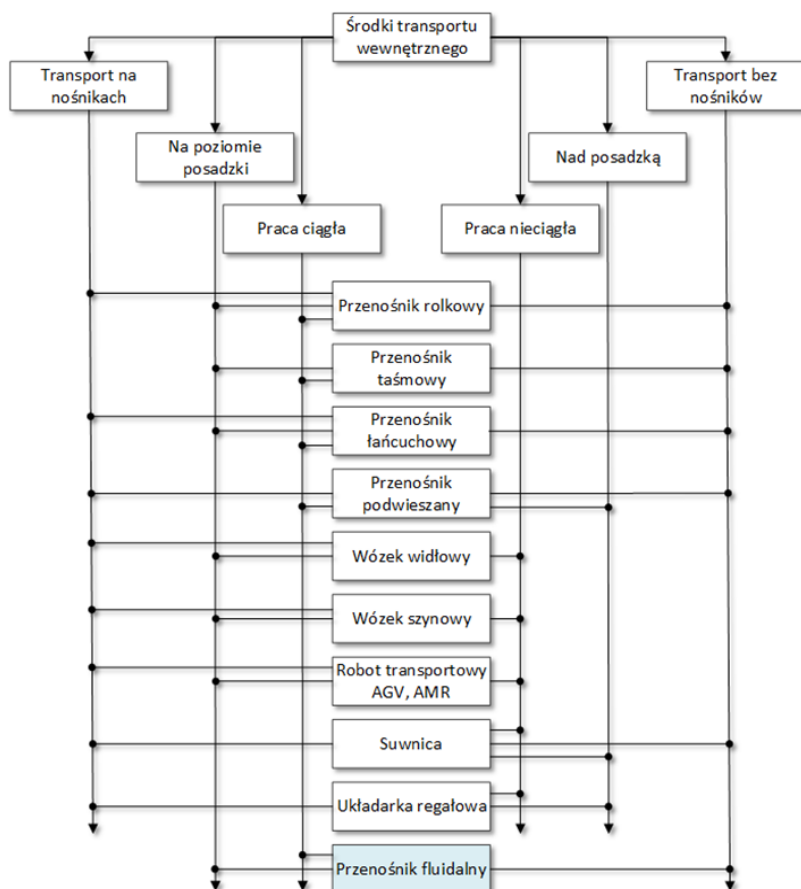
W poprzednich rozdziałach opisano wyniki prac badawczych dotyczących planowania procesów technologicznych z uwzględnieniem możliwości definiowania Funkcjonalnych Obiektów Elementarnych, które wpływają na oddziaływanie produktów na środowisko oraz na procesy ich recyklingu. Jeżeli wymagania dotyczące jakości produktu narzucają konieczność realizacji procesów wytwarzania z wysoką niezawodnością, należy opracować rozwiązania zmniejszające prawdopodobieństwo występowania przestojów w produkcji. Przestoje podczas ciągłych procesów produkcyjnych mogą być wynikiem awarii, np. uszkodzenia transportowanych elementów w czasie transportu technologicznego. Niniejszy rozdział dotyczy prac badawczych ukierunkowanych na opracowanie innowacyjnych systemów transportu komponentów w ciągłych procesach technologicznych wytwarzania powłok i trawienia chemicznego.

Współczesne systemy wytwarzania charakteryzuje coraz wyższy stopień automatyzacji i robotyzacji. Dotyczy to głównych procesów produkcyjnych, jak również związanych z nimi niżej wymienionych procesów pomocniczych (Lewandowski, Skołud i Plinta, 2014):

- transportu półfabrykatów, surowców i komponentów do linii produkcyjnych;
- transportu międzyoperacyjnego;
- zadań pomiarowo-kontrolnych: kontroli jakości międzyoperacyjnej, kontroli końcowej;
- procesów przezbierania stanowisk pracy;
- procesów pakowania i paletyzacji;
- znakowania i śledzenie umożliwiające identyfikowalność (*ang. traceability*);
- integracji stanowisk pracy, produktów, partii produkcyjnych, narzędzi, oprzyrządowania z systemami informatycznymi:

- planowania zasobów przedsiębiorstwa (ang. *enterprise resource planning* – ERP),
- systemów realizacji produkcji (ang. *manufacturing execution system* – MES),
- platformy Przemysłowy Internet Rzeczy (ang. *Industrial Internet of Things* – IIoT),
- systemów lokalizacji czasu rzeczywistego (ang. *real time location system* – RTLS).

Wskazane procesy zależą od rodzaju produkcji, poziomu automatyzacji i robotyzacji systemu produkcyjnego, jak również od stopnia jego informatyzacji i cyfryzacji. W produkcji o charakterze rytmicznym w celu zapewnienia jej ciągłości, jak również zachowania taktu ważne jest stosowanie takich roz-



Rys. 3.1. Rodzaje środków transportu wewnętrznego w systemach produkcyjnych. Źródło: oprac. własne na podstawie: (Honczarenko, 2000)

wiązań w zakresie transportu międzyoperacyjnego, aby możliwa była synchronizacja dostarczania partii produktów na poszczególne stanowiska pracy i ich odbioru.

Klasyfikując środki transportu, można wyróżnić znane rozwiązania techniczne przeznaczone do stosowania w określonych rodzajach transportu (rys. 3.1) (Honczarenko, 2000). W klasyfikacji podanej w literaturze przedmiotu nie uwzględniono rozwiązań umożliwiających transport elementów z minimalizacją, ograniczeniem lub całkowitym wyeliminowaniem kontaktu fizycznego transportowanych elementów z systemem technicznym przenośnika.

Znane są nowoczesne rozwiązania ograniczające lub eliminujące kontakt transportowanych obiektów z przenośnikiem, wykorzystujące lewitację magnetyczną, transport pneumatyczny czy rozwijany w ostatnich latach transport bezzałogowymi statkami powietrznymi – dronami. Środki transportu wymienione na rys. 3.1 uzupełniono o przenośnik fluidalny przeznaczony do realizacji transportu ciągłego bez dodatkowych nośników. Przenośnik ten był przedmiotem prac badawczych zrealizowanych na zlecenie przedsiębiorstwa zajmującego się wytwarzaniem linii technologicznych do galwanizowania.

3.1. Hipoteza badawcza dotycząca transportu w ciągłych procesach produkcyjnych

Celem zrealizowanych prac badawczych było opracowanie systemu transportu fluidalnego dwustronnych płyt (ang. *printed circuit board* – PCB) do wytwarzania obwodów drukowanych oraz płytek krzemowych, stanowiących elementy składowe paneli fotowoltaicznych. Nowe rozwiązania w zakresie transportu powinny umożliwiać przemieszczanie komponentów między kolejnymi etapami ciągłego procesu obróbki chemicznej, tj. między wannami procesowymi z roztworami chemicznymi. Transport powinien ograniczać lub całkowicie eliminować kontakt pomiędzy elementami przenośnika a transportowanym elementem. Wymóg ten podyktowany jest głównie własnościami mechanicznymi płytek krzemowych. Są one kruche, a tradycyjne przenośniki rolkowe często powodują ich łamanie się w procesie transportu podczas obróbki chemicznej. Pokruszenie się płytki krzemowej powoduje zanieczyszczenie roztworu procesowego, konieczność awaryjnego zatrzymania linii technologicznej, opróżnienia i oczyszczenia wanny, ponownego napełnienia czy-

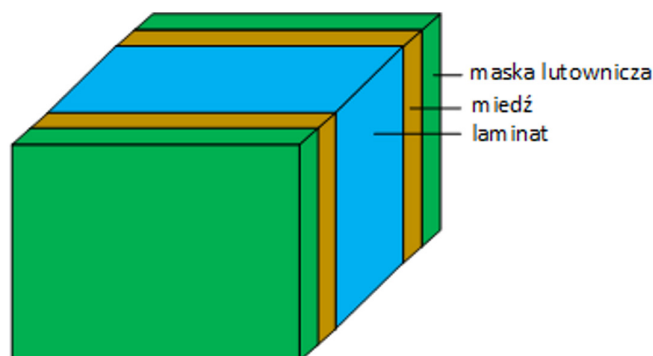
stym roztworem. Takie awarie są wysoce niepożądane podczas eksploatacji linii technologicznych, powodują kosztowne przestoje.

Mając na uwadze powyższe wymagania w zakresie fluidalnego systemu transportowego, postawiono hipotezę badawczą:

Opracowanie metod transportu fluidalnego pozwoli na realizację ciągłych procesów chemicznych trawienia i płukania, znacznie ograniczy lub całkowicie wyeliminuje zagrożenie uszkodzeniami mechanicznymi transportowanych elementów wynikającymi z naprężeń spowodowanych fizycznym kontaktem elementów z częściami transportera.

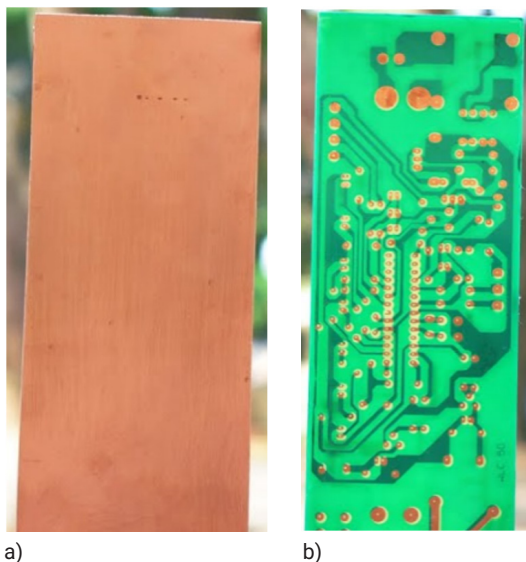
3.2. Dwustronne płytki do obwodów drukowanych

Płytki do obwodów drukowanych PCB są elementami służącymi do łączenia lub osadzania komponentów w obwodzie. Mają postać laminowanej struktury kanapkowej złożonej z warstw przewodzących i izolacyjnych. Każda z warstw przewodzących jest zaprojektowana ze wzorem ścieżek, wytrawionych z jednej lub więcej warstw arkusza miedzi. Miedź nakładana jest na warstwy arkusza nieprzewodzącego podłoża, tj. na laminat. Komponenty elektryczne mogą być mocowane do przewodzących padów na zewnętrznych warstwach. Metodą mocowania jest zazwyczaj lutowanie, które łączy zarówno elektrycznie, jak i mechanicznie. W płytkach PCB mogą być też wywiercone otwory, które umożliwiają połączenia elektryczne między warstwami przewodzącymi (Hamilton, 1984). Strukturę dwustronnej płytki PCB przedstawia rys. 3.2.



Rys. 3.2. Struktura dwustronnej płytki PCB z maską lutowniczą

Środkowa warstwa laminatu jest materiałem dielektrycznym na bazie szkła epoksydowego, na który nakładana jest powłoka miedziana. W procesach produkcji obwodów drukowanych maskę lutowniczą nanosi się na te obszary, które będą stanowiły odwoły elektryczne, pozostała odsłonięta część warstwy miedzianej zostanie usunięta w wyniku trawienia (rys. 3.3).



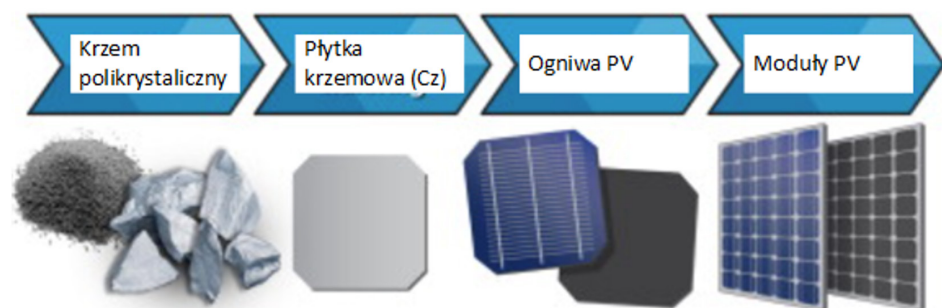
Rys. 3.3. Płyta PCB przed nałożeniem maski (a), po nałożeniu maski, trawieniu i wykonaniu otworów montażowych (b).

Źródło: (Overview of PCBA Manufacturing Process, 2025)

Grubość płytek PCB waha się od 0,4 do 3,2 mm, grubość powłoki miedzianej wynosi od 18 do 210 μm . Arkusze mogą mieć maksymalnie 510x650 mm.

3.3. Płytki krzemowe w ogniwach fotowoltaicznych

Pękanie płytek krzemowych w procesie produkcji ogniw fotowoltaicznych PV (ang. *PhotoVoltaic*) jest powszechnym problemem na różnych etapach wytwarzania (Goodrich, Hacke, Wang, Sopori, Margolis, James, Woodhouse, 2013). Na rysunku 3.4 przedstawiono główne etapy produkcji modułów PV ze wskazaniem etapu płytek krzemowych.



Rys. 3.4. Etapy produkcji modułów PV. Źródło: (Goodrich i in., 2013)

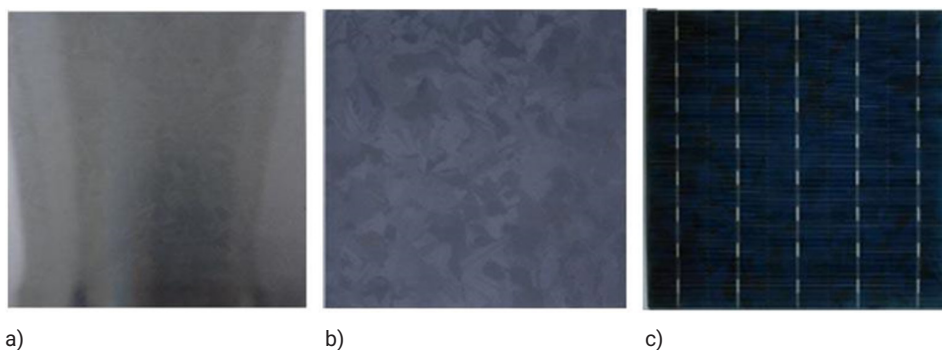
Poniżej scharakteryzowano transport i obróbkę płytek krzemowych wykorzystywanych w modułach PV. Pęknięcia, mikrouszkodzenia, rysy na płytkach krzemowych prowadzą często do pokruszenia się tych elementów i zanieczyszczenia pozostałościami urządzeń w otoczeniu.

W publikacji (Yoo, 2010) zaproponowano wykorzystanie technologii elektronicznej interferometrii wzorca plamkowego (ang. *Electronic Speckle Pattern Interferometry* – ESPI) jako narzędzia do szybkiej identyfikacji pęknięć w ogniwach PV.

Znaczenie kontroli płytek krzemowych oraz wykrycie defektów na ich powierzchni podczas produkcji ogniw słonecznych podkreślono w pracy (Han, Gao, Zhao, Liao, Tang, Li, 2020). Opisano zastosowanie systemów wizyjnych wraz z przetwarzaniem obrazów, wykorzystano głębokie sieci konwolucyjne (ang. *Convolutional Neural Networks* – CNN) do wykrywania defektów płytek z polikrystalicznego krzemu.

Produkcja ogniw słonecznych wykorzystywanych w ogniwach fotowoltaicznych składa się z czterech głównych etapów. Najpierw odbywa się proces rafinacji i wytopienia krzemu polikrystalicznego, po którym następuje formowanie monokrystalicznych lub polikrystalicznych bloków. Następnie z bloków wycinane są płytki krzemowe o grubości 140–160 μm . Płytki poddawane są chemicznemu trawieniu w celu nadania powierzchni tekstury, sprzyjającej zwiększeniu absorpcji światła. Z tak przygotowanych płytek krzemowych wytwarzane są ogniwa PV (rys. 3.5).

Naprężenia występujące podczas transportu oraz podatność na kruche pękanie płytek krzemowych wykorzystywanych w budowie ogniw fotowoltaicznych była przedmiotem badań opisanych w pracy (Brun i Melkote, 2009). Autorzy opisali proces przechwyty płytek chwytaikiem Bernoulliego w zrobo-



Rys. 3.5. Etapy przetwarzania płytek krzemowych w ogniwa PV:
a) płytka krzemowa po wycięciu, b) płytka po trawieniu, c) ogniwo PV.
Źródło: (DS New Energy, 2025)

tyzowanym procesie produkcyjnym. Przedstawili szczegółową analizę stanu naprężenia wywołanego przechwytem w płytkach krzemowych otrzymanych metodą Czochralskiego, płytkach odlewanych i polikrystalicznych, wytworzonych z zastosowaniem technologii wzrostu z wykorzystaniem zdefiniowanej krawędzi w postaci filmu (ang. *Edge-defined Film-fed Growth* – EFG). Grubość i wymiary analizowanych płytek podane są w tabeli 3.1.

Tabela 3.1. Parametry badanych płytek krzemowych

Typ płytki	Wymiary [mm]	Średnia grubość [μm]	Liczba próbek
Cz*	125×125	219,2 ±1,2	5
Odlewana	125×125	256,5 ±0,5	5
Odlewana	156×156	146,0 ±8,0	5
EFG**	100×100	179,6 ±1,9	5

Źródło: (Brun i Melkote, 2009).

* Płytki krzemowe otrzymane metodą Czochralskiego.

** Płytki odlewane i polikrystaliczne ze zdefiniowaną krawędzią w postaci filmu.

Scharakteryzowano naprężenia wynikające z odkształcenia płytek transportowanych z zastosowaniem chwytaka podciśnieniowego Bernoulliego, przy różnych wartościach przepływu powietrza w chwytaku (V) (tabela 3.2).

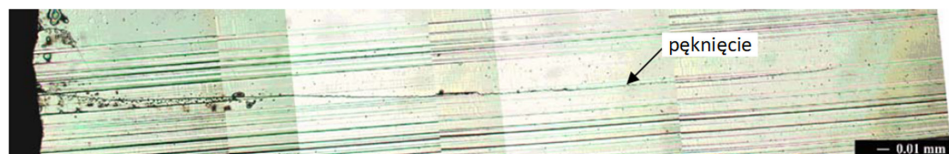
Przeanalizowano teoretycznie oraz eksperymentalnie wpływ mikropęknięć w płytkach krzemowych na wartości naprężeń powodujących pęknięcie

się płytki. Mikropęknięcia wywołano celowo, a ich wartość zmierzono pod mikroskopem optycznym. Przykładowe mikropęknięcie przedstawia rys. 3.6.

Tabela 3.2. Maksymalne główne naprężenie rozciągające w płaszczyźnie płytki krzemowej

	V [l/min]	$\sigma_{\max}$ [MPa]	Lokalizacja
Płytki Cz	30	5,4	środek
	35	10,9	środek
	40	41,9	krawędź
Płytki EFG	30	16,1	środek
	35	40,2	środek
	40	62,9	krawędź
Płytki odlewana 125x125 [mm]	30	4,5	środek
	35	9,1	środek
	40	29,4	krawędź
Płytki odlewana 125x125 [mm]	30	14,5	krawędź
	35	39,2	krawędź
	40	54,5	krawędź

Źródło: (Brun i Malkote, 2009).

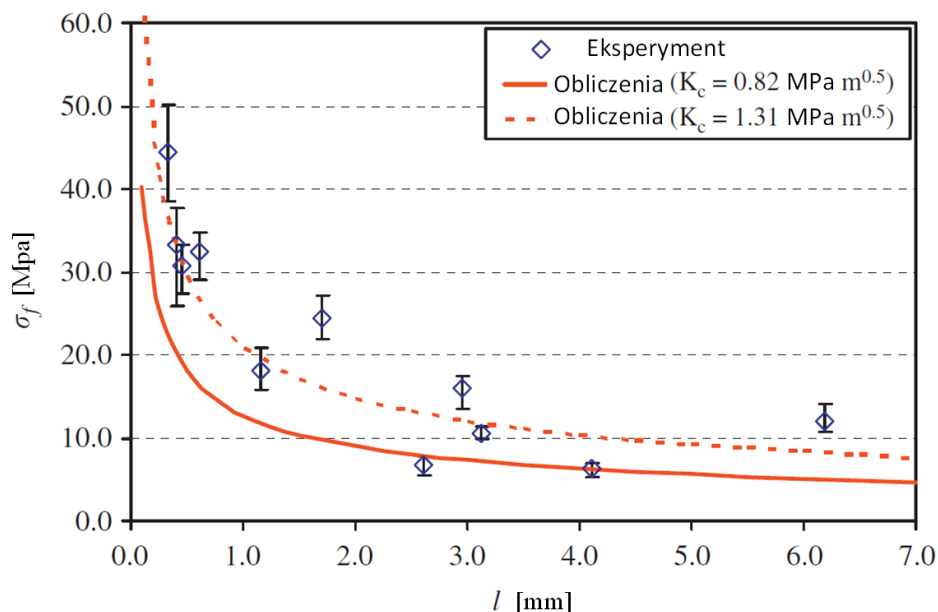


Rys. 3.6. Obraz mikropęknięcia o długości 0,60 mm w płytce EFG.

Źródło: (Brun i Melkote, 2009)

Na podstawie obliczeń oraz przeprowadzonych eksperymentów otrzymano zestawienie wartości naprężeń wywołujących zniszczenie próbek (rys. 3.7).

Naprężenia niszczące płytki krzemowej zestawiono z długościami mikropęknięć, w wyniku których płytka uległa pokruszeniu. Obliczenia teoretyczne przeprowadzono dla dwóch wartości wytrzymałości na pękanie: $K_c = 0,82 \text{ MPa m}^{0,5}$ i $K_c = 1,31 \text{ MPa m}^{0,5}$. Oprócz narażeń na uszkodzenia wynikających z kontaktu płytek krzemowych z urządzeniami transportującymi istnieją zagrożenia związane z zanieczyszczeniami środkami smarnymi, wykorzystywanymi do zmniejszenia oporów ruchu wynikających z tarcia podczas transportu.



Rys. 3.7. Naprężenia σ_f wywołujące zniszczenie płytek krzemowych EFG w zależności od długości mikropęknięć l [mm]. Źródło: oprac. własne na podstawie: (Brun i Melkote, 2009)

W publikacji (Park i in., 1996) opisano wyniki prac, których celem było wyeliminowanie kontaktu fizycznego płytek krzemowych z elementami układu transportowego za pomocą rozwiązań opartych na transporcie płytek z wykorzystaniem lewitacji. Opracowano system transportu płytek krzemowych do procesu produkcji półprzewodników. Zadanie podyktowane było potrzebą pozbycia się zanieczyszczeń cząsteczkowych i olejowych, które występowały w konwencjonalnych systemach transportowych. Zaprojektowany system transportowy składał się z cylindrycznych cewek elektromagnetycznych umożliwiających wytworzenie sił lewitacji poprzez zasilenie cewek prądem elektrycznym. Zbudowano dynamiczny model całego systemu transportowego. W celu zapewnienia pożądanej trajektorii transportu elementów zaprojektowano tory stabilizacji układu napędowego.

Powyżej opisane wyniki badań pozwalają wnioskować, że już naprężenia z zakresu 20–40 MPa mogą prowadzić do pęknięcia płytek krzemowych EFG, jeśli występuje w nich karb w postaci mikropęknięcia o długości 0,5–1,0 mm. Wartości naprężeń niszczących odzwierciedlają podatność płytek krzemowych na uszkodzenia mechaniczne oraz uzasadniają podjęcie tematyki opracowania

alternatywnych rozwiązań w procesie transportu tych elementów. Rozwiązania te spowodują ograniczenie lub całkowite wyeliminowanie fizycznego kontaktu płytek z elementami przenośników, a przez ograniczenie do minimum powstawania napreżeń pozwolą na ochronę przed zniszczeniem w procesach obróbki chemicznej nawet płytek z wadami w postaci mikropęknięć.

3.4. Ciągłe procesy produkcyjne w obróbce chemicznej

Rynkowe zapotrzebowanie na linie technologiczne do chemicznej obróbki komponentów determinuje znaczną liczbę producentów takich rozwiązań. Oferowane są maszyny i urządzenia do wytwarzania obwodów drukowanych z cienkich laminatów, a także do obróbki płytek krzemowych w procesie wytwarzania elementów paneli fotowoltaicznych. Producentami takich maszyn i linii obróbkowych są m.in.:

- RENA (Niemcy),
- KUTTLER Automation Systems (Chiny),
- Digamber Enterprises (Indie),
- WISE (Włochy),
- Modutek Corporation (USA).

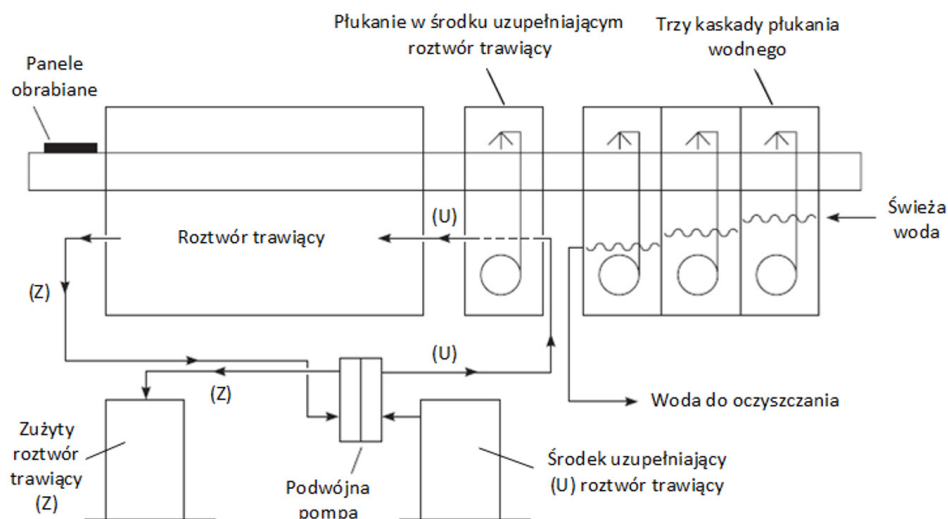
Wymienieni producenci oferują pojedyncze stanowiska obróbkowe lub gotowe linie technologiczne, umożliwiające realizację kilku kolejnych procesów obróbkowych. Do procesów stosowanych podczas produkcji obwodów drukowanych zalicza się (Goosey i Poole, 2004):

- mycie paneli przed trawieniem;
- nakładanie maski do trawienia;
- kontrolowane trawienie;
- płukanie elementów z pozostałości płynów procesowych;
- usuwanie maski wykorzystywanej w procesie trawienia;
- nakładanie powłok ochronnych i dekoracyjnych.

Najistotniejszy jest proces trawienia. Polega on na usuwaniu miedzi z miejsc na laminacie niepokrytych maską (środkiem do zabezpieczenia ścieżek obwodów) za pomocą roztworu chemicznego. Podstawowymi związkami tych roztworów są: chlorek amonu, amoniak, wodorowęglan amonu, chlorek miedzi, kwas solny, nadtlenek wodoru. Główne składniki chemiczne działają następująco (Coombs i Holden, 2016):

- wodorotlenek amonu NH_4OH działa jako odczynnik kompleksujący i utrzymuje miedź w roztworze;
- chlorek amonu NH_4Cl zwiększa szybkość trawienia, pojemność wiązania miedzi i stabilność roztworu;
- jon miedzi Cu^{2+} jest utleniaczem, który reaguje z miedzią metaliczną i rozpuszcza ją;
- wodorowęglan amonu NH_4HCO_3 jest buforem, dzięki któremu otwory lutownicze i powierzchnia pozostają czyste;
- fosforan amonu $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ utrzymuje czystość lutów i otworów przelotowych po obróbce;
- azotan amonu NH_4NO_3 zwiększa szybkość trawienia i pozwala zachować czystość lutu;
- roztwory do trawienia alkalicznego rozpuszczają odsłonięte pola miedzi na płytach drukowanych PCB poprzez proces chemiczny utleniania, rozpuszczania i kompleksowania.

W ciągłych systemach trawiących ważne jest utrzymywanie stałej szybkości trawienia przy minimalnym zanieczyszczeniu roztworu trawiącego. W tym celu wykorzystuje się automatyczne uzupełnianie roztworu poprzez pomiar jego ciężaru właściwego lub gęstości. Proces, który jest ogólnie określany jako upust i zasilanie (ang. *bleed and feed*), przedstawia rys. 3.8. Podczas trawienia płytek drukowanych miedź jest rozpuszczana, a gęstość roztworu trawiącego



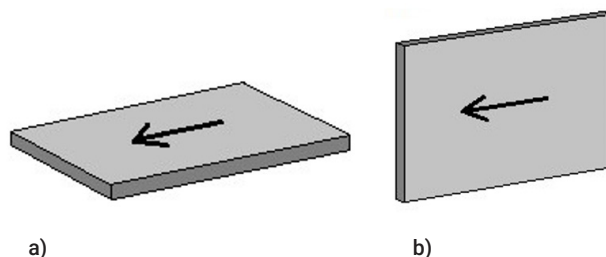
Rys. 3.8. Ciągły, zautomatyzowany proces trawienia.

Źródło: oprac. własne na podstawie: (Coombs i Holden, 2016)

wzrasta. Gęstość roztworu w wannie trawiącej jest stale monitorowana w celu określenia ilości miedzi w roztworze. Gdy czujnik gęstości zarejestruje górny limit dopuszczalnych wartości, układ sterowania aktywuje podwójną pompę, która podaje środek uzupełniający do roztworu i jednocześnie usuwa zużyty roztwór trawiący, aż do osiągnięcia niższej gęstości.

Przy wytwarzaniu elementów paneli fotowoltaicznych najważniejszym procesem jest kontrolowane trawienie całej powierzchni płytek krzemowych w celu uzyskania odpowiedniej struktury. To zadanie realizowane jest za pomocą urządzeń o konstrukcji i zasadzie działania zbliżonej do maszyn wykorzystywanych w procesie trawienia obwodów drukowanych. Analizując ofertę producentów maszyn i linii technologicznych do obróbki chemicznej, można stwierdzić, że najważniejsze w rozwiązaniach stosowanych w transporcie komponentów są elementy toczne jak wałki, krążki oraz w pewnym zakresie elementy ślizgowe jak płyty, grzebienie. Niekiedy wprowadzane są również przenośniki pasowe i podwieszane. W transporcie komponentów w czasie obróbki chemicznej możliwe są dwie orientacje elementu:

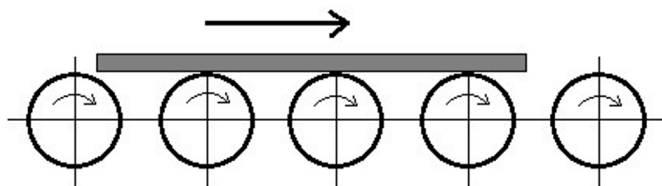
- horyzontalna – element ułożony jest płasko na urządzeniu transportowym (rys. 3.9a);
- wertykalna – element ustawiony jest w płaszczyźnie pionowej, lecz kierunek transportu jest poziomy (rys. 3.9b).



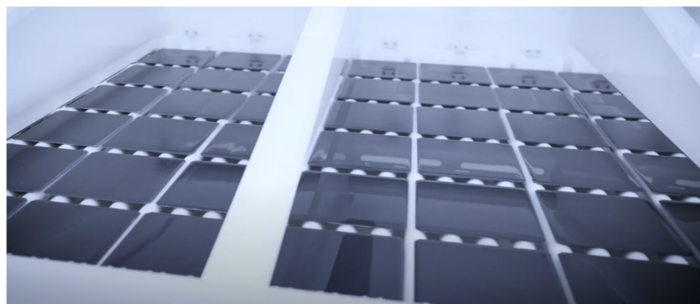
Rys. 3.9. Orientacja elementu w obróbce chemicznej:
a) horyzontalna, b) wertykalna

Popularnym rozwiązaniem transportu horyzontalnego jest przedstawiony schematycznie system transportu na napędzanych rolkach/wałkach, bez docisku od góry (rys. 3.10).

Takie rozwiązanie w swoich urządzeniach linii technologicznych stosuje firma RENA (rys. 3.11) (RENA Technologies, 2025).

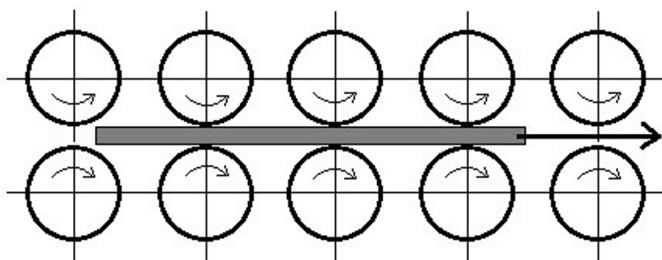


Rys. 3.10. Transport elementów na rolkach czynnych



Rys. 3.11. Transport płytek krzemowych na rolkach napędzanych podczas obróbki chemicznej. Źródło: (RENA Technologies, 2025)

Drugi z systemów z dolnymi rolkami jako elementem napędowym wyposażony jest w dodatkowy zestaw rolek – górny (rys. 3.12). Rolki górne mogą być bierne lub napędzane, odpowiadają głównie za docisk elementów, w celu przeciwdziałania poślizgowi elementów transportowanych na rolkach dolnych, a co za tym idzie zaburzeniom w ułożeniu transportowanych elementów, a także możliwym kolizjom między elementami i ich uszkodzeniom.



Rys. 3.12. Transport elementów na rolkach czynnych z dociskiem

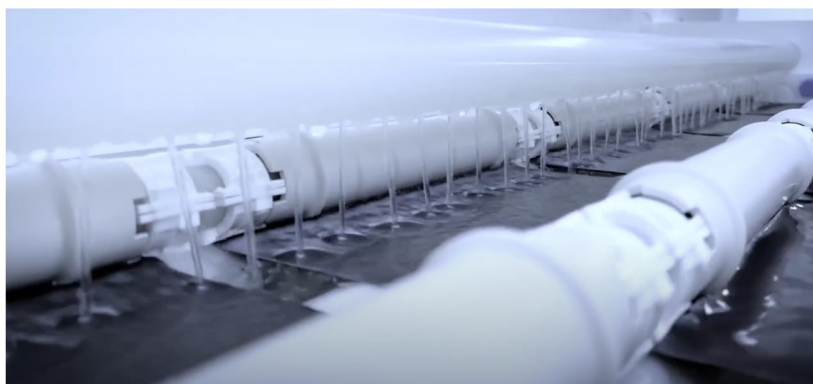
Transport na rolkach z dociskiem stosowny jest w urządzeniach firmy Kuttler, w linii technologicznej do produkcji modułów PV (rys. 3.13) (Kuttler Automation Systems, 2025).



Rys. 3.13. Linia technologiczna do chemicznego trawienia firmy Kuttler.

Źródło: (Kuttler Automation Systems, 2025)

Zastosowanie docisku jest istotne w instalacjach, w których przewidziano dodatkowy natrysk roztworu procesowego (rys. 3.14) (RENA Technologies, 2025).



Rys. 3.14. Transport na rolkach z dodatkowym natryskiem i dociskiem.

Źródło: (RENA Technologies, 2025)

Dynamika oddziaływania strumieni roztworu na płytki może powodować przemieszczanie transportowanych elementów i zakłócać proces transportu. Zastosowanie docisku niweluje to zagrożenie, jednak fizyczny kontakt z transportowanym elementem wywołuje w nim naprężenia, które mogą prowadzić

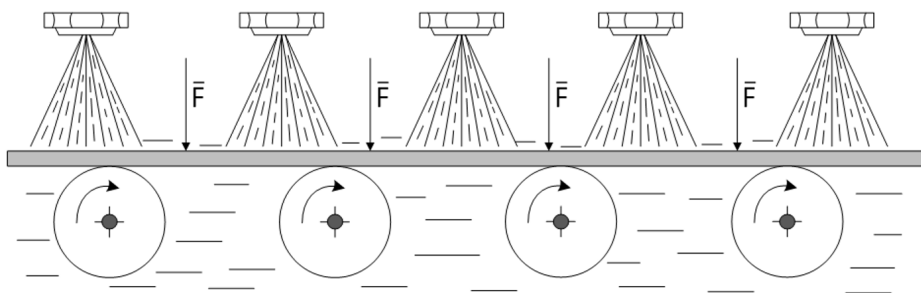
do pokruszenia płytek krzemowych (Zhou, Yan, Huang, Wang, Kang, Guo, 2017). Naprężenia te wynikają z dystansu pomiędzy rolkami górnymi i dolnymi założonego dla płytek o określonej grubości i/lub systemu zapewniającego stałą siłę docisku płytek do rolek dolnych (Brun i Melkote, 2009). Płytki krzemowe wykonywane są jednak w technologiach charakteryzujących się określonymi odchyłkami w zakresie grubości elementów (tabela 3.12). Jeżeli wśród transportowanych płytek będą takie, które wyprodukowane zostały z dopuszczalnymi wartościami odchyłek wymiarowych grubości, może dojść do znacznego wzrostu naprężeń w płytkach krzemowych podczas transportu i ostatecznie do ich pęknięcia.

3.5. Rozwiązania transportu fluidalnego

W ramach planowania założeń do prac badawczych opracowano cztery wstępne koncepcje rozwiązań transportu, stopniowo eliminujące kontakt elementów urządzenia z transportowanym komponentem. Wszystkie warianty zakładają wykorzystanie ciśnienia cieczy procesowej do wywierania zamierzonego oddziaływania na element transportowany. Z jednej strony oddziaływanie to ma zapewnić realizację procesów chemicznych, z drugiej wspomagać lub zapewnić przemieszczanie obrabianych płytek.

Wariant I: *Transport płaskich elementów w pozycji horyzontalnej z przesuwem na rolkach transportowych*

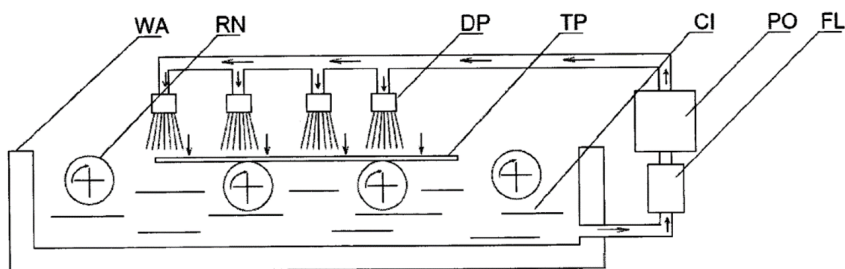
W celu wyeliminowania poślizgu i intensyfikacji procesu chemicznego zastosowano docisk płytek do rolek przez ciśnienie kierowane przez dysze procesowe na górną stronę transportowanej płytki (rys. 3.15).



Rys. 3.15. Schemat transportu fluidalnego z dociskiem przez natrysk cieczy procesowej – wariant I

Wektorem $\vec{F}$ oznaczono siłę oddziaływania cieczy na transportowaną płytkę. Siła ta powinna eliminować możliwość poślizgu płytek na rolkach. W zaproponowanym rozwiązaniu ograniczono kontakt fizyczny płytki tylko do styku z rolkami napędzającymi. Prędkość przemieszczania się płytek w roztworze może być sterowana za pomocą układu napędowego rolek. Przy założeniu braku poślizgu płytek na rolkach rozwiązanie zapewnia kontrolowaną szybkość realizacji procesów chemicznych (Krot, Górski i Matusiewicz, 2013).

Rozwiązanie techniczne *Transporter płaskich elementów w procesach produkcyjnych*, tj. wariant I, zostało zgłoszone do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej i objęte ochroną – patent nr PL 225097 (Matusiewicz, Krot, Chlebus, Górski, Zawisłak, 2017). Schemat rozwiązania przedstawia grafika z opisu zastrzeżeń patentowych (rys. 3.16).



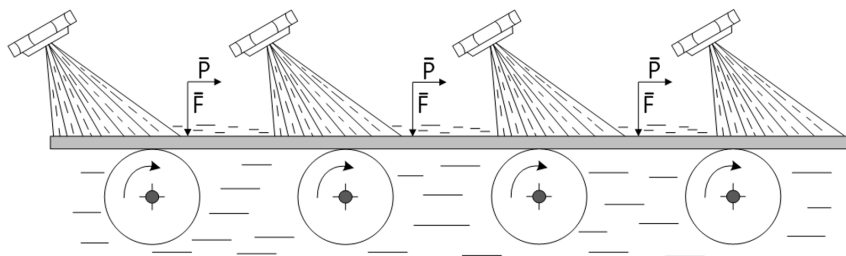
Rys. 3.16. Schemat transportera płaskich elementów w procesach produkcyjnych – wariant I.

Źródło: (Matusiewicz, Krot, Chlebus, Górski, Zawisłak, 2017)

Cechą charakterystyczną transportera płaskich elementów w procesach produkcyjnych zawierającego dysze doprowadzające ciecz jest wanna (WA) wypełniona cieczą (CI), w której osadzone są równolegle względem siebie co najmniej trzy osie rolek. Nad rolkami usytuowane są dysze procesowe (DP) połączone poprzez pompę (PO) i filtr (FL) z wanną (WA), przy czym transportowana płytka (TP) umieszczona jest w pozycji horyzontalnej między rolkami (RL) i dyszami procesowymi (DP). W opisywanym rozwiązaniu osie rolek podłączone są do napędu.

Wariant II: *Transport płytek w pozycji horyzontalnej z przesuwem horyzontalnym na rolkach transportowych biernych, nienapędzanych*

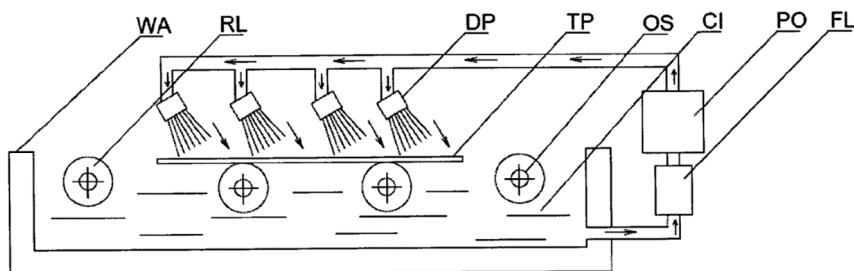
Docisk płytek do rolek w procesie transportu jest efektem działania ciśnienia cieczy procesowej kierowanego przez dysze na górną stronę transportowanej płytki (rys. 3.17).



Rys. 3.17. Schemat przebiegu transportu fluidalnego na rolkach biernych, natrysk cieczy pod kątem – wariant II

Napęd płytek wywołuje oddziaływanie składowej poziomej $\bar{P}$ siły oddziaływania cieczy skierowanej pod określonym kątem do kierunku ortogonalnego względem płaszczyzny transportowanych płytek. Przy założeniu, że ciśnienie cieczy procesowej ma taka sama wartość, wartość składowej pionowej siły docisku $\bar{F}$ jest mniejsza niż w wariantcie I. Rolki pozostają z założenia bierne, obracają się wskutek oddziaływania siły $\bar{P}$. Siła ta w przypadku ciężkich płytek PCB obwodów drukowanych może okazać się niewystarczająca do pokonania siły tarcia pomiędzy płytą a rolkami przenośnika. Wartość siły $\bar{P}$ uzależniona będzie od ciśnienia oraz gęstości cieczy procesowej (Krot, Górski i Matuszewicz, 2015).

Rozwiązanie techniczne *Transporter płaskich elementów w procesach produkcyjnych*, tj. wariant I, zostało zgłoszone do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej i razem z rozwiązaniem technicznym określonym powyżej jako wariant II objęte ochroną w ramach tego samego patentu – patent nr PL 225097 (Matuszewicz, Krot, Chlebus, Górski, Zawiaślak, 2017). Schemat rozwiązania przedstawia grafika z opisu zastrzeżeń patentowych (rys. 3.18).



Rys. 3.18. Schemat transportera płaskich elementów w procesach produkcyjnych – wariant II.

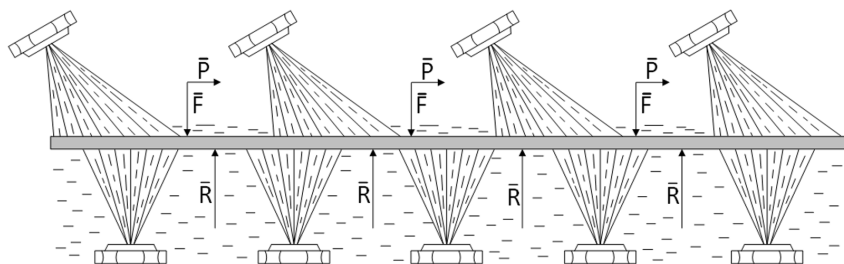
Źródło: (Matuszewicz, Krot, Chlebus, Górski, Zawiaślak, 2017)

Transporter składa się z wanny (WA) wypełnionej cieczą (CI), w wannie osadzone są równolegle względem siebie co najmniej trzy osie rolek (OS) z rolkami (RL). Nad rolkami (RL) usytuowane są dysze procesowe (DP) połączone poprzez pompę (PO) i filtr (FL) z wanną (WA), przy czym transportowana płytką (TP) umieszczona jest w pozycji horyzontalnej między rolkami (RL) i dyszami procesowymi (DP).

Zasada działania rozwiązania z wariantu II (rys. 3.18) różni się od zasady działania rozwiązania z wariantu II (rys. 3.16) tym, że osie rolek mogą być niepodłączone do napędu, a dysze procesowe (DP) ustawione są pod kątem względem górnej powierzchni transportowanej płytki (TP).

Wariant III: *Transport płaskich elementów w pozycji horyzontalnej z przesuwem horyzontalnym, elementy całkowicie zanurzone w cieczy.*

Stateczność płytki w ruchu utrzymywana jest za pomocą ciśnienia płynu skierowanego na nią od dołu, napęd jest generowany przez docisk od góry, tj. jak w wariacie II (rys. 3.19). Podobnie jak w wariacie II oznaczono siły $\bar{F}$ oraz $\bar{P}$ wynikające z oddziaływania cieczy z dysz górnych. Jednak tutaj siła $\bar{F}$ wraz z ciężarem płytki powinna być równoważona siłą $\bar{R}$ wynikającą z oddziaływania ciśnienia cieczy z dolnych dysz procesowych.

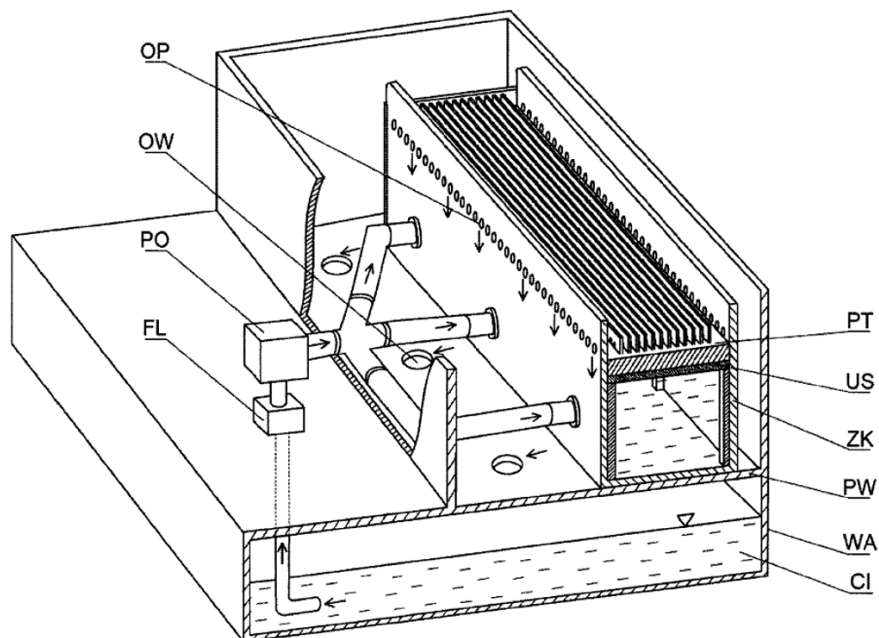


Rys. 3.19. Schemat przebiegu transportu fluidalnego bez rolek, z natryskiem cieczy z obu stron płytki – wariant III

Możliwa jest też modyfikacja konstrukcji i usytuowanie dysz pod kątem, symetrycznie, tj. na dole i na górze transportowanego elementu. Z uwagi na przewidywanie występowania wahań ciśnienia cieczy procesowej i chaotyczny, turbulentny przepływ przewiduje się konieczność dodatkowego prowadzenia bocznego w celu zapewnienia ruchu prostoliniowego transportowanych elementów (Krot, Górski i Matuszewicz, 2015).

Rozwiązanie techniczne *Transporter płaskich elementów w procesach produkcyjnych* zostało zgłoszone do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Pol-

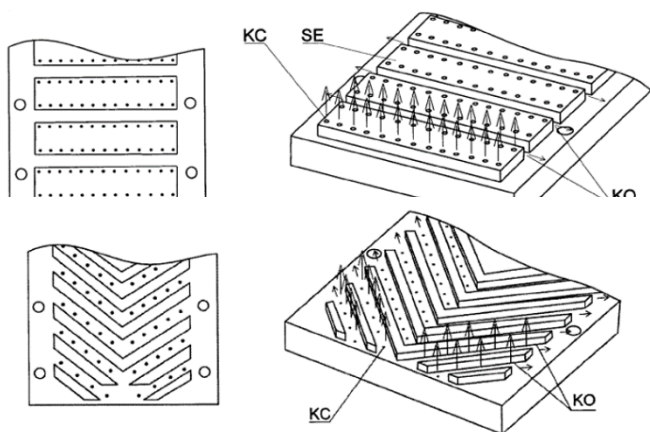
skiej i objęte ochroną – patent nr PL 225094 (Matuszewicz, Krot, Chlebus, Górski, Zawisław, 2017). Schemat opatentowanego transportera fluidalnego przeznaczonego do płytek krzemowych przedstawiono na rys. 3.20.



Rys. 3.20. Schemat transportera płaskich elementów w procesach produkcyjnych – wariant III.

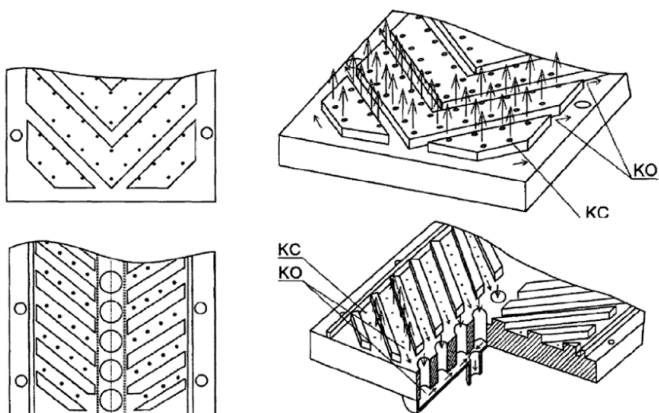
Źródło: (Matuszewicz, Krot, Chlebus, Górski, Zawisław, 2017)

W wannie procesowej (WA) transportera umieszczony jest zbiornik kolektora cieczy (ZK) zamknięty od góry płytą transportującą (PT) wyposażoną w kanały doprowadzające ciecz procesową, przy czym zbiornik kolektora cieczy (ZK) poprzez pompę (PO) i filtr (FL) połączony jest przewodami z wanną procesową (WA). Płyta transportująca (PT) osadzona jest w zbiorniku kolektora cieczy (ZK) poniżej jego górnych krawędzi będących przewodnikami płaskich elementów. Powyżej płyty transportującej (PT) w ściankach zbiornika kolektora cieczy (ZK) wykonane są otwory wypływowe kolektora (OP). Między płytą transportującą (PT) a zbiornikiem kolektora cieczy (ZK) osadzona jest uszczelka (US). Oprócz konstrukcji transportera ochroną zostały objęte alternatywne warianty płyt transportowych, o specjalnie ukształtowanej geometrii i kanałach doprowadzających ciecz procesową (KC) (rys. 3.21–3.23). .



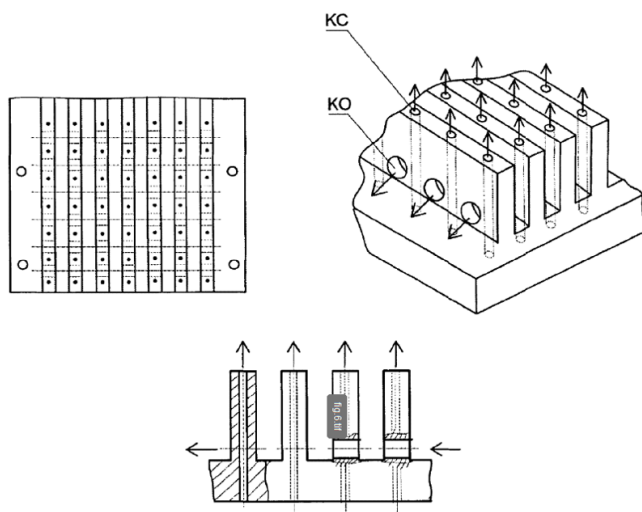
Rys. 3.21. Płyty transportowe, wariant I i II – patent nr PL 225094.

Źródło: (Matuszewicz, Krot, Chlebus, Górski, Zawiślak, 2017)



Rys. 3.22. Płyty transportowe, wariant III i IV – patent nr PL 225094.

Źródło: (Matuszewicz, Krot, Chlebus, Górski, Zawiślak, 2017)



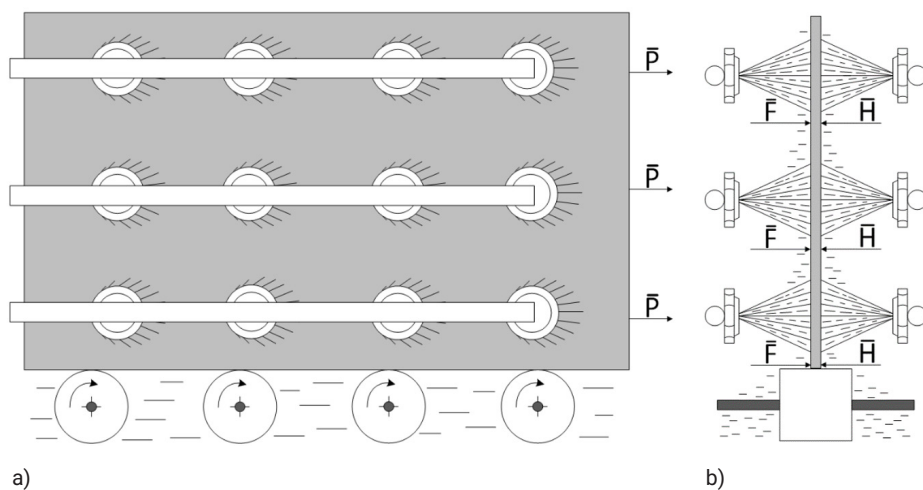
Rys. 3.23. Płyta transportowa, wariant V – patent nr PL 225094.

Źródło: (Matuszewicz, Krot, Chlebus, Górski, Zawiślak, 2017)

Wspólną cechą rozwiązań płyt transportowych w wariantach I–V jest ukie-
runkowanie przepływu cieczy procesowej zapewniające wznios transportowa-
nej płytki, utrzymanie prostoliniowego kierunku transportu oraz możliwość
kontrolowanego odprowadzenia cieczy procesowej z obszaru płyty do zbior-
nika.

Wariant IV: *Transport elementów w pozycji wertykalnej z przesuwem ho-
rizontalnym na rolkach transportowych biernych*

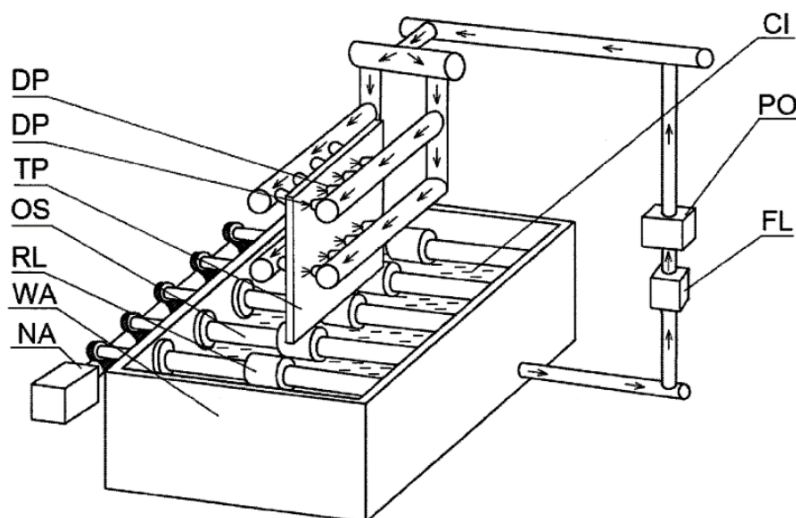
Stateczność płytek w transporcie zapewniają dysze skierowane na płyt-
kę z obu stron, napęd generuje ciśnienia cieczy procesowej podawanej przez
dysze usytuowane pod kątem. Sterowanie prędkością transportu odbywa się
przez zmianę kąta dysz, ciśnienia cieczy procesowej i odległości dysz od trans-
portowanego elementu (rys. 3.24). Podobnie jak w wariacie II napęd płytek
realizowany jest za pomocą siły $\bar{P}$, tj. składowej stycznej do płaszczyzny bocz-
nej płyty siły oddziaływania cieczy skierowanej pod kątem do płaszczyzny
płyty. Stabilizację wertykalną płyty zapewniają równoważące się siły $\bar{F}$ oraz
 $\bar{H}$ – składowe siły oddziaływania ciśnienia cieczy ortogonalne do płaszczy-
zny bocznej płyty.



Rys. 3.24. Schemat transportu fluidalnego z wykorzystaniem rolek w pozycji wertykalnej: a) bok transportowanej płyty, b) widok od czoła płyty – wariant IV

W celu zapewnienia prostoliniowości ruchu dysze po obu stronach płyty
powinny być rozmieszczone symetrycznie, podobnie odległości dysz od płyt
po obu stronach powinny być takie same. Rozwiązanie techniczne *Transporter*

płaskich elementów w procesach produkcyjnych zostało zgłoszone do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej i objęte ochroną – patent nr PL 225096 ((Matuszewicz, Krot, Chlebus, Górski, Zawislak, 2017). Schemat rozwiązania przedstawia grafika z opisu zastrzeżeń patentowych przedstawia rys. 3.25.



Rys. 3.25 Transporter płaskich elementów w procesach produkcyjnych, w pozycji wertykalnej: FL – filtr, PO – pompa, CI – ciecz procesowa, NA – napęd, WA – wanna, RL – rolki, OS – osie rolek, TP – transportowana płytką, DP – dysze procesowe – patent nr PL 552096.

Źródło: (Matuszewicz, Krot, Chlebus, Górski, Zawislak, 2017)

Transporter płaskich elementów przeznaczony do stosowania w procesach produkcyjnych zawiera dysze doprowadzające ciecz procesową. Składa się z wanny procesowej (WA) wypełnionej cieczą (CI), w której osadzone są równolegle względem siebie co najmniej trzy osie rolek (OS), a nad rolkami (RL) usytuowane są dysze procesowe (DP) połączone poprzez pompę (PO) i filtr (FL) z wanną (WA). Transportowana płytką (TP) jest umieszczona w pozycji wertykalnej między dyszami procesowymi (DP) i oparta boczną krawędzią na rolkach (RL). Osie rolek (OS) podłączone są do napędu (NA), dysze procesowe (DP) ustawione są pod kątem względem transportowanej płytki (TP).

W wyniku przeprowadzonych prac koncepcyjnych opracowano cztery warianty transportu fluidalnego:

- Wariant I – w porównaniu z klasycznymi rozwiązaniami eliminuje docisk płytek do rolek dolnych rolkami górnymi, a transportowana płyta PCB lub

plytka krzemowa dociskana jest do dolnych rolek, napędzanych strumieniem cieczy procesowej.

- Wariant II – jest modyfikacją wariantu I, a polega na odłączeniu układu napędowego od rolek dolnych, które na skutek tego pozostają bierne. Zarówno docisk płytek do rolek dolnych, jak i ruch translacyjny płytek zapewniają odpowiednio ukierunkowany strumień cieczy z górnych dysz procesowych.
- Wariant III – całkowicie eliminuje rolki transportera. Od góry oddziaływanie cieczy procesowej realizowane jest tak samo jak w wariacie II, natomiast stateczność płytek od dołu zapewniana oddziaływaniem ciśnienia cieczy procesowej kierowanej przez dolne dysze procesowe.
- Wariant IV – w czasie transportu płytki znajdują się w pozycji wertykalnej. Dolną krawędzią oparte są na biernych rolkach transportowych, natomiast ich stateczność wertykalną i napęd zapewniają siły oddziaływania ciśnienia cieczy procesowej ukierunkowane przez dysze znajdujące się po obu stronach płytki.

Kluczowe własności wariantów transportu podano w tabeli 3.3.

Tabela 3.3. Warianty transportu fluidalnego

Wariant transportu	I	II	III	IV
Kontakt z częściami przenośnika	częściowy, poprzez napędzane rolki	częściowy poprzez rolki bierne	brak	częściowy poprzez rolki bierne
Napęd elementu	rolki	ukierunkowany strumień cieczy	ukierunkowany strumień cieczy	ukierunkowany strumień cieczy
Proponowane zastosowanie	płyty PCB do obwodów drukowanych	płyty PCB do obwodów drukowanych lub płytki krzemowe	płytki krzemowe lub płyty PCB do obwodów drukowanych	płyty PCB do obwodów drukowanych lub płytki krzemowe

Teoretyczne koncepcje wariantów transportu (I–III) przebadano symulacyjnie oraz eksperymentalnie. Opracowano modele do badań symulacyjnych oraz stanowiska laboratoryjne do badań wybranych parametrów transportu z zastosowaniem przenośników fluidalnych.

3.6. Założenia konstrukcyjne transportu fluidalnego

Przystępując do analizy możliwych do praktycznej implementacji teoretycznych wariantów transportu fluidalnego, należy znać podstawowe parametry, które muszą być uwzględnione podczas projektowania, modelowania, symulacji i badań laboratoryjnych. Poniżej zestawiono kluczowe wartości, które należało uwzględnić w modelach symulacyjnych i testach na obiektach fizycznych. W tabeli 3.4 podano parametry i wartości cieczy procesowej, które powinny być uwzględnione.

Tabela 3.4. Parametry cieczy procesowej w transporcie fluidalnym

Rodzaj cieczy procesowej	ciecz alkaliczna	ciecz kwaśna
Gęstość [g/cm ³]	1,19–1,2	1,32–1,44
Temperatura [°C]	44–52 (optymalna 48)	30–40
pH	8,0–8,9 (optymalne 8,5)	1–2
Czynnik trawiący	roztwór: chlorek amonu, amoniak, wodorowęglan amonu	roztwór: chlorek miedzi, kwas solny, nadtlenek wodoru

Czas trawienia w module procesowym o długości 1 m:

- powyżej 200 s przy prędkości 0,3 m/min;
- poniżej 20 s przy prędkości 3 m/min.

Czas płukania w modułach płuczących o wymiarach 500–1250 mm:

- powyżej 100 s przy prędkości 0,3 m/min;
- poniżej 30 s przy prędkości 3 m/min.

Wymiary wanien procesowych zależne są od liczby dysz i długości procesu. Szerokość robocza modułów wynosi: 730, 830, 930 i 1030 mm. Masę transportowanych płyt podano w tabeli 3.4. Do obliczenia masy przyjęto następujące wartości:

- wymiary płyty obwodu drukowanego: długość: 610 mm, szerokość 460 mm;
- gęstość laminatu FR4 1,8 g/cm³;
- gęstość miedzi 8,96 g/cm³.

W przypadku płytek PCB dwustronnych grubość powłoki miedzianej podana w tabeli 3.5 dotyczy jednej strony panelu. Obliczenia przeprowadzono dla płyt dwustronnych.

Tabela 3.5. Masa transportowanych płyt z laminatu z powłoką miedzianą [g]

Grubość laminatu FR4 [mm]		Grubość powłoki miedzianej								
		0,1	0,5	0,8	1,0	1,2	1,5	2,0	2,4	3,2
0,017		135,990	338,022	489,546	590,562	691,578	843,102	1095,642	1297,674	1701,738
0,035		226,500	428,532	580,056	681,072	782,088	933,612	1186,152	1388,184	1792,248
0,070		402,493	604,525	756,049	857,065	958,081	1109,605	1362,145	1564,177	1968,241
0,105		578,485	780,517	932,041	1033,057	1134,073	1285,597	1538,137	1740,169	2144,233

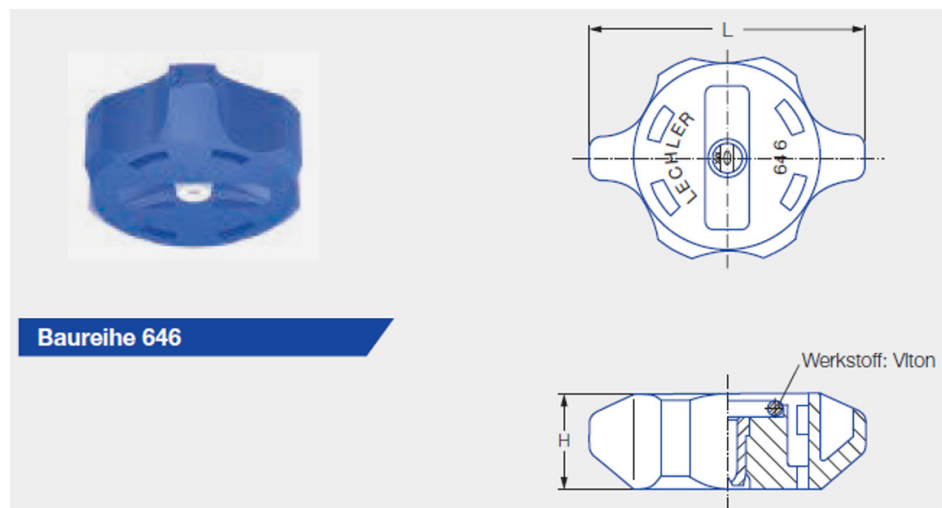
Parametry płyty PCB przyjętej w modelu układów wielocząłowych (ang. *Multi Body Simulation* – MBS):

- masa: 782,088 g;
- wymiary laminatu: długość 610 mm, szerokość 460 mm, grubość 1,2 mm;
- grubość powłoki miedzianej: 0,035 mm.

Zalecaną dyszą procesową jest dysza płaskostrumieniowa z przyłączem bagnetowym firmy Lechler serii 646 (rys. 3.26). Montaż dysz można wykonać ręcznie za pomocą przyłącza bagnetowego. Strumień cieczy jest wstępnie ustawiony, rozkład cieczy jest równomierny. Dysza może być stosowana do czyszczenia taśmy, obróbki powierzchniowej, czyszczenia natryskowego oraz w procesach powlekania. Szczegółowe parametry podano na rys. 3.27.

W systemie transportu stosowane były pompy zanurzeniowe, pionowe firmy Hendor (rys. 3.28). Szczegółowe parametry pompy przedstawiono na rys. 3.29.

Pompy i ich części wykonane są z PP, PVDF lub stali nierdzewnej 316. Pompy pionowe Hendor stosowane są głównie w przemyśle galwanicznym i anodowym.



Rys. 3.26. Dysza płaskostrumieniowa firmy Lechler serii 646.

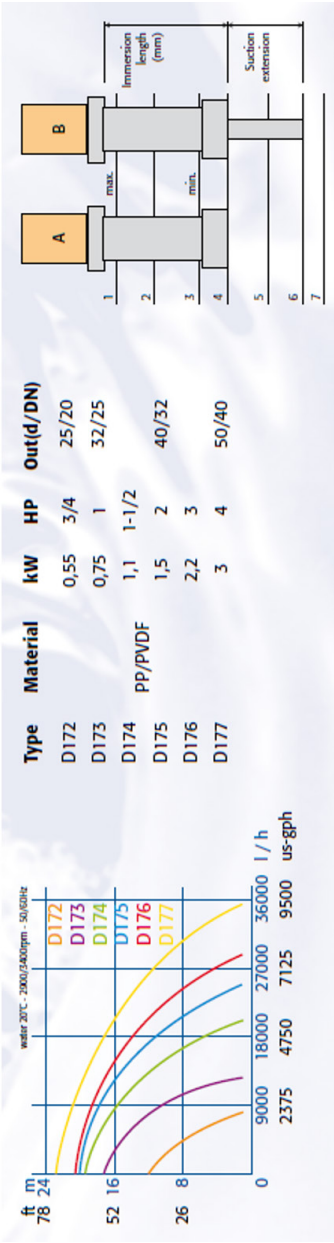
Źródło: (Lechler, 2024)

Kąt strumienia	Kod zamów.		A Ø [mm]	E Ø [mm]	V̇ [l/min]										Szer. strumienia B przy p = 2 bar		
	Typ	Kod mat. 5E			p [bar]											H = 250 mm	H = 500 mm
					0,5	1,0	2,0	3,0	5,0	7,0	10,0						
20°	646.301	•	0,70	0,60	0,16*	0,23*	0,32	0,39	0,51	0,60	0,72	75	150				
	646.361	•	1,00	0,80	0,31*	0,44*	0,63	0,77	1,00	1,18	1,40	80	150				
	646.441	•	1,35	1,10	0,62*	0,88	1,25	1,53	1,98	2,34	2,80	80	155				
	646.481	•	1,50	1,20	0,80*	1,13	1,60	1,96	2,53	2,99	3,58	80	155				
30°	646.302	•	0,70	0,50	0,16*	0,23*	0,32	0,39	0,51	0,60	0,72	85	140				
	646.362	•	1,00	0,70	0,31*	0,44*	0,63	0,77	1,00	1,18	1,40	95	160				
	646.402	•	1,20	0,90	0,50*	0,71	1,00	1,23	1,58	1,87	2,24	105	190				
	646.482	•	1,50	1,10	0,80*	1,13	1,60	1,96	2,53	2,99	3,58	120	225				
60°	646.562	•	2,00	1,50	1,25	1,77	2,50	3,06	3,95	4,68	5,59	135	240				
	646.304	•	0,70	0,40	0,16*	0,23*	0,32	0,39	0,51	0,60	0,72	245	490				
	646.334	•	0,90	0,50	0,22*	0,32*	0,45	0,55	0,71	0,84	1,01	250	495				
	646.364	•	1,00	0,60	0,31*	0,44*	0,63	0,77	1,00	1,18	1,40	255	500				
	646.404	•	1,20	0,80	0,50*	0,71	1,00	1,23	1,58	1,87	2,24	260	510				
	646.444	•	1,35	0,90	0,62	0,88	1,25	1,53	1,98	2,34	2,80	260	510				
	646.484	•	1,50	1,00	0,80	1,13	1,60	1,96	2,53	2,99	3,58	270	525				
	646.514	•	1,65	1,10	0,95	1,34	1,90	2,33	3,00	3,56	4,25	260	510				
	646.564	•	2,00	1,30	1,25	1,77	2,50	3,06	3,95	4,68	5,59	260	505				
	646.604	•	2,20	1,50	1,58	2,23	3,15	3,86	4,98	5,89	7,04	265	505				
	646.306	•	0,70	0,40	0,16*	0,23*	0,32	0,39	0,51	0,60	0,72	425	840				
	646.336	•	0,90	0,50	0,22*	0,32*	0,45	0,55	0,71	0,84	1,01	425	840				
90°	646.366	•	1,00	0,50	0,31*	0,44*	0,63	0,77	1,00	1,18	1,41	425	840				
	646.406	•	1,20	0,70	0,50*	0,71	1,00	1,23	1,58	1,87	2,24	425	835				
	646.446	•	1,35	0,80	0,62*	0,88	1,25	1,53	1,98	2,34	2,80	425	835				
	646.486	•	1,50	0,80	0,80*	1,13	1,60	1,96	2,53	2,99	3,58	425	830				
	646.516	•	1,65	0,90	0,95*	1,34	1,90	2,33	3,00	3,56	4,25	425	830				
	646.566	•	2,00	1,10	1,25	1,77	2,50	3,06	3,95	4,68	5,59	425	825				
	646.606	•	2,20	1,20	1,58	2,23	3,15	3,86	4,98	5,89	7,04	425	820				

Rys. 3.27. Parametry dysz procesowych firmy Lechler serii 646. Źródło: (Lechler, 2024)



Rys. 3.28. Pompa pionowa
Hendor D172.
Źródło: (Hendor Pompen, 2024)



Rys. 3.29. Parametry pompy Hendor D172.
Źródło: (Hendor Pompen, 2024)

3.7. Symulacje numeryczne MBS I i II wariantu transportu fluidalnego

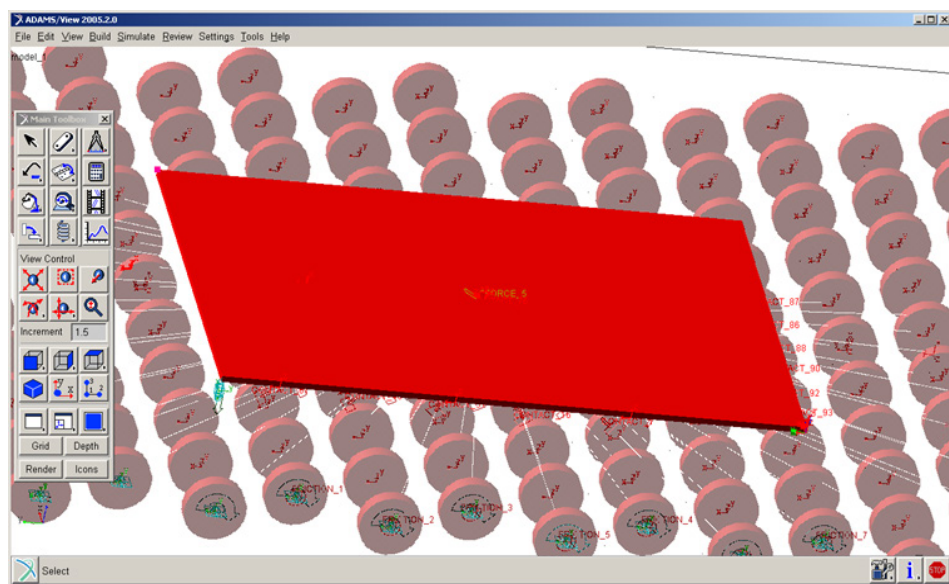
Prace badawcze rozpoczęto od weryfikacji na drodze symulacji opracowanych wstępnie koncepcji rozwiązań transportu. Jedną z zastosowanych metod symulacyjnych była metoda MBS.

Układ wieloczłonowy jest modelem abstrakcyjnym układu rzeczywistego, budowanym przy założeniu, że elementy układu rzeczywistego można traktować jako człony sztywne lub podatne połączone ze sobą w różny sposób i poruszające się pod działaniem sił i momentów różnego typu (Wojtyra i Frączek, 2007).

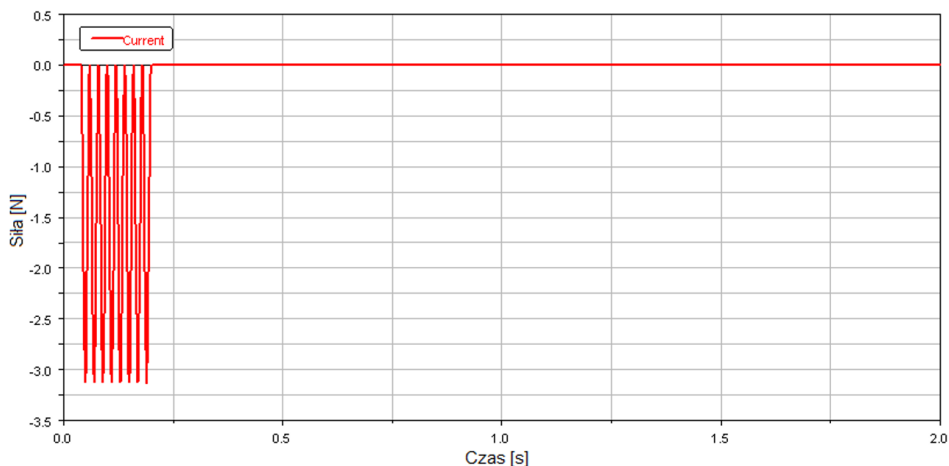
Metoda układów wieloczłonowych jest to ogólna przyjęta nazwa metod modelowania, analizy i syntezy układów rzeczywistych, traktowanych jako układ wieloczłonowy. Umożliwia modelowanie dynamicznego zachowania układu złożonego z wielu połączonych ze sobą ciał lub komponentów, w celu przewidywania ruchu, sił i naprężeń złożonych układów mechanicznych, których nie można łatwo analizować za pomocą tradycyjnych metod. W symulacji wieloobiektowej każdy komponent systemu jest reprezentowany przez ciało sztywne, co oznacza, że jego kształt i rozmiar nie zmieniają się podczas symulacji. Ciała sztywne są połączone ze sobą za pomocą różnych typów połączeń lub ograniczeń, takich jak pary kinematyczne obrotowe i translacyjne czy przeguby kulowe. Symulując ruch tych połączonych ciał w czasie, algorytmy oprogramowania do symulacji wieloczłonowej umożliwiają przewidywanie, jak system będzie się zachowywał w różnych warunkach, np. zmiany obciążeń lub danych wejściowych. Pozwala to na ocenę wydajności systemu, przeprowadzenie procesu optymalizacji i zidentyfikowanie potencjalnych problemów, zanim wystąpią w świecie rzeczywistym (Marin, Dumitru i Vlase, 2022; Frączek i Wojtyra, 2007).

Zbudowany został model numeryczny systemu transportowego według wariantu I. Mając na uwadze przekazane wytyczne konstrukcyjne, przyjęto, że transportowana będzie płyta PCB o długości 610 mm, szerokości 460 mm, dwustronnie pokryta miedzą. Grubość laminatu będzie wynosiła 1,2 mm, a grubość powłoki miedzianej 0,035 mm. Model geometryczny do obliczeń metodą układów wieloczłonowych składa się z brył sztywnych i par kinematycznych. W pierwszym wariantcie transportu rolki są napędzane, a płyta PCB dociskana do nich wskutek oddziaływania cieczy pod ciśnieniem skierowa-

nym prostopadle do płaszczyzny płytki. We wstępnych analizach wykonany został model obliczeniowy składający się z rolek z parą kinematyczną obrotową o jednym stopniu swobody; siła dociskająca została zamieniona na element dociskowy, który z zadaną siłą uderzał w płytkę (element sztywny z parą kinematyczną postępową, sprężyną oraz kulą uderzającą w płytkę). Model ten ze względów obliczeniowych (tj. na dużą liczbę kontaktów, która sprawia, że ze względów technicznych nie było możliwości wykonania obliczeń dla tak wielu elementów typu CONTACT) został zmodyfikowany: w miejsce uderzających kulek wprowadzona została siła skupiona, działająca na płytkę z zadaną wartością i w zadanych odstępach czasowych, co miało odwzorowywać natrysk cieczy procesowej przez dysze. Model zastosowany w symulacjach MBS składał się z rolek z parą kinematyczną obrotową o jednym stopniu swobody. Oddziaływanie ciśnienia cieczy zamodelowano przez wprowadzenie siły skupionej, działającej na płytkę prostopadle do jej płaszczyzny z zadaną wartością i w zadanych odstępach czasowych (rys. 3.30). Jako wymuszenie zastosowano impulsową siłę skupioną (rys. 3.31).

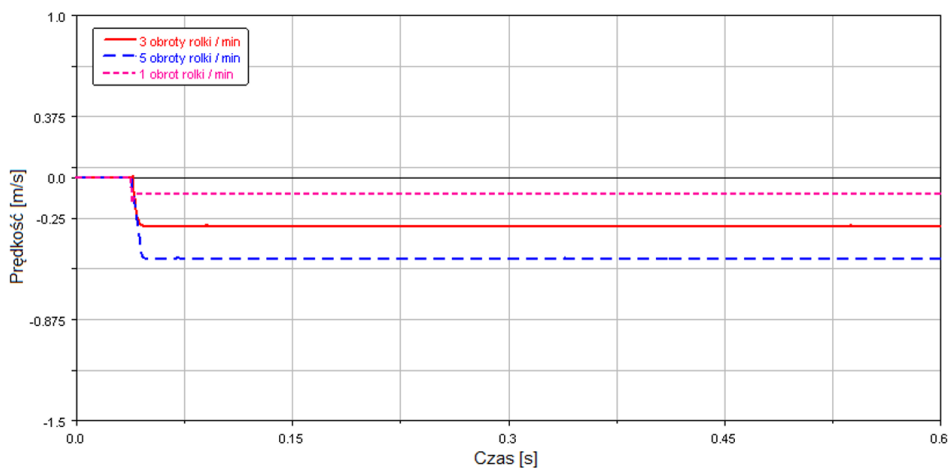


Rys. 3.30. Model numeryczny transportera fluidalnego w systemie MBS ADAMS
– wariant I. Źródło: (Krot, Górski i Matuszewicz, 2013)



Rys. 3.31. Wymuszenie – przykładowa impulsowa siła skupiona

Następnie wykonano obliczenia numeryczne z uwzględnieniem działania siły impulsowej o maksymalnej wartości 50 N i trzech wartościach prędkości kątowej napędzanych rolek: $\omega_1 = 1$ obr/min; $\omega_2 = 3$ obr/min, $\omega_3 = 5$ obr/min. Wykres prędkości liniowej transportowanej płyty przy kolejnych wartościach prędkości kątowych rolek przedstawia rys. 3.32.

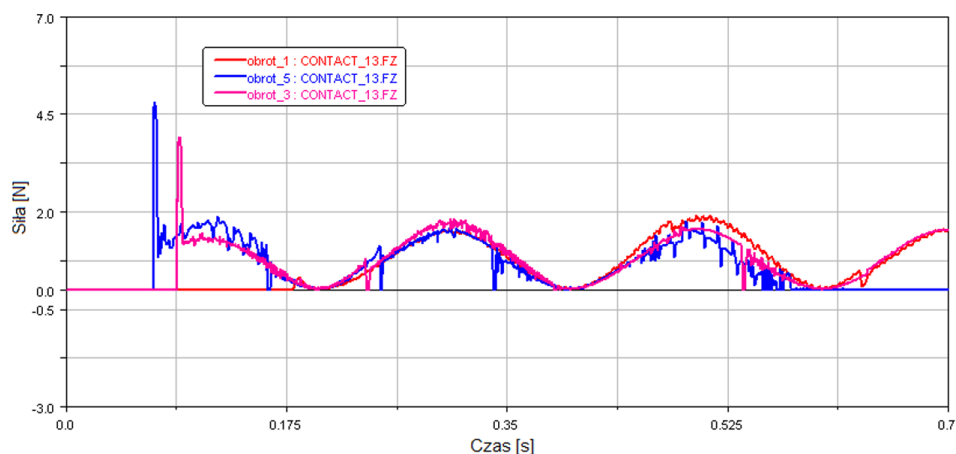


Rys. 3.32. Wyniki symulacji MBS, wariant I – prędkości liniowe płytki.

Źródło: (Górski, Krot i Matuszewicz, 2016)

Przeprowadzono symulacje, w wyniku których wyznaczono wartości sił występujących na styku rolek z transportowaną płytką obciążoną siłą impul-

sową 50 N. Na rysunku 3.33 przedstawiono przebiegi zmian sił w czasie dla trzech par kontaktów płyta PCB–rolka.



Rys. 3.33. Wyniki symulacji MBS, wariant I – siły w kontakcie płytki z rolkami.

Źródło: (Górski, Krot i Matuszewicz, 2016)

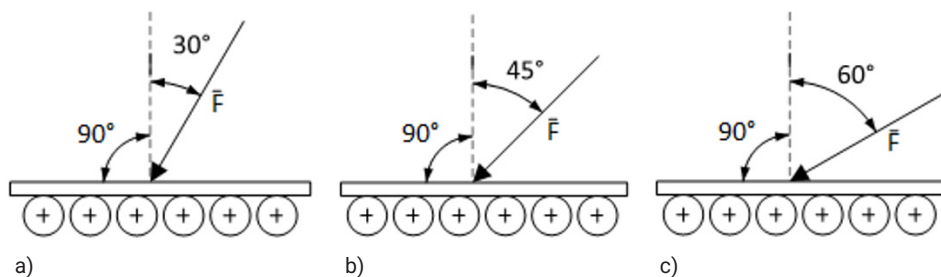
Wartości sił w kontakcie pojedyncza rolka–płyta PCB zależne są od przyjętej wartości siły impulsowej odwzorowującej oddziaływanie strumieni cieczy z dysz procesowych. W przypadku geometrii płytki, gdzie długość wynosiła 610 mm, a szerokości 460 mm, znane były rozstaw osi rolek transportowych i odległość między rolkami, wartość siły impulsowej była równa 50 N pojedyncza siła w miejscu kontaktu rolki i płytki PCB wynosiła maksymalnie 2 N.

Analizując wykresy na rys. 3.33, zauważyć można skokowe zmiany wartości sił o znacznej amplitudzie. Zmiany na wykresach jednoznacznie wskazują, że dochodzi do uderzeń rolek o płytkę. Takie obciążenia o charakterze udarowym mogą prowadzić do pęknięć płytek. Ponadto na początku symulacji zarejestrowano skokowy wzrost wartości siły, co wiąże się z etapem, kiedy działanie siły wymuszającej powoduje kontakt płytki z rolkami, a następnie stabilizowanie się siły w kontakcie płytki z rolkami w krótkim czasie. Takie zjawisko będzie miało miejsce przy każdej kolejnej sekcji rolek.

Podsumowując wyniki symulacji MBS, należy podkreślić, że wyżej opisany wariant I transportu można łatwo kontrolować, utrzymując stałą prędkość transportowanej płytki. Występują skokowe przyrosty sił w kontakcie płytki z rolkami, co powoduje obciążenia o charakterze udarowym. W celu minimalizacji tego zjawiska należy rozważyć zastosowanie na rolkach podatnego materiału lub dodatkowej miękkiej okładziny, których zadaniem byłaby amortyzacja obciążeń udarowych.

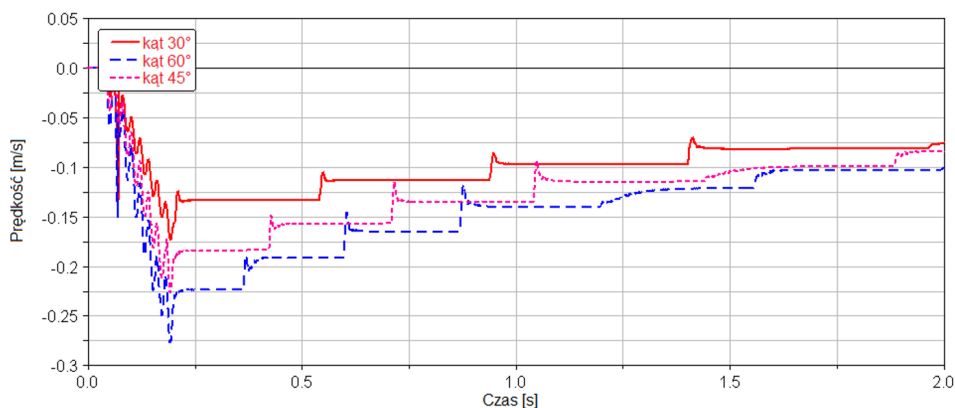
Wariant II transportu fluidalnego charakteryzuje się tym, że rolki nie są napędzane, a ruch translacyjny płytki wymuszany jest oddziaływaniem strumienia cieczy wydobywającym się przez dysze usytuowane pod kątem do kierunku ortogonalnego względem płaszczyzny płyty. W modelu obliczeniowym strumień cieczy zastąpiono siłą działającą pod kątem na płytę.

Model numeryczny według wariantu I został zmodyfikowany przez wyłączenie wymuszenia (tj. napędu rolek) i zmianę kierunku działania siły skupionej na płytę. Siła w wyniku oddziaływania na płytkę powoduje obrót rolek transportowych spowodowany siłą tarcia między rolkami a płytką. Siła wymuszająca miała stałą wartość 50 N. Przyjęto trzy różne kąty przyłożenia siły do transportowanej płyty: 30, 45 i 60° (rys. 3.34). Po przeprowadzeniu symulacji otrzymano wartości prędkości płytki przy różnych kątach przyłożenia siły (rys. 3.35).



Rys. 3.34. Kąty działania siły wymuszającej transport płyty, wariant II:

a) 30°, b) 45°, c) 60°



Rys. 3.35. Wyniki symulacji MBS wariantu II – prędkości płytki przy trzech wartościach kątów przyłożenia siły wymuszającej

Na rysunku 3.35 zauważyć można duże zmiany prędkości w początkowej fazie ruchu, szczególnie w przypadku kątów 30 i 60°. Kolejne uskoki na wykresach prędkości (od ok. 0,5 s) związane są z przejazdem płyty przez kolejne sekcje rolek, czego konsekwencją jest zmniejszenie prędkości widoczne na wykresach jako uskoki. Zauważalne na wykresach zakłócenia prędkości mają istotny wpływ na proces transportu z punktu widzenia ustalenia parametrów sterowania procesem transportu płytki w stanie ustalonym (ze stałą prędkością). Prędkość płyty PCB zależy od kąta nachylenia dysz, ponieważ wraz ze wzrostem kąta przyłożenia siły rośnie jej składowa pozioma – zgodna z założonym kierunkiem transportu. Czynnikiem ten obok wydajności pompy będzie istotny przy ustalaniu parametrów sterowania prędkością procesu.

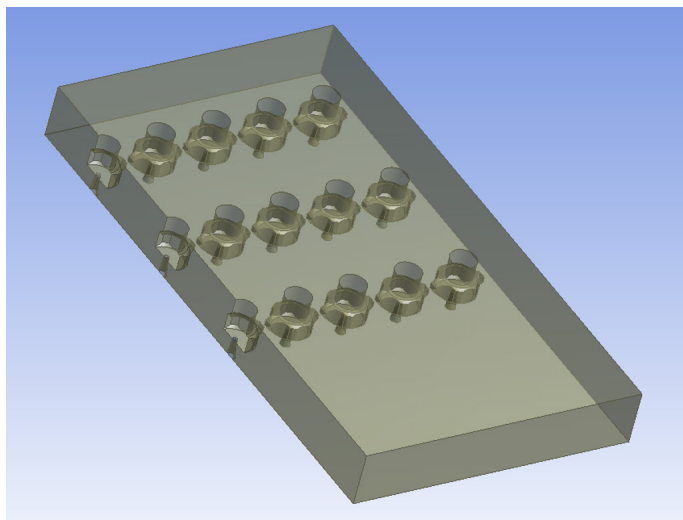
Szczegółowe wyniki symulacji metodą MBS zamieszczono w publikacjach (Krot, Górski i Matusiewicz, 2013; Górski, Krot i Matusiewicz, 2016).

3.8. Symulacje metodą CFD wariantu I i II transportu fluidalnego

Numeryczna mechanika płynów (ang. *computational fluid dynamics* – CFD) jest metodą matematycznego modelowania ruchu płynów oraz związanych z tym zjawisk, np. przepływu ciepła, ruchu cząstek fazy stałej, przepływu mieszanin czy reakcji chemicznych. Stosując metodę CFD w obliczeniach przepływu, można wyznaczyć przybliżone rozwiązanie danego przypadku. Możliwe staje się określenie wartości prędkości, ciśnienia, temperatury, stopnia wymieszania czy przereagowania substancji, a także innych parametrów związanych z przepływem w dowolnym punkcie przestrzeni obliczeniowej (Hosain i Fdhila, 2015).

Dzięki szybkiemu rozwojowi metod numerycznych, jaki dokonał się w ostatnich latach, oraz ciągłemu wzrostowi mocy obliczeniowej komputerów metody CFD stały się popularne. Dostępne na rynku pakiety oprogramowania do analiz inżynierskich (ang. *Computer Aided Engineering* – CAE) udostępniają użytkownikowi odpowiedni moduł do symulacji przepływów z wykorzystaniem metod CFD (Wang, Ju, Wu, Qiu, Liu, Tian, Su, 2024). Większość obecnych programów komercyjnych bazuje na rozwiązaniu równań Naviera-Stokesa, które opisują ruch płynu lepkiego. W tym celu wykorzystywane są głównie trzy metody: różnic skończonych, elementów skończonych oraz objętości skończonych, z których tylko ta ostatnia znalazła najszerze zastosowanie w dziedzinie obliczeń numerycznej mechaniki płynów (Anderson, 1995).

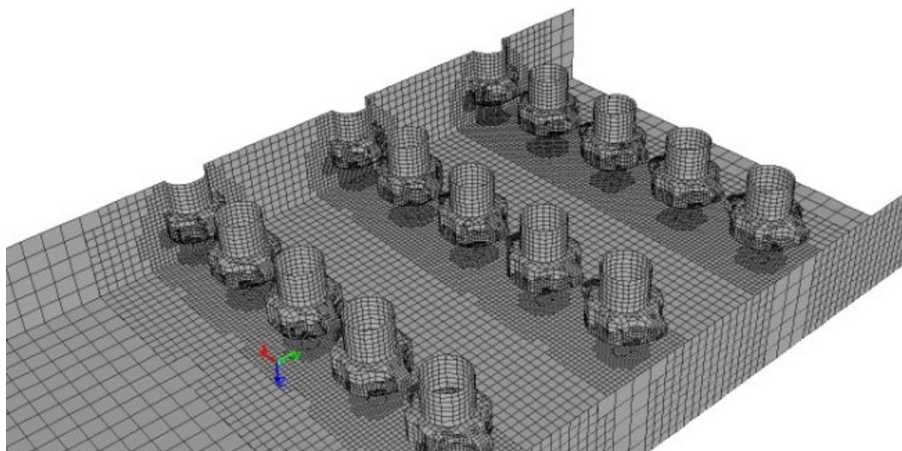
Opracowane warianty transportu symulowano z zastosowaniem CFD. Na podstawie analizy wariantu I transportu fluidalnego opracowano model geometryczny CAD 3D. Zamodelowano trzy rzędy dysz procesowych oraz transportowaną płytę (rys. 3.36).



Rys. 3.36. Model CAD 3D do symulacji CFD wariantu I

W obliczeniach zastosowano oprogramowanie ANSYS-FLUENT. Wykorzystując model geometryczny, wykonano model dyskretny – utworzona została siatka z elementów 3D metodą CutCell.

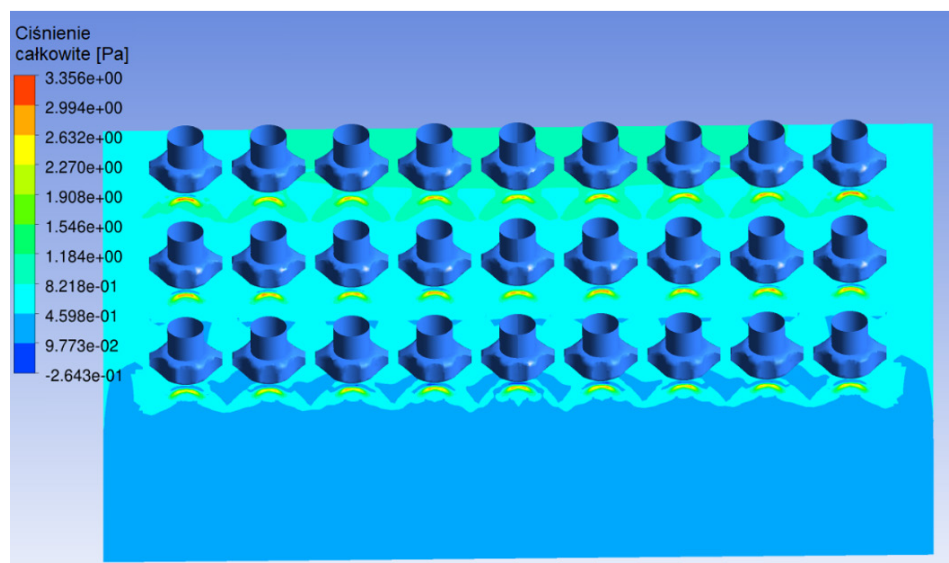
Dla odległości dysz od płyty 15 mm siatka została zbudowana z zastosowaniem elementów hexa (rys. 3.37).



Rys. 3.37. Symulacje CFD wariantu I – model dyskretny z elementami hekso

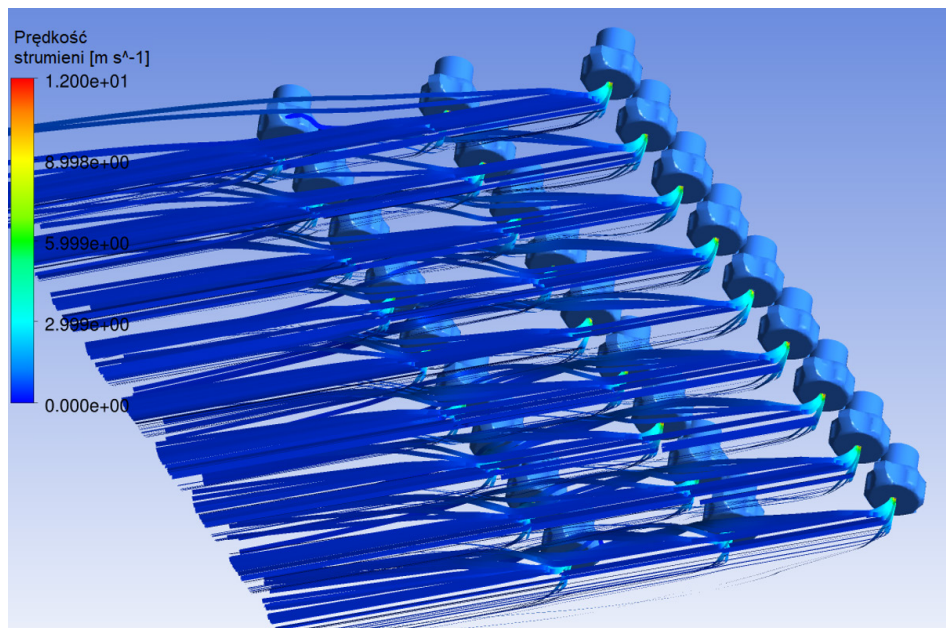
Zakładając odległości dysz od płyty 30 mm, siatka zbudowano z elementów typu terta. W obliczeniach uwzględniono różne wartości natężeń przepływu w pompie zasilającej, a każdemu natężeniu przepływu odpowiadała inna prędkość wypływu cieczy z dysz. Obliczenia prowadzono metodą RANS, z wykorzystaniem dwurównaniowego modelu turbulencji k- ϵ i modelu DPM.

Obliczenia przeprowadzone metodą CFD dotyczyły płyty PCB transportowanej na rolkach napędzanych z prędkością 0,5 m/s. Na rysunku 3.38 przedstawiono rozkład ciśnienia statycznego i dynamicznego na płycie, płyta znajduje się w odległości 15 mm od dysz, transportowana jest z prędkością $V=0,5$ m/s. Ciśnienie zmienia się wraz ze zmianami natężenia przepływu w pompie zasilającej i powoduje siłę dociskającą płytkę do rolek transportowych.



Rys. 3.38. Symulacje CFD wariantu I – rozkład ciśnienia statycznego i dynamicznego na płycie PCB, odległość dysz od płyty 15 mm, prędkość transportu płyty 0,5 m/s

Metody CFD umożliwiają nie tylko przeprowadzenie analiz dynamicznych, ale również otrzymanie wyników symulacji przepływu cieczy. Na rysunku 3.39 przedstawiono rozkład prędkości strumieni cieczy procesowej po wypływie z dysz procesowych w wariantcie I, gdy odległość dysz od płyty PCB wynosi 15 mm, a prędkość transportu płyty $V=0,5$ m/s.



Rys. 3.39. Symulacje CFD wariantu I – rozkład prędkości strumieni cieczy, odległość dysz od płyty 15 mm, prędkość transportu płyty 0,5 m/s

Charakter oraz prędkość wypływu cieczy z dysz procesowych mogą być przydatne do szacowania szybkości trawienia obrabianych płyt. Prędkości strug oraz ich rozkład na płycie pozwalają wnioskować o warstwie miedzi usuwanej podczas trawienia, a przez to dostarczyć wytycznych do doboru dysz procesowych oraz projektowania nie tylko ich rozmieszczenia, ale również długości sekcji trawiących linii produkcyjnych.

Wyniki symulacji CFD wariantu I zawierające wartości siły dociskającej płytkę przy odległości dysz od płyty PCB wynoszącej 15 mm zestawiono w tabeli 3.6, a wartości charakterystyczne przy odległości 30 mm w tabeli 3.7.

Tabela 3.6. Wyniki symulacji CFD wariantu I
– siły docisku przy odległości dysz od płytki wynoszącej 15 mm

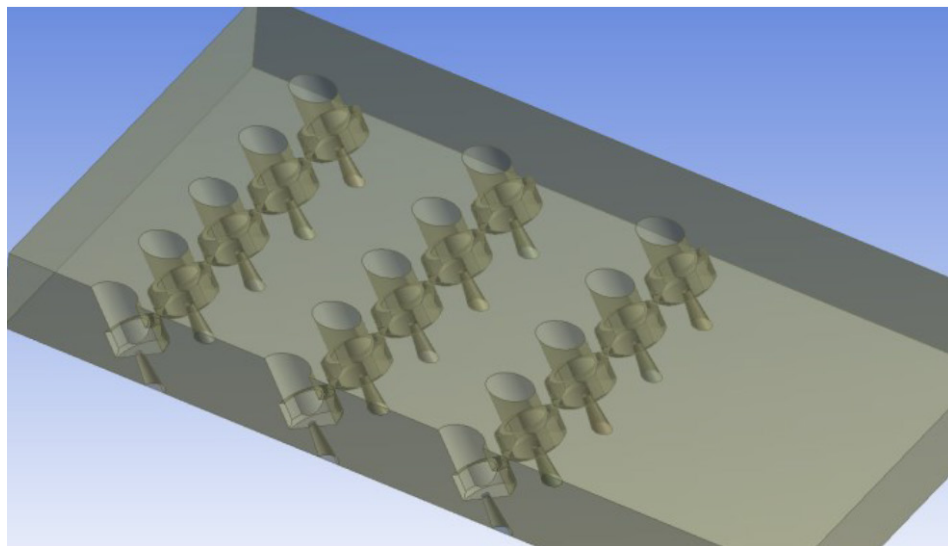
Wydajność pompy [%]	Siła docisku płyty [N]
40	34,3
60	41,6
80	47,2
100	54,9

Tabela 3.7. Wyniki symulacji CFD wariantu I – siły docisku przy odległości dysz od płyty wynoszącej 30 mm

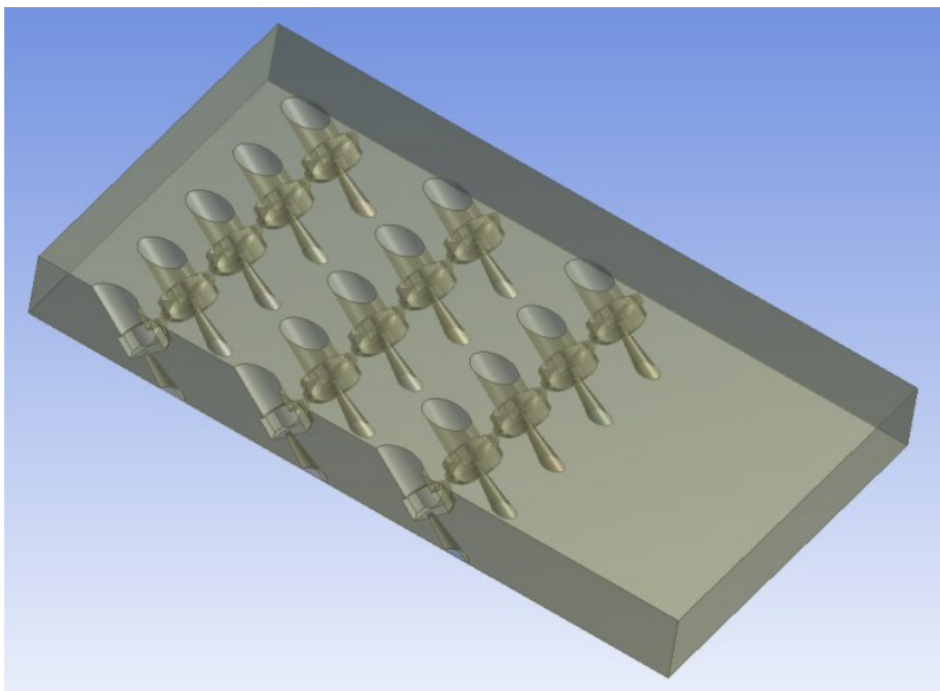
Wydajność pompy [%]	Siła docisku płyty [N]
40	31,8
60	39,5
80	45,7
100	52,8

Porównując wartości sił docisku, można zauważyć, że wzrost odległości wylotów dysz od płyty powoduje zmniejszenie siły docisku płyty PCB do rolek transportowych.

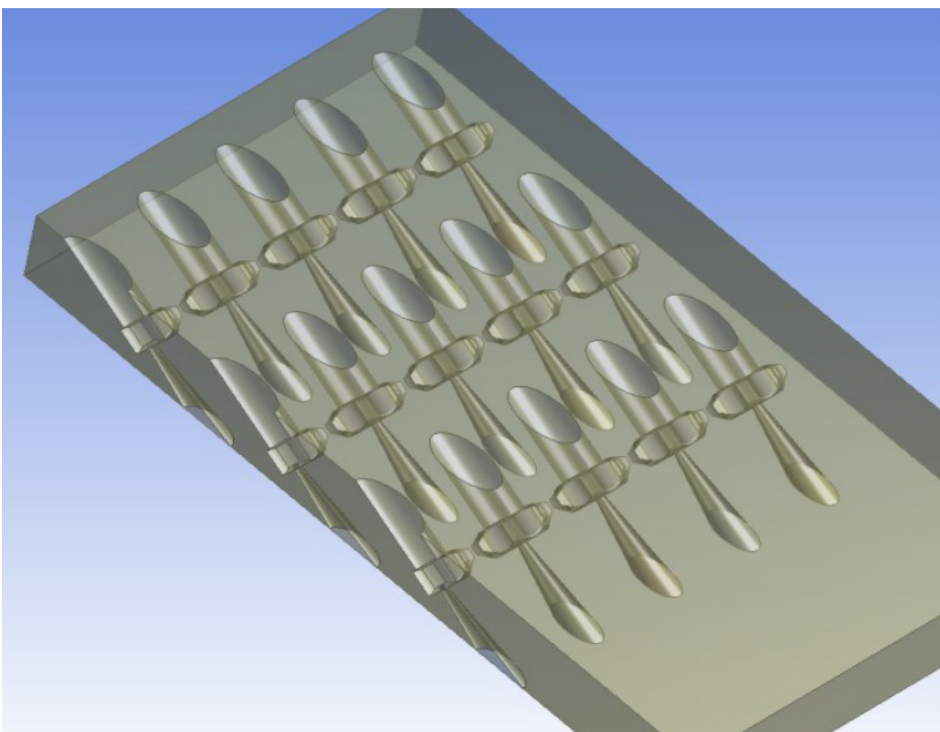
Badając wariant II transportu fluidalnego przeprowadzono serię obliczeń jak w przypadku wariantu I. Opracowano model geometryczny CAD 3D z trzema rzędami dysz procesowych: warianty z dyszami nachylonymi pod kątem 30, 45 i 60° w stosunku to kierunku ortogonalnego do transportowanej płyty PCB (rys. 3.40–3.42).



Rys. 3.40. Symulacje CFD wariantu II – model CAD 3D, kąt nachylenia dysz 30°

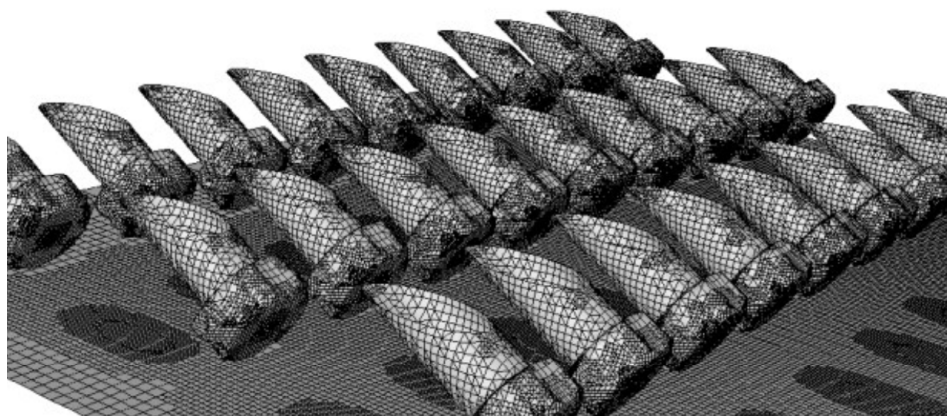


Rys. 3.41. Symulacje CFD wariantu II – model CAD 3D, kąt nachylenia dysz 45°



Rys. 3.42. Symulacje CFD wariantu II – model CAD 3D, kąt nachylenia dysz 60°

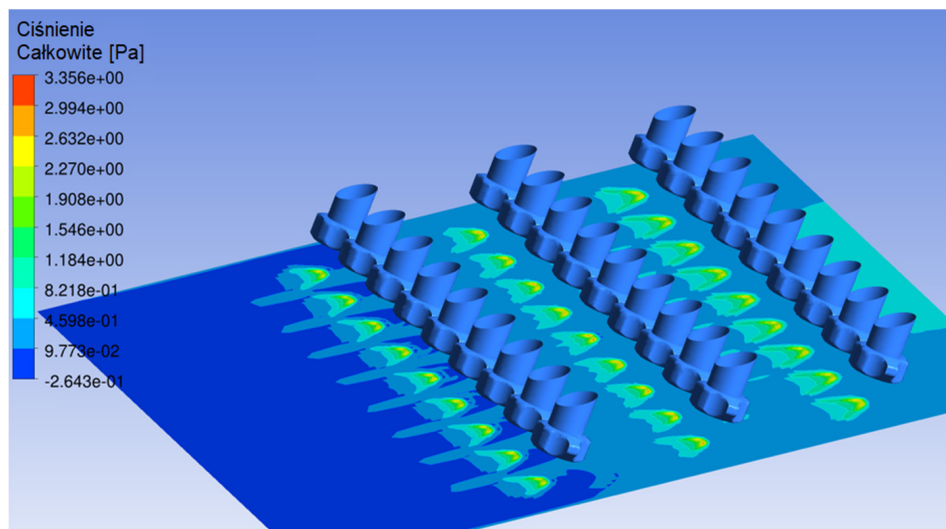
W obliczeniach zastosowano oprogramowanie ANSYS-FLUENT. Wykorzystując model geometryczny, wykonano model dyskretny – utworzona została siatka z elementów 3D metodą CutCell, z zastosowaniem elementów hexa (rys. 3.43).



Rys. 3.43. Symulacje CFD wariantu II – model dyskretny z elementami hekso, kąt nachylenia dysz 60° , odległość dysz od płytki PCB 15 mm

Obliczenia przeprowadzono metodą RANS z uwzględnieniem zmiennych natężeń przepływu na pompie zasilającej. Każdemu natężeniu przepływu odpowiadała inna prędkość wypływu cieczy z dysz. Wykorzystano dwurównaniowy model turbulencji k- ϵ . Obliczenia prowadzono z uwzględnieniem modelu DPM jako stacjonarne z niestacjonarnym wtryskiem cząstek wody przez dyszę. Na rysunku 3.44 przedstawiony jest rozkład ciśnienia statycznego i dynamicznego na płycie, gdy dysze są w odległości 15 mm od płyty, a kąt nachylenia dysz wynosi 30° .

Ciśnienie na powierzchni płyty zmienia się wraz ze zmianą odległości dysz od płyty, kątów nachylenia dysz względem płyty i zmianami natężenia przepływu w pompie zasilającej. Oddziaływanie ciśnienia powoduje generowanie siły dociskającej płytę do rolek transportowych. Wyniki symulacji CFD zawierające wartości sił dociskających płytę przy odległości dysz od płyty wynoszącej 15 mm podano w tabelach 3.8 i 3.9.



Rys. 3.44. Rozkład ciśnienia statycznego i dynamicznego na płycie w wariancie II – odległość dysz od płyty 15 mm, kąt nachylenia dysz 30°

Tabela 3.8. Wyniki symulacji CFD wariantu II – siły docisku płyt przy odległości dysz od płyty wynoszącej 15 mm

Wydajność pompy [%]	Kąt dysz 30°	Kąt dysz 45°	Kąt dysz 60°
	siła docisku płytki [N]		
40	14,2	12,4	11,2
60	21,3	17,0	16,9
80	28,7	25,5	20,4
100	30,8	27,4	25,6

Tabela 3.9. Wyniki symulacji CFD wariantu II – siły docisku płyt przy odległości dysz od płyty wynoszącej 30 mm

Wydajność pompy [%]	Kąt dysz 30°	Kąt dysz 45°	Kąt dysz 60°
	siła docisku płytki [N]		
40	10,1	5,4	0,5
60	11,5	8,7	3,4
80	17,9	10,2	5,8
100	25,7	15,5	6,2

Analizując wyniki symulacji CFD (tabela 3.8 i 3.9), można zauważyć zależność siły docisku płyty PCB do rolek transportowych od kątów nachylenia dysz względem płyty: im większy jest ten kąt, tym mniejsza jest wartość składowej siły ortogonalnej do płaszczyzny płyty. Jednak wraz ze wzrostem kąta nachylenia rośnie wartość składowej stycznej siły oddziaływania na płaszczyznę płyty. Regulując system transportowy, należy zmieniać wydajność pompy, kąt przyłożenia dysz procesowych oraz odległość wylotów dysz od transportowanej płyty. Zmieniając te wartości, można wpływać na siłę dociskającą płytę do rolek, prędkość transportu płyty, a przez to na intensywność procesów chemicznych zachodzących na powierzchni płytki. Częściowe wyników analiz symulacyjnych transportu fluidalnego opublikowano w (Górski, Krot i Matusiewicz, 2016; Górski, Krot, Zawislak, Górnicz i Matusiewicz, 2017).

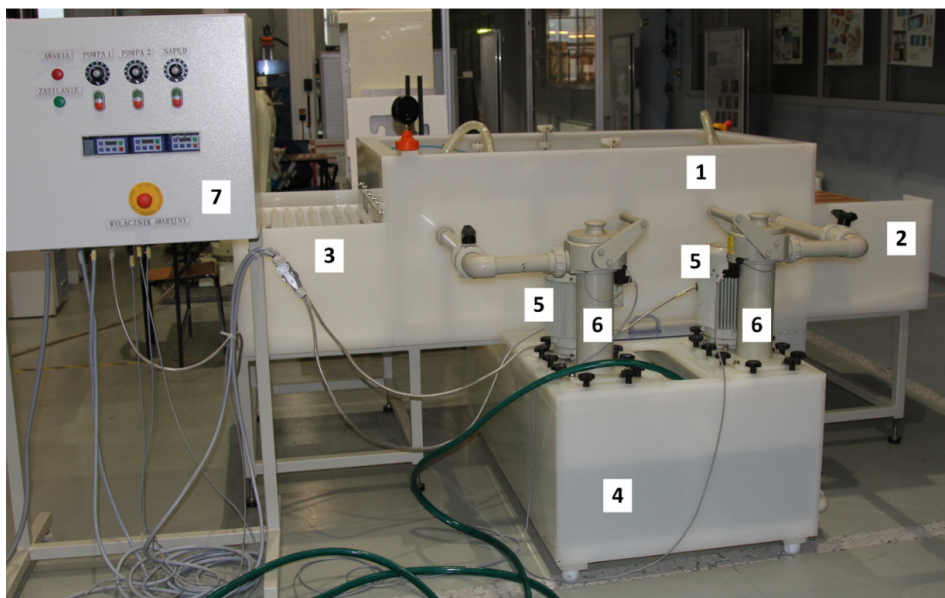
3.9. Badania laboratoryjne wariantu I i II transportu fluidalnego

W celu weryfikacji opracowanych wariantów transportu fluidalnego oraz sprawdzenia zbieżności wyników symulacji z pomiarami przeprowadzono testy i pomiary na stanowisku testowym. Z uwagi na przeznaczenie transportatorów kluczowy był pomiar sił oddziaływania cieczy procesowej na transportowany element. Stanowisko badawcze przedstawia rys. 3.45.

W celu zbadania wariantu I na stanowisku testowym zamontowano rolki z napędem oraz instalację z dyszami natryskowymi usytuowanymi prostopadle to płaszczyzny transportowanej płytki (rys. 3.46).

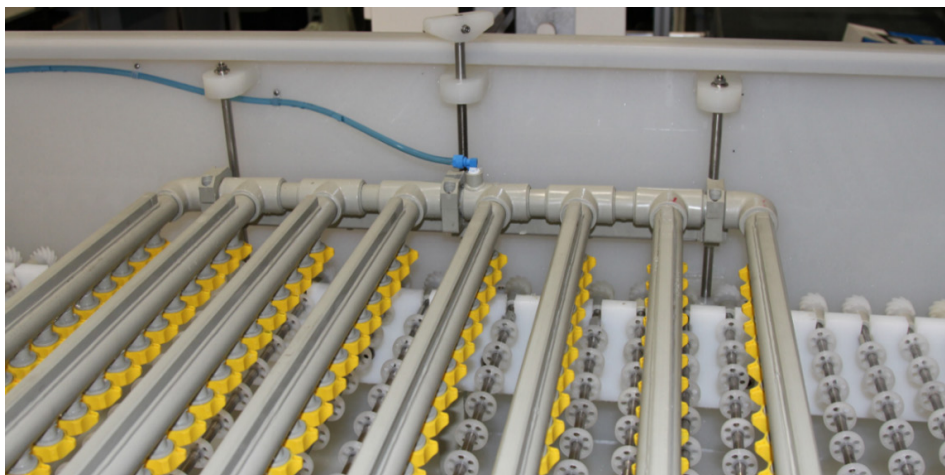
W testowanym rozwiązaniu kluczowa będzie znajomość sił działających na transportowaną płytę PCB, wynikających z oddziaływania na transportowany element ciśnienia cieczy roboczej ukierunkowanego przez dysze procesowe. Z uwagi na możliwość przeprowadzenia pomiarów sił działających na transportowaną płytę PCB zdecydowano się usytuować ją na dodatkowej ramie pomiarowej, umożliwiającej zamontowanie czujników siły (rys. 4.47). Układu pomiarowy składa się z ramy (D) zamocowanej na konstrukcji wanny procesowej, na ramie znajdują się czujniki siły (C), na czujnikach siły oparta jest płyta PCB obciążana ciśnieniem cieczy kierowanej przez dysze (A).

W układzie pomiarowym zastosowano czujniki siły do pomiaru nacisku Wobit KMB52 z zakresem pomiarowym od 0 do 500 N, o stopniu ochrony IP66 (rys. 3.48). Model CAD 3D ramy pomiarowej przedstawia rys. 3.49, natomiast ramę zamontowaną na stanowisku pomiarowym rys. 3.50.

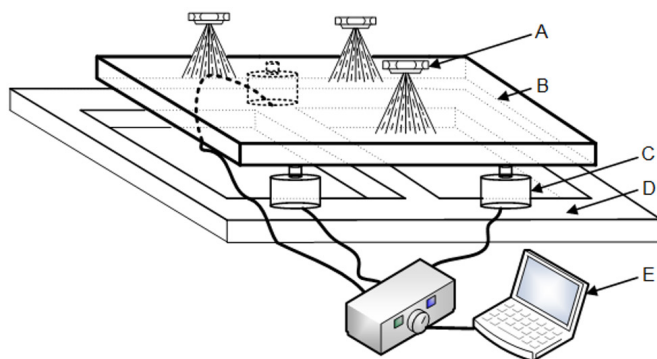


Rys. 3.45. Stanowisko do badania transportu fluidalnego:

1 – wanna procesowa, 2 – stanowisko załadowcze,
3 – stanowisko wyładowcze, 4 – zbiornik na ciecz procesową, 5 – dwie niezależne pompy, 6 – filtry, 7 – układ sterowania pompami i napędem rolek



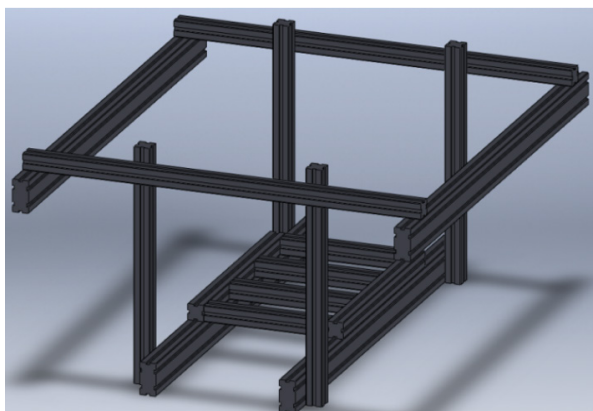
Rys. 3.46. Wnętrze wanny procesowej do badania wariantu I



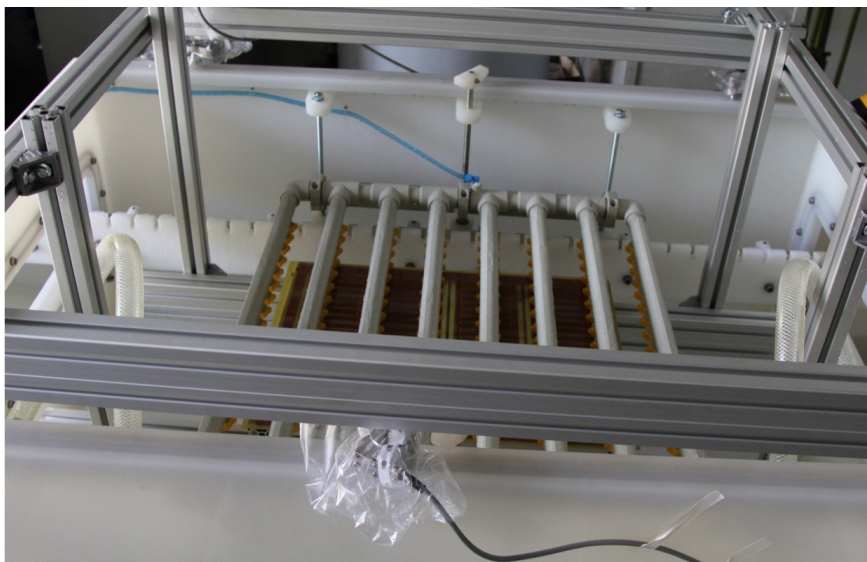
Rys. 3.47. Schemat układu pomiarowego: A – dysze procesowe, B – transportowana płyta PCB, C – czujniki siły, D – rama pomiarowa, E – wzmacniacz sygnałów SPIDER z komputerem do rejestracji wartości sił.
Źródło: (Krot, Górski i Matusewicz, 2013)



Rys. 3.48. Czujnik siły Wobit KMB52 500 N. Źródło: (Wobit, 2024)



Rys. 3.49. Przestrzenna rama do układu pomiarowego sił

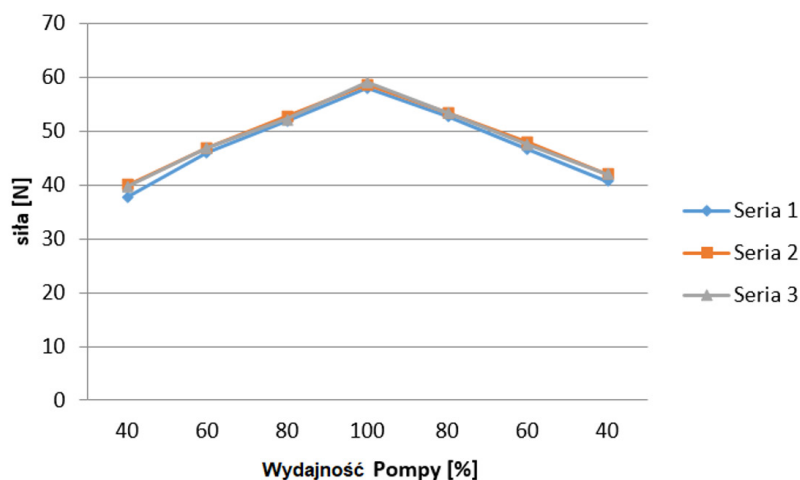


Rys.3.50. Rama do pomiaru sił na stanowisku testowym

Na rysunku 3.50, między ramą i górną krawędzią wanny procesowej widoczny jest czujnik siły zabezpieczony przed przypadkowym zamoczeniem cieczą procesową. Dwa pozostałe czujniki siły widoczne są na przeciwległej górnej krawędzi wanny procesowej, w narożach ramy pomiarowej. Pomiary sił oddziaływania na płytę przeprowadzono przy dyszach skierowanych prostopadłe na płytę, w trakcie pomiarów zmieniano odległości wylotów dysz od płyty oraz wydajność pompy, tj. zwiększano ją od 40 do 100% i ponownie zmniejszano do 40%, ze skokiem co 20%. Wyniki pomiarów w przypadku, gdy odległość dysz od płyty wynosi 15 mm, przedstawiono w tabeli 3.10 i na rys. 3.51.

Tabela 3.10. Wyniki pomiarów na stanowisku testowym:
siły działające na płytę, wariant I, odległość dysz od płyty 15 mm

Wydajność pompy [%]	Seria 1	Seria 2	Seria 3
	siła docisku płyty[N]		
40	37,77	39,98	39,68
60	45,92	46,82	46,95
80	51,82	52,73	52,21
100	57,91	58,69	58,97
80	52,84	53,42	53,32
60	46,75	47,88	47,47
40	40,67	41,94	41,94



Rys. 3.51. Wyniki pomiarów na stanowisku testowym:
wykres sił działających na płytę, wariant I, odległość dysz od płyty 15 mm

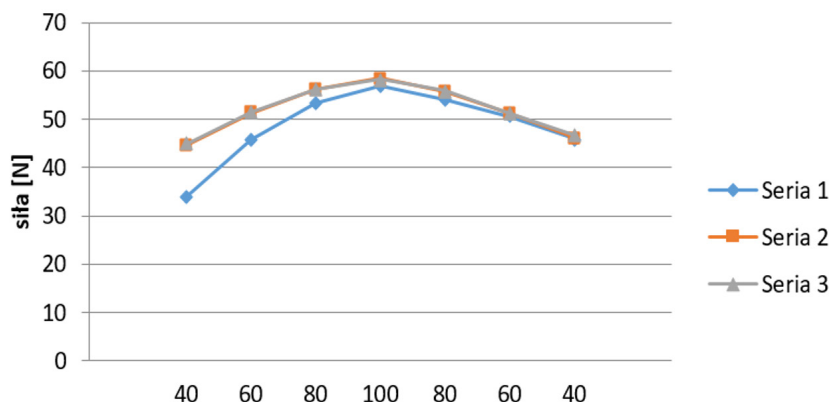
Wyniki pomiarów wariantu I, gdy odległość dysz od płyty wynosi 30 mm, zawiera tabela 3.11 i rys. 3.52.

Tabela 3.11. Wyniki pomiarów na stanowisku testowym:
siły działające na płytę, wariant I, odległość dysz od płyty 30 mm

Wydajność pompy [%]	Seria 1	Seria 2	Seria 3
	siła docisku płyty [N]		
40	33,96	44,51	44,91
60	45,74	51,33	51,40
80	53,27	56,15	56,18
100	56,80	58,47	58,22
80	53,99	55,62	55,84
60	50,62	51,22	51,23
40	45,92	46,14	46,65

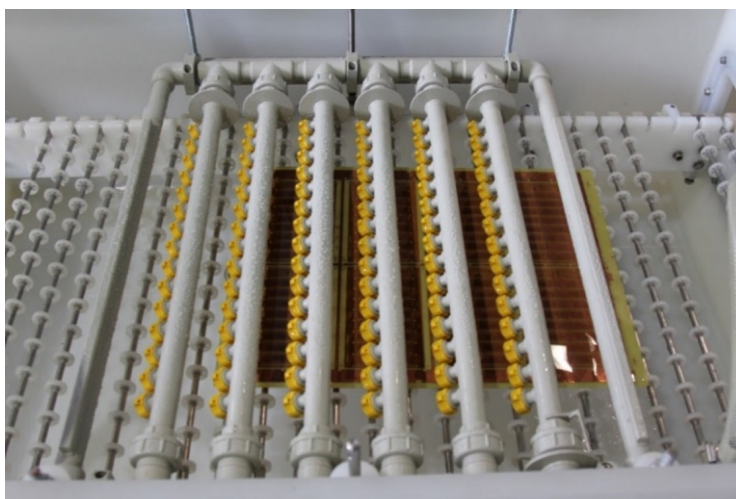
Analizując wyniki pomiarów, można zauważyć, że maksymalne wartości sił w przypadku obu odległości są bardzo zbliżone, co w tym wariantcie transportu świadczy o niewielkim wpływie odległości dyszy od płyty na działającą siłę. Zmiany w wartościach działającej siły są wyraźnie zależne od zmieniającej się wydajności pompy podającej ciecz. Ustalając parametry procesu, w tym prędkość transportu płyty, będzie więc można sterować siłą docisku płyt do

rolek poprzez zmianę wydajności pompy. Ma to kluczowe znaczenie z uwagi na eliminację ewentualnych poślizgów płyty na rolkach transportowych.



Rys. 3.52. Wyniki pomiarów na stanowisku testowym: wykres sił działających na płytę, wariant I, odległość dysz od płyty 30 mm

W wariantcie II nie ma napędu na rolkach, a ruch translacyjny płyty jest wymuszony przez siłę oddziaływania cieczy z dysz procesowych usytuowanych pod określonym kątem w stosunku do płaszczyzny transportowanej płyty. W celu zapewnienia możliwości zmiany kąta oddziaływania dysz na transportowaną płytę zbudowano instalację z możliwością obrotu środkowych sekcji dysz natryskowych (rys. 3.53 i 3.54).



Rys. 3.53. Wariant II transportu fluidalnego – regulowane dysze natryskowe



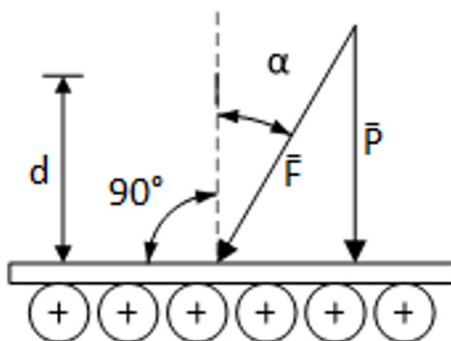
Rys. 3.54. Wariant II transportu fluidalnego
– regulowane dysze natryskowe i układ zasilający

Zmodyfikowano układ pomiarowy do pomiaru sił w wariantcie I. Na rolkach umieszczono sztywną płytę-podstawę, na niej rozmieszczono trzy czujniki siły, a na czujnikach transportowaną płytę PCB (rys. 3.55).



Rys. 3.55. Układ pomiarowy na stanowisku testowym z czujnikami siły
do badania wariantu II transportu fluidalnego

Na stanowisku testowym przeprowadzono pomiary (rys. 3.56) siły, tj. składowej pionowej siły działającej pod kątem α na transportowaną płytę PCB. Wyloty dysz znajdowały się w odległości d od górnej płaszczyzny płyty PCB. Pomiary przeprowadzono, gdy odległość d wynosiła 15 i 30 mm, a kąt α miał wartość 30 i 60°.

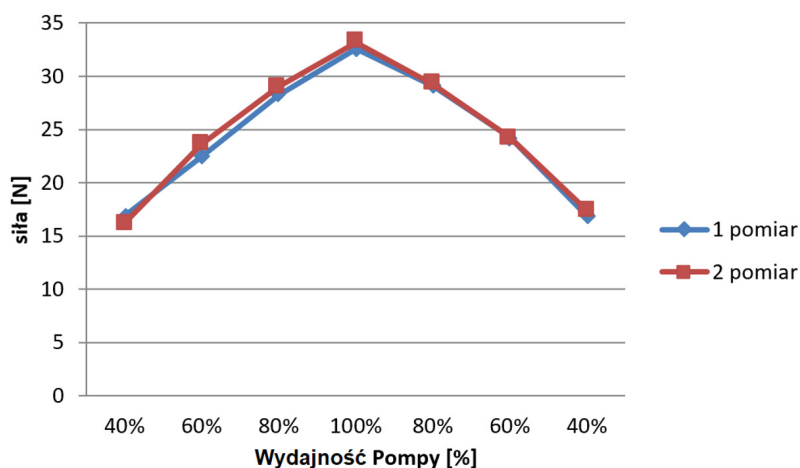


Rys. 3.56. Stanowisko testowe wariantu II transportu fluidalnego
– schemat sił działających na płytę PCB

Wartości siły $\bar{P}$ dociskającej płytę do rolek transportowych, gdy kąt przyłożenia dysz wynosi 30°, a odległość dysz od płytki 15 mm, podano w tabeli 3.12 i na rys. 3.57.

Tabela 3.12. Wyniki pomiarów na stanowisku testowym:
siły dociskające płytę PCB, wariant II, kąt nachylenia dysz 30°,
odległość dysz od płyty 15 mm

Wydajność pompy [%]	Pomiar 1	Pomiar 2
	siła docisku płyty [N]	
40	16,91	16,21
60	22,47	23,60
80	28,23	29,00
100	32,57	33,19
80	29,12	29,27
60	24,26	24,28
40	16,89	17,39

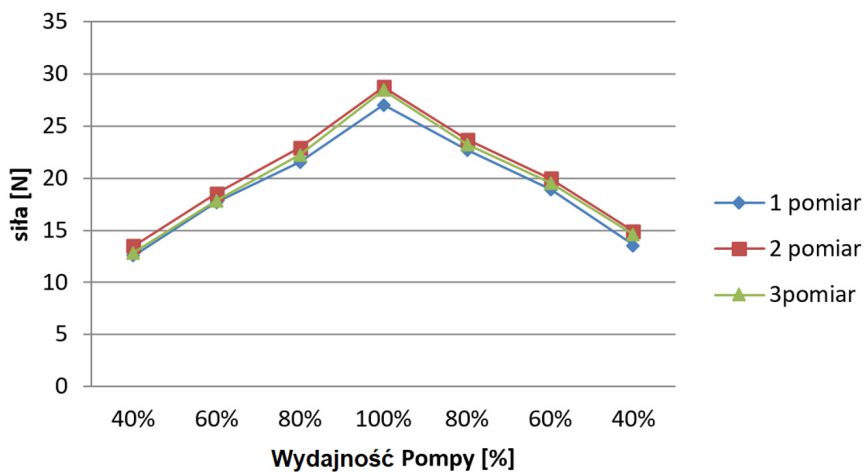


Rys. 3.57. Wyniki pomiarów na stanowisku testowym: wykres sił dociskających płytę PCB, wariant II, kąt nachylenia dysz 30° , odległość dysz od płyty 15 mm

Wartości sił działających, gdy kąt nachylenia dysz wynosi 60° , a odległość dysz od płyty wynosi 15 mm, podano w tabeli 3.13 i na rys. 3.58.

Tabela 3.13. Wyniki pomiarów na stanowisku testowym: siły dociskające płytę PCB, wariant II, kąt nachylenia dysz 60° , odległość dysz od płyty 15 mm

Wydajność pompy [%]	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3
	siła docisku płyty [N]		
40	12,55	13,51	12,86
60	17,68	18,53	17,84
80	21,52	22,93	22,24
100	27,06	28,75	28,43
80	22,73	23,74	23,22
60	18,90	19,97	19,52
40	13,59	14,95	14,65

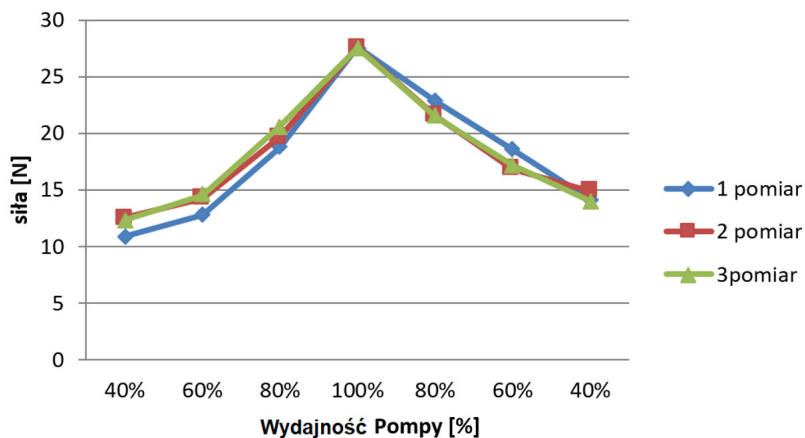


Rys. 3.58. Wyniki pomiarów na stanowisku testowym: wykres sił dociskających płytę PCB, wariant II, kąt nachylenia dysz 60° , odległość dysz od płyty 15 mm

Wartości sił działających, gdy kąt przyłożenia dysz wynosi 30° , a odległość dysz od płyty 30 mm, podano w tabeli 3.14 i na rys. 3.59.

Tabela 3.14. Wyniki pomiarów na stanowisku testowym: siły dociskające płytę PCB, wariant II, kąt nachylenia dysz 30° , odległość dysz od płyty 30 mm

Wydajność pompy [%]	Pomiar 1	Pomiar 2	Pomiar 3
	siła docisku płyty [N]		
40	10,91	12,52	12,34
60	12,81	14,20	14,54
80	18,74	19,67	20,62
100	27,61	27,61	27,56
80	22,83	21,53	21,48
60	18,57	16,83	17,22
40	14,13	14,89	14,01

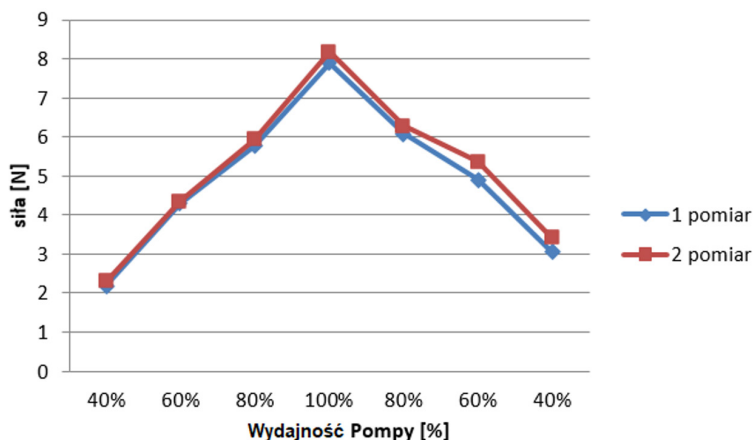


Rys. 3.59. Wyniki pomiarów na stanowisku testowym: wykres sił dociskających płytkę PCB, wariant II, kąt nachylenia dysz 30°, odległość dysz od płyty 30 mm

Wartości sił działających, gdy kąt nachylenia dysz wynosi 60°, a odległość dysz od płyty 30 mm, podano w tabeli 3.15 i na rys. 3.60.

Tabela 3.15. Wyniki pomiarów na stanowisku testowym: siły dociskające płytę PCB, wariant II, kąt nachylenia dysz 60°, odległość dysz od płyty 30 mm

Wydajność pompy [%]	Pomiar 1	Pomiar 2
	siła docisku płyty [N]	
40	2,19	2,30
60	4,30	4,34
80	5,76	5,92
100	7,89	8,17
80	6,10	6,28
60	4,90	5,37
40	3,06	3,42



Rys. 3.60. Wyniki pomiarów na stanowisku testowym: wykres sił dociskających płytę PCB, wariant II, kąt nachylenia dysz 60° , odległość dysz od płyty 30 mm

Analizując przedstawione powyżej wyniki pomiarów sił, można zauważyć, że wartości sił oddziaływania przy odległości dysz od płyty PCB wynoszącej 15 i 30 mm i kącie nachylenia o wartości 60° niewiele różnią się między sobą. Zmniejszenie kąta oddziaływania dysz z 60° do 30° przy odległości dysz od płytki równej 15 mm spowodowała zwiększenie siły docisku płyty PCB w porównaniu z siłą docisku przy kącie nachylenia dysz wynoszącym 60° i oddaleniu dysz od płyty o 15 mm. Powodem tej zmiany jest większa wartość składowej pionowej siły działającej na płytę. Zauważyć należy, że duże znaczenie ma oddziaływanie siły tarcia pomiędzy transportowaną płytą PCB a rolkami; w przypadku wystąpienia poślizgu proces transportu będzie trudny do przewidzenia i ewentualnych korekt.

3.10. Porównanie wyników symulacji CFD z wynikami pomiarów

Zestawienie wyników symulacji CFD wariantu I z dyszami znajdującymi się w odległości 15 mm od płyty (tabela 3.6) oraz wyniki pomiarów na stanowisku testowym (tabela 3.9) przedstawiono w tabeli 3.16.

Tabela 3.16. Wartości siły docisku płyty PCB w wariancie I:
odległość dysz od płyty 15 mm

Wydajność pompy [%]	Siła docisku płyty PCB [N]	
	symulacja CFD	pomiar na stanowisku (średnia arytmetyczna)
40	34,3	40,33
60	41,6	46,96
80	47,2	52,72
100	54,9	58,52

Wartości siły docisku uzyskane na stanowisku testowym są większe o ok. 15% od wartości sił otrzymanych w wyniku symulacji CFD, przy czym wraz ze wzrostem wydajności pompy różnice w wartościach sił maleją i przy wydajności na poziomie 100% różnica wynosi tylko 3,62 N.

Wyniki symulacji CFD wariantu I z dyszami znajdującymi się w odległości 30 mm od płyty (tabela 3.6) i wyniki pomiarów na stanowisku testowym (tabela 3.10) zestawiono w celach porównawczych w tabeli 3.17.

Tabela 3.17. Wartości siły docisku płyty PCB w wariancie I:
odległość dysz od płyty 30 mm

Wydajność pompy [%]	Siła docisku płyty PCB [N]	
	symulacja CFD	pomiar na stanowisku testowym (średnia arytmetyczna)
40	31,8	43,68
60	39,5	50,26
80	45,7	55,18
100	52,8	57,83

Wartości siły docisku uzyskane na stanowisku testowym są większe o ok. 20% od wartości sił otrzymanych w wyniku symulacji CFD, przy czym wraz ze wzrostem wydajności pompy różnica w wartościach sił maleje i przy wydajności na poziomie 100% wynosi tylko 5,03 N.

Wyniki symulacji CFD wariantu II z dyszami nachylonymi pod kątem 30° i znajdującymi się w odległości 15 mm od płytki (tabela 3.8) oraz wyniki po-

miarów na stanowisku testowym (tabela 3.11) zestawiono w celach porównawczych w tabeli 3.18.

Tabela 3.18. Wartości siły docisku płyty PCB w wariancie II:
kąt nachylenia dysz 30°, odległość dysz od płyty 15 mm

Wydajność pompy [%]	Siła docisku płyty PCB [N]	
	symulacja CFD	pomiar na stanowisku testowym (średnia arytmetyczna)
40	14,2	16,85
60	21,3	23,65
80	28,7	28,91
100	30,8	32,88

W wariancie II po skierowaniu dysz pod kątem 30° i umiejscowieniu ich w odległości 15 mm od płyty wartości sił uzyskane na stanowisku testowym są podobnie jak w wariancie I w takich samych warunkach większe o ok. 10% od wartości sił otrzymanych w wyniku symulacji CFD.

Wyniki symulacji CFD wariantu II z dyszami nachylonymi pod kątem 60° i znajdującymi się w odległości 15 mm od płyty (tabela 3.7) i wyniki pomiarów na stanowisku testowym (tabela 3.13) zestawiono w celach porównawczych w tabeli 3.19.

Tabela 3.19. Wartości siły docisku płyty PCB w wariancie II:
kąt nachylenia dysz 60°, odległość dysz od płyty 15 mm
– symulacja CFD i pomiar na stanowisku testowym

Wydajność pompy [%]	Siła docisku płyty PCB [N]	
	symulacja CFD	pomiar na stanowisku testowym (średnia arytmetyczna)
40	11,2	13,69
60	16,9	18,74
80	20,4	22,73
100	25,6	28,08

W wariancie II z dyszami skierowanymi pod kątem 60° i umiejscowionymi w odległości 15 mm od płyty wartości uzyskane na stanowisku testowym są większe o ok. 10% od wartości sił otrzymanych w wyniku symulacji CFD.

Wyniki symulacji CFD wariantu II z dyszami nachylonymi pod kątem 30° i znajdującymi się w odległości 30 mm od płytki (tabela 3.9) oraz wyniki pomiarów na stanowisku testowym (tabela 3.14) zestawiono w celach porównawczych w tabeli 3.20.

Tabela 3.20. Wartości sił docisku płyty w wariancie II:
kąt nachylenia dysz 30° , odległość dysz od płyty 30 mm

Wydajność pompy [%]	Siła docisku płyty PCB [N]	
	symulacja CFD	pomiar na stanowisku testowym (średnia arytmetyczna)
40	10,1	13,13
60	11,5	15,70
80	17,9	20,81
100	25,7	27,59

W wariancie II, przy dyszach skierowanych pod kątem 30° i umieszczonych w odległości 30 mm wartości zmierzone na stanowisku testowym są większe o ok. 17% od wartości sił otrzymanych w wyniku symulacji CFD, przy czym różnice w wartościach maleją wraz ze wzrostem wydajności pompy.

Wyniki symulacji CFD wariantu II z dyszami nachylonymi pod kątem 60° i znajdującymi się w odległości 30 mm od płyty (tabela 3.9) oraz wyniki pomiarów na stanowisku testowym (tabela 3.15) w celach porównawczych zestawiono w tabeli 3.20. .

Tabela 3.20. Wartości sił docisku płyty w wariancie II: kąt nachylenia dysz 60° ,
odległość dysz od płyty 30 mm

Wydajność pompy [%]	Siła docisku płyty PCB [N]	
	symulacja CFD	pomiar na stanowisku testowym (średnia arytmetyczna)
40	0,5	2,74
60	3,4	4,73
80	5,8	6,02
100	6,2	8,03

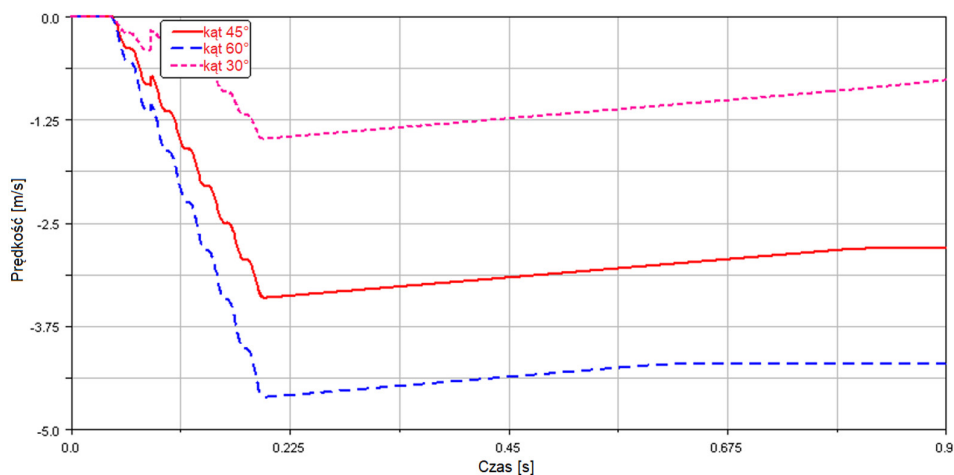
W wariancie II po skierowaniu dysz pod kątem 60° i umieszczeniu ich w odległości 30 mm od płytek zauważono znaczną rozbieżność w uzyskiwanych wartościach siły docisku: przy wydajności pompy na poziomie 40% sięga ona 80%. W symulacji CFD odnotowano siłę o wartości 0,5 N, znacznie różniącą się od pozostałych wyników. W pozostałych przypadkach wartości zmierzone na stanowisku testowym są większe o ok. 20% od wartości sił otrzymanych w wyniku symulacji CFD.

3.11. Symulacje numeryczne metodą MBS III wariantu transportu fluidalnego

Najbardziej zaawansowanym z analizowanych rozwiązań transportu fluidalnego jest wariant III, w którym element transportowany jest tylko w wyniku kontaktu z cieczą procesową. Z uwagi na niską odporność płytek krzemowych na uszkodzenia mechaniczne zdecydowano o dostosowaniu do nich konstrukcji transportera fluidalnego. Przewidziano konieczność zaprojektowania wanny procesowej odpowiedniej do transportu płytek krzemowych o konkretnych wymiarach.

Zgodnie z założeniem wariantu III transport fluidalny realizowany jest przez wyeliminowanie kontaktu fizycznego płyty PCB z elementami transportera i przemieszczanie jej z wykorzystaniem cieczy procesowej. Ciecz ta unosi płytę i steruje nią. W modelu symulacyjnym MBS przygotowanym dla wariantu II usunięto oddziaływanie rolek, na których opierała się transportowana płyta PCB, a dodano siłę zastępczą, imitującą oddziaływanie „poduszki” z płynu procesowego. Podobnie jak w przypadku wariantu II przeprowadzono symulację z różnymi kątami przyłożenia dysz procesowych (rys. 3.34). Siła obciążająca płytę PCB miała wartość 50 N. Otrzymano wykresy zmiany prędkości płyty PCB w czasie transportu (rys. 3.61).

Na podstawie wyników symulacji (rys. 3.62) można stwierdzić, że ruch odbywa się bez wyraźnych zaburzeń, jak w wariancie II (rys. 3.35). Nie występuje efekt spowodowanego siłami reakcji rolek uderzania w transportowaną płytę PCB. Ponadto brak koniecznych do pokonania sił tarcia na rolkach transportowych powoduje, że w celu wprawienia w ruch płyty nie ma potrzeby działania na układ dużymi siłami.



Rys. 3.61. Symulacje MBS, wariant III: prędkość płyty PCB przy kątach nachylenia dysz 30, 45 i 60°

Mimo że siły wymuszające transport płyty będą mniejsze niż w wariancie II, sterowanie procesem tak, żeby ruch płyty był ustalony, będzie trudne z uwagi na zaburzenia wywołane przez ciecz działającą na nią od dołu.

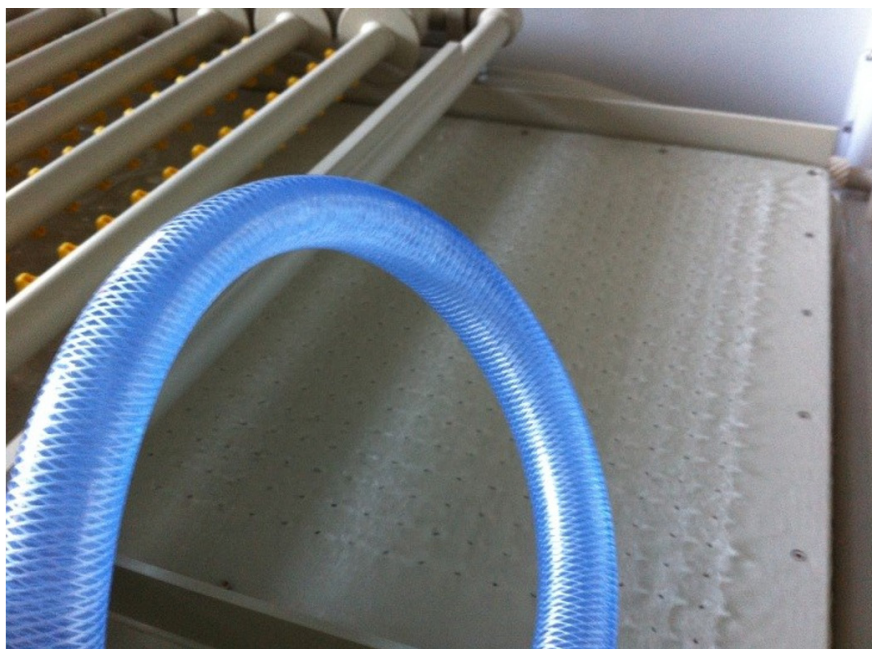
3.12. Badania laboratoryjne wariantu III transportu fluidalnego

Pomiary na stanowisku testowym wymagały modyfikacji w zakresie dolnej części wanny procesowej. Zamontowano tam zbiornik cieczy procesowej, podzielony na cztery sekcje zasilane ciśnieniem cieczy procesowej. Wypływ cieczy odbywał się przez perforowaną płytę górną, zamykającą zbiornik (rys. 3.62). Nad zbiornikiem zamontowano układ z regulowanymi dyszami natryskowymi, który jak w wariancie II zasilany był symetrycznie drugą pompą.

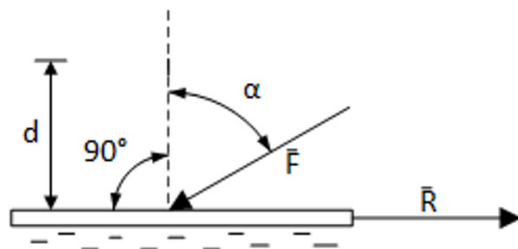
W celu wyrównania wartości ciśnień w każdej sekcji zbiornika zaprojektowano osobne przyłącza zasilające w ciecz procesową pod ciśnieniem. Zbiornik od góry zamknięty był perforowaną płytą, przez którą wydostawała się ciecz procesowa, tworząc na jej powierzchni „poduszkę” z płynu procesowego (rys. 3.63). Na tak zbudowanym stanowisku przeprowadzono pomiary składowej poziomej siły działającej na transportowaną płytę. Ruch płyty był wymuszany przez siłę generowaną przez ciśnienie cieczy procesowej kierowane pod zmiennym kątem α i ze zmiennej odległości d od płyty (rys. 3.64).



Rys. 3.62. Zbiornik transportera fluidalnego w wariantcie III – widok na perforowaną płytę



Rys. 3.63. Wypływ cieczy procesowej przez perforowaną płytę zbiornika w wariantcie III



Rys. 3.64. Schemat pomiarów na stanowisku testowym wariantu III

W pomiarach przeprowadzonych według przyjętego schematu założono kąt α równy 30, 45 i 60° oraz odległości d równe 15, 30 i 60 mm. Wyniki pomiarów siły podano w tabeli 3.62. Na podstawie analizy zawartych w niej danych należy stwierdzić, że ruch płyty w wariantcie III transportu fluidalnego realizowany jest na „poduszce” z cieczy procesowej, dzięki czemu opory tarcia są niewielkie. W tych samych warunkach wydajności cieczy procesowej możliwe będzie uzyskiwanie większych prędkości transportu. Ruch ten będzie jednak trudny do kontrolowania.

Tabela 3.63. Wartości siły przy zmiennych odległościach d oraz wartościach kąta działania dysz α

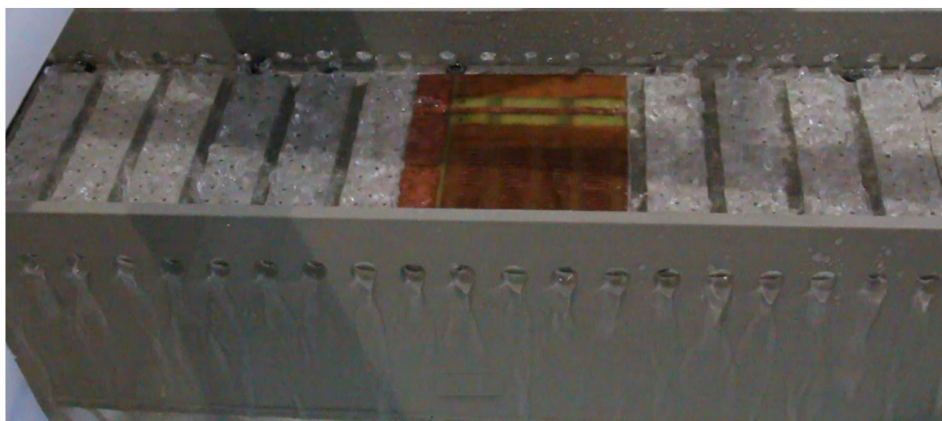
Odległość d [mm]	Wydajność pompy [%]	Kąt 30°	Kąt 45°	Kąt 60°
		siła docisku płyty [N]		
15	40	0,57	0,61	1,04
	60	1,45	1,73	2,60
	80	2,88	3,50	4,80
	100	4,05	5,04	6,90
30	40	0,46	0,88	1,20
	60	1,15	2,20	2,51
	80	2,20	3,70	4,38
	100	3,25	5,31	6,22
60	40	0,42	0,74	1,01
	60	1,09	1,92	2,47
	80	2,14	3,36	4,35
	100	3,09	4,91	6,06

Niewielkie różnice w wartościach zarejestrowanych sił potwierdzają, że w niewielkim stopniu zależą one od zmian odległości. Przyjmując zmienne czynniki wpływające na kontrolę procesu, należy wziąć pod uwagę gęstość cieczy procesowej, wydajność pomp, jak również dobór innych rodzajów dysz procesowych.

3.13. Sterowanie transportem płytek w wariancie III transportu fluidalnego

Dynamika procesu transportu w wariancie III jest trudna do kontrolowania. W związku z tym sterowanie transportem wymaga zastosowania bardziej zaawansowanych rozwiązań, niż sterowanie napędem rolek czy regulacja kąta pochylenia dysz procesowych oraz wydajności pompy zasilającej.

Budowa stanowiska do transportu fluidalnego według założeń wariantu III wymaga dostosowania szerokości przenośnika do transportowanej płyty oraz zaprojektowania odpowiedniego systemu sterowania procesem transportu. Opracowano wstępną koncepcję przenośnika fluidalnego, w którym zamontowano jeden z wariantów opatentowanej płyty transportowej. Podczas testów laboratoryjnych sprawdzono poprawność realizacji procesu transportu płyty PCB z użyciem przenośnika, z zachowaniem ruchu prostoliniowego (rys. 3.64).



Rys. 3.65. Przenośnik fluidalny – transport płyty PCB podczas testów laboratoryjnych wariantu III

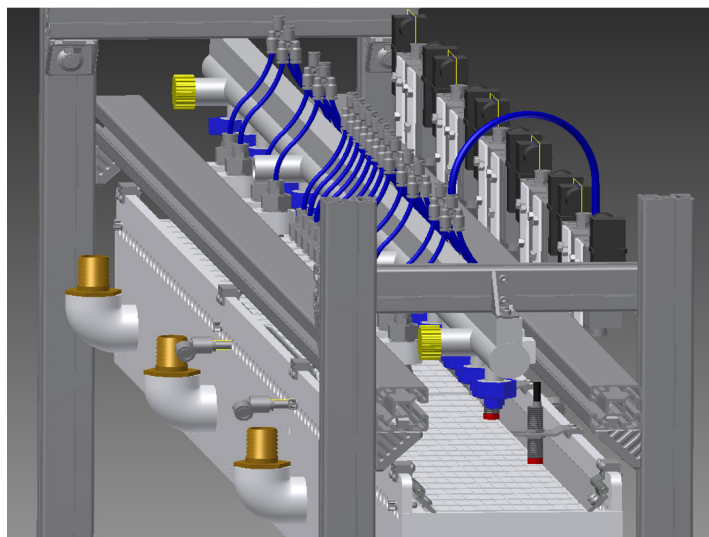
Testy zrealizowano bez dodatkowych dysz natryskowych, co w niektórych przypadkach może być niezbędne z uwagi na procesy chemiczne, które powinny być zrealizowane podczas obróbki płyt. Wprowadzenie dysz natryskowych zakłócało trajektorię transportu płyt na tyle, że niemożliwe było utrzymanie prostoliniowego toru ich ruchu. Konieczne było doposażenie stanowiska w dodatkowe prowadnice boczne.

Na rysunku 3.66 przedstawiono fotografię pojedynczego toru przenośnika fluidalnego, dostosowanego do szerokości transportowanych płyt, z dodatkowymi prowadnicami bocznymi oraz jednym z wariantów perforowanej płyty transportowej.



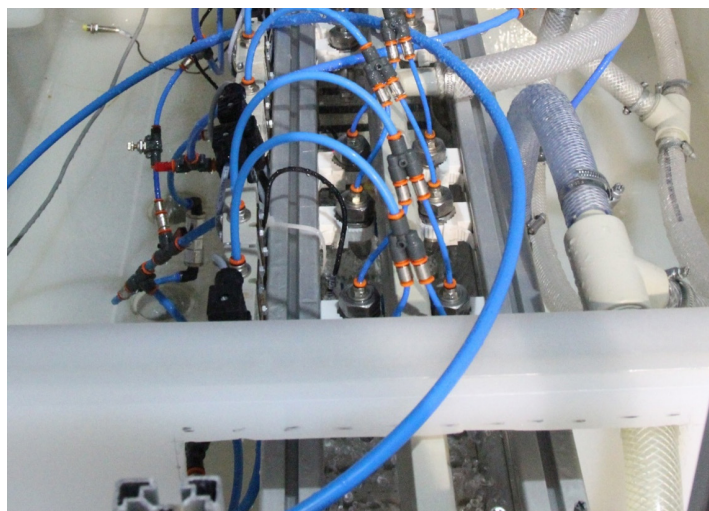
Rys. 3.66. Przenośnik fluidalny z widoczną perforowaną dolną płytą transportową w wariantcie III

Opracowano koncepcję sterowania transportem fluidalnym w wariantcie III, w której zakłada się wykorzystanie gazowych dysz korygujących położenie transportowanych płytek. Korekty realizowane są poprzez oddziaływanie na płyty ukierunkowanego strumienia ciśnienia powietrza. Metodę sterowania transportem fluidalnym opisano w publikacji (Chrapek, Jodkowski, Krot i Matuszewicz, 2017). Model geometryczny przenośnika fluidalnego z gazowymi dyszami do sterowania procesem transportu w wariantcie III przedstawia rys. 3.67.

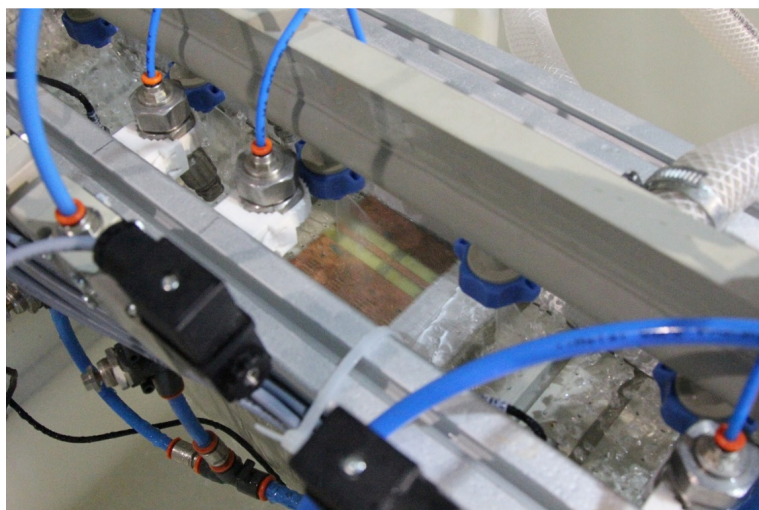


Rys. 3.67. Model geometryczny CAD 3D transportera fluidalnego wyposażonego w pneumatyczny system sterowania transportem

Oprócz układu przepływu cieczy procesowej oraz natrysku przez dysze górne w rozwiązaniu przewidziano również instalację pneumatyczną do kontrolowania procesu transportu płyt oraz czujniki do rejestracji aktualnego położenia transportowanych płytek. Całość testowano na stanowisku laboratoryjnym (rys. 3.68 i 3.69).



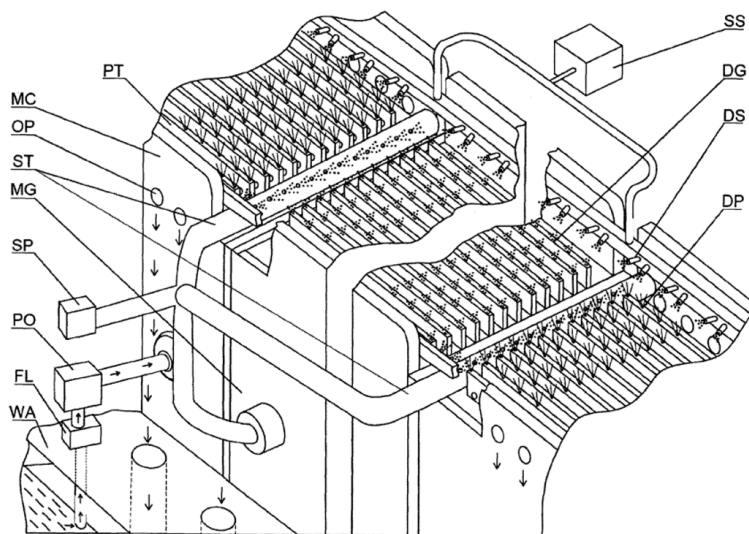
Rys. 3.68. Przenośnik fluidalny z pneumatycznym systemem sterowania transportem – widok ogólny



Rys. 3.69. Przenośnik fluidalny z pneumatycznym systemem sterowania transportem podczas pracy

W wariantcie III oprócz kontroli procesu transportu problematyczny jest transport między kolejnymi etapami procesu produkcji. W klasycznym podejściu z systemem transportu opartym na rolkach transport ten odbywa się dzięki zestawieniu ze sobą kolejnych wanien procesowych. Transportowany element przekazywany jest przez odpowiednie stanowiska załadownicze i wyładownicze (rys. 3.45). Rozwiązanie umożliwiające przekazywanie transportowanych elementów pomiędzy kolejnymi etapami procesu powinno zostać opracowane również dla transporterów fluidalnych.

Pozytywne rezultaty z pneumatycznymi dyszami do kontroli procesu transportu przyczyniły się do opracowania koncepcji transportu pneumatycznego (gazowego) między przenośnikami fluidalnymi. Rozwiązanie *Transporter płaskich elementów w procesach produkcyjnych* zostało zgłoszone do Urzędu Patentowego Rzeczypospolitej Polskiej i objęte ochroną – patent nr PL nr 225095 (Matusiewicz, Krot, Chlebus, Górski, Zawiślak, 2017). Istota wynalazku polega na wprowadzeniu sekcji pneumatycznej między sekcjami procesowymi z cieczą (rys. 3.68). Transporter płaskich elementów wyposażony jest w dysze doprowadzające ciecz procesową, w wannie (WA) umieszczone są co najmniej dwa moduły ciekłe (MC) połączone przewodami poprzez pompę (PO) i filtr (FL) z wanną (WA). Mmiedzy sąsiadującymi modułami ciekłymi (MC) osadzony jest moduł gazowy (MG). Każdy moduł ciekły (MC) zamknięty jest od góry płytą transportującą (PT) wyposażoną w dysze procesowe (DP).



Rys. 3.68. Pneumatyczne przekazywanie elementów pomiędzy sekcjami mokrymi w transporcie fluidalnym – patent nr PL 225095.
Źródło: (Matuszewicz, Krot, Chlebus, Górski, Zawislak, 2017)

Moduł gazowy (MG) zamknięty jest od góry płytą transportującą (PT) z dyszami powietrznymi (DG) oraz w separatory transportu ciecz–gaz (ST). Moduł gazowy (MG) i separatory transportu ciecz–gaz (ST) podłączone są do sprężarki modułu gazowego (SP). Wzdłuż modułów (MC, MG) w prowadnicach zamocowane są dysze sterujące (DS) podłączone do sprężarki układu sterowania (SS).

3.14. Podsumowanie

Opracowano koncepcyjnie, zaprojektowano i opatentowano cztery warianty transportu fluidalnego elementów płaskich w ciągłych procesach obróbki chemicznej. Za pomocą metod MBS i CFD przeprowadzono symulacje numeryczne wybranych wariantów transportu z uwagi na parametry kinematyczne i dynamiczne procesu transportu. W celu praktycznego zweryfikowania wyników badań symulacyjnych zbudowano stanowiska badawcze do zbadania trzech wariantów transportu fluidalnego. Na stanowiskach przeprowadzono pomiary sił działających na płytę PCB podczas transportu. Dla wariantu III transportu fluidalnego opracowano odpowiedni przenośnik fluidalny do trans-

portowania płytek krzemowych w produkcji ogniw fotowoltaicznych. Opracowano koncepcyjne i opatentowano gazowy moduł do przekazywania płyt między sekcjami przenośnika fluidalnego.

Opracowane warianty rozwiązań konstrukcyjnych, przedstawione wyniki badań symulacyjnych oraz weryfikacja otrzymanych wyników na drodze pomiarów i testów laboratoryjnych zapewniły istotny wkład w rozwój nowych rozwiązań transportu w ciągłych procesach produkcyjnych, ograniczających lub eliminujących fizyczny kontakt pomiędzy transportowymi elementami a częściami przenośników. Rozwiązania badano symulacyjnie oraz na stanowiskach laboratoryjnych w procesach transportu płyt PCB. Wykorzystano ciecz jako medium realizujące nie tylko procesy obróbki chemicznej, ale również transport elementów przez kolejne wanny procesowe w obróbce chemicznej.

Mając na uwadze przedstawione wyniki prac badawczych, potwierdzono słuszność hipotezy postawionej w podrozdz. 3.1. Transport fluidalny pozwala na realizację ciągłych procesów chemicznych obróbki, znacznie ogranicza lub całkowicie eliminuje zagrożenie uszkodzenia transportowanych elementów wynikające z naprężeń spowodowanych fizycznym kontaktem transportowanych elementów z częściami transportera.

Przedstawione rozwiązania transportu fluidalnego są użytecznymi rozwiązaniami technicznymi, których zastosowanie w projektowanych liniach technologicznych umożliwia inżynierom osiągnięcie wysokiego stopnia niezawodności ciągłych procesów produkcyjnych.

Kierunki dalszych prac badawczych powinny być zorientowane na symulację e transportu w wariancie IV oraz eksperymentalne sprawdzenie skuteczności tego rozwiązania na stanowisku badawczym. Badania dotyczące wariantów I, II, III transportu fluidalnego należy poszerzyć o symulacyjne i eksperymentalne ustalanie parametrów transportu (kinematycznych i dynamicznych) oraz intensywności procesów chemicznych trawienia bądź płukania w przypadku zastosowania różnych dysz procesowych oraz płyt transportowych. Rozbudowany model symulacyjny oraz badania na rzeczywistej linii produkcyjnej będą umożliwiały przeprowadzenie pomiarów określających przestoje linii oraz niezawodność procesów transportowych.

Podsumowanie i kierunki dalszych prac

W monografii przedstawiono wyniki badań dotyczących definiowania oraz formalnego zapisu wymagań funkcjonalnych produktu na wczesnym etapie jego rozwoju. Wymagania te umożliwiają określenie nie tylko użytkowych aspektów produktu, ale również wpływają na procesy jego wytwarzania, transport technologiczny oraz końcowe fazy cyklu życia, takie jak wycofanie z użytkowania, recykling czy ponowne wykorzystanie. Do zapisu wymagań funkcjonalnych zaproponowano koncepcję Funkcjonalnych Obiektów Elementarnych. Na potrzeby planowania procesów technologicznych opisano także Technologiczne Obiekty Elementarne oraz procesy ich identyfikacji na podstawie danych CAD 3D. Oddziaływanie FOE na projektowanie procesów recyklingu i ponownego użytkowania zilustrowano na przykładzie usprawnienia recyklingu kompozytowych obudów sprzętu chłodniczego. Wymagania funkcjonalne mogą również odnosić się do zakładanej niezawodności procesów wytwarzania. W pracy przedstawiono wyniki badań nad opracowaniem wariantów transportu technologicznego, które minimalizują ryzyko uszkodzeń transportowanych elementów, a tym samym ograniczają przestoje linii produkcyjnej.

W ramach badań dotyczących definiowania i zapisu wymagań funkcjonalnych oraz ich wpływu na planowanie procesów technologicznych sformułowano dwie hipotezy badawcze. Pierwsza dotyczyła opracowania takiej systematyki obiektów elementarnych (OE), w której będą uwzględnione możliwości definiowania FOE odzwierciedlające wpływ produktów na środowisko, zdolność do recyklingu oraz ponownego użycia. Druga hipoteza zakładała zastosowanie OE w wymianie danych pomiędzy systemami CAD i CAPP oraz opracowanie algorytmów identyfikacji TOE z wykorzystaniem danych CAD 3D. Obie hipotezy zostały potwierdzone, a uzyskane rezultaty przyczyniły się do poszerzenia wiedzy w obszarze zrównoważonego projektowania, wczesnej oceny możliwości recyklingu i ponownego użycia produktów, a także rozwinięcia algorytmów i technik stosowanych w generacyjnych systemach CAPP.

W związku z rosnącym zapotrzebowaniem na rozwiązania umożliwiające kontrolowany rozwój produktów z uwzględnieniem zasad zrównoważonego rozwoju wskazana jest kontynuacja badań w tym zakresie. Istnieje potrzeba rozszerzenia systematyki FOE o nowe wskaźniki środowiskowe, umożliwiające monitorowanie i wpływanie na kolejne etapy rozwoju produktu. Zasadne jest opracowanie tzw. metryki środowiskowej produktu, obejmującej cały cykl życia: od użytkowania do wycofania z eksploatacji, recyklingu oraz ponownego wykorzystania. Metryka ta powinna zawierać rekomendowane metody oraz techniki związane z procesami końcowymi.

Dalsze badania w obszarze planowania procesów technologicznych powinny koncentrować się na opracowaniu narzędzi wykorzystujących metody sztucznej inteligencji, umożliwiających przekształcanie FOE w Konstrukcyjne, Technologiczne i Obróbkowe Obiekty Elementarne. Otwarta struktura reguł decyzyjnych identyfikujących TOE może być wykorzystana w samoadaptujących się systemach uczących się, dostosowanych do specyfiki danej produkcji.

Innym zaprezentowanym obszarem oddziaływania FOE na rozwój produktu jest faza wycofania produktu z użytkowania. Przeanalizowano wpływ FOE na proces recyklingu i ponownego wykorzystania wielomateriałowych kompozytów warstwowych, stosowanych m.in. w obudowach sprzętu chłodniczego. Postawiono hipotezę dotyczącą możliwości modyfikacji klasycznych technik recyklingu poprzez zastosowanie technologii laserowego cięcia oraz opracowanie rozwiązań umożliwiających ponowne wykorzystanie fragmentów obudów. Opracowano i opatentowano technologię oraz urządzenie do laserowego cięcia trudnych w obróbce kompozytów wielomateriałowych. Zmodyfikowano również model recyklingu sprzętu chłodniczego poprzez wprowadzenie technologii produkcji paneli izolacyjnych, objętej ochroną patentową. Ponadto usprawniono procesy oczyszczania paneli polistyrenowych z pozostałości pianek izolacyjnych. Wyniki badań potwierdziły słuszność postawionej hipotezy i przyczyniły się do rozwoju koncepcji recyklingu z uwzględnieniem ponownego wykorzystania.

W przyszłych badaniach zaleca się koncentrację na recyklingu kompozytów polimerowych wzmacnianych włóknami węglowymi, coraz częściej stosowanych w lotnictwie, motoryzacji i sprzęcie sportowym. Ze względu na trwałość połączeń materiałowych, wymagają one opracowania nowych metod separacji i recyklingu.

Wymagania funkcjonalne związane z transportem technologicznym zilustrowano na przykładzie procesów obróbki chemicznej. Przedstawiono innowacyjne rozwiązania transportu fluidalnego, minimalizujące przestoje linii technologicznych wynikające z uszkodzeń transportowanych elementów. Postawiono hipotezę dotyczącą możliwości opracowania rozwiązań transportu fluidalnego ograniczających kontakt mechaniczny z elementami przenośników. Opracowano cztery warianty takich rozwiązań, które poddano analizom symulacyjnym, a otrzymane wyniki zestawiono z wartościami otrzymanymi podczas pomiarów laboratoryjnych na stanowisku testowym. Warianty zostały objęte ochroną patentową, w tym konstrukcje przenośników fluidalnych, transporterów wertykalnych oraz gazowy separator kąpieli procesowych. Opatentowano również gazowy moduł przekazywania elementów pomiędzy sekcjami przenośnika fluidalnego.

W ramach przeprowadzonych badań opracowano koncepcyjnie trzy warianty transportu fluidalnego, zbudowano ich modele symulacyjne, przeprowadzono symulacje numeryczne oraz wykonano badania eksperymentalne na stanowiskach laboratoryjnych. Uzyskane wyniki potwierdziły słuszność postawionej hipotezy badawczej. Dodatkowo opracowano koncepcyjnie i opatentowano czwarty wariant transportu fluidalnego, który obejmuje transporter elementów ustawionych w pozycji wertykalnej, przemieszczanych horyzontalnie na biernych rolkach transportowych.

Dalsze prace badawcze powinny objąć szczegółowe badania czwartego wariantu, w tym symulacje procesów transportowych oraz budowę stanowiska badawczego umożliwiającego testowanie i pomiar kluczowych parametrów transportu. Równocześnie zaleca się kontynuację badań wariantów I, II i III w celu określenia statystycznych parametrów awaryjności rozwiązań, zarówno w warunkach symulowanych, jak i rzeczywistych – zwłaszcza w przypadku dużych partii elementów obrabianych w produkcji masowej.

Bibliografia

- Adapa, S. K., Jagadish (2023). An exhaustive review on intelligent computer-aided process planning in context with various optimisation techniques (OPTE-2021-1994). *International Journal of Materials and Product Technology*, 66(2), s. 209–231.
- Aderiani, A. R., Wärmefjord, K., Söderberg, R. (2022). Model-based definition in computer aided tolerance analyses. *Procedia CIRP*, 114, s. 112–116; <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.10.016>
- Ali, S. A., Khan, M. S., Stricker, D. (2024). BRep Boundary and Junction Detection for CAD Reverse Engineering. *2024 IEEE 3rd International Conference on Computing and Machine Intelligence (ICMI)*, s. 1–6.
- An official website of the European Union, Definition of recycling (2024). Pobrane z: https://joint-research-centre.ec.europa.eu/scientific-activities-z/less-waste-more-value/definition-recycling_en
- Anderson, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics*. McGraw-Hill.
- Aqeel, A. B., uz Zaman, U. K., Aziz, S., Baqai, A. A. (2024). Computer-Aided Design, Computer-Aided Process Planning, and Computer-Aided Manufacturing. W: U. Zaman, A. Siadat, A. Baqai, K. Naveed, A. Kumar, *Handbook of Manufacturing Systems and Design* (s. 11–30). CRC Press.
- Aryee, R., Kanda, W. (2024). A strategic framework for analysing the effects of circular economy practices on firm performance. *Journal of Cleaner Production*, 476; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.143753>
- Azab, A., Osman, H., Baki, F. (2024). CAPP-GPT: A computer-aided process planning-generative pretrained transformer framework for smart manufacturing. *Manufacturing Letters*, 41; <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2024.09.009>
- Besharati-Foumani, H., Lohtander, M., Varis, J. (2019). Intelligent process planning for smart manufacturing systems: a state-of-the-art review. *Procedia Manufacturing*, 38, s. 156–162; <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.021>
- Birman, V., Kardomateas, G. A. (2018). Review of current trends in research and applications of sandwich structures. *Composites Part B: Engineering*, 142, s. 221–240; <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2018.01.027>
- Blicharski, M. (2024). *Inżynieria materiałowa*. Wydawnictwo Naukowe PWN.

- Bressanelli, G., Saccani, N. (2025). Prioritizing Circular Economy actions for the decarbonization of manufacturing companies: the C-Readiness tool. *Computers & Industrial Engineering*; <https://doi.org/10.1016/j.cie.2025.110876>
- Broniewski, T., Kabko, J., Płaczek, W., Thomala, J. (2000). *Metody badań i ocena właściwości tworzyw sztucznych*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- Strzępiarki dwuwałowe Bronnberg (2024). Pobrany z: <https://www.bronneberg.pl/produkty/strzpiarki-dwuwaowe/>
- Brun, X. F., Melkote, S. N. (2009). Analysis of stresses and breakage of crystalline silicon wafers during handling and transport. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 93(8), s. 1238–1247; <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2009.01.016>
- Bubinek, R., Knaack, U., Cimpan, C. (2025). Reuse of consumer products: Climate account and rebound effects potential. *Sustainable Production and Consumption*, 54, s. 190–201; <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.12.019>
- Chanan, S., Menon, U. (1994). *Concurrent Engineering. Concepts, implementation and practice*. Springer.
- Chlebus, E. (2000). *Techniki Komputerowe CAX w Inżynierii Produkcji*.
- Chlebus, E., Krot, K. (2011). Laser cutting of sandwich composite materials. *Production engineering: innovations and technologies of the future* (s. 229–232). Institute of Production Engineering and Automation. International Conference „Production Engineering 2011”.
- Chlebus, E., Krot, K. (2016). CAD 3D models decomposition in manufacturing processes. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 16(1), s. 20–29; <http://dx.doi.org/10.1016/j.acme.2015.09.008>
- Chlebus, E., Jodkowski, B., Krot, K., Kuliberda, M. Z., Musiał, M. M. (2012). Inteligentne przetwarzanie danych w procesach skanowania obiektów dla potrzeb recyklingu. W: R. Knosala (red.), *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, (s. 31–38). Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją.
- Chlebus, E., Krot, K., Jodkowski, B. (2014). Patent nr PL 218122.
- Chlebus, E., Krot, K., Kuliberda, M. (2015). Patent nr PL220490.
- Chlebus, E., Krot, K., & Kuliberda, M. Z. (2005). Dekompozycja modeli CAD 3D w planowaniu procesów technologicznych. *XV Konferencja „Metody i środki projektowania wspomaganego komputerowo. Zbiór referatów”*, Kazimierz Dolny, 12–14 października 2005. (s. 55–62). Instytut Podstaw Budowy Maszyn.
- Chlebus, E., Krot, K., Kuliberda, M. Z. (2010). System ekspertowy do planowania procesów technologicznych obróbki skrawaniem. W: R. Knosala (red.), *Komputerowo zintegrowane zarządzanie* (t. 1, s. 239–246). Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją.

- Chlebus, E., Krot, K., Kuliberda, M. Z. (2011). Planowanie procesów technologicznych obróbki z zastosowaniem systemu ekspertowego. *Archiwum Technologii Maszyn i Automatyzacji*, 31(4), s. 115–123.
- Chlebus, E., Krot, K., Kuliberda, M. Z. (2011). Rule-Based Expert System Dedicated for Technological Applications. *Hybrid artificial intelligent systems: 6th International Conference, HAIS 2011, Wroclaw, Poland, May 23–25, 2011* (s. 373–380); <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-21222-2>
- Chlebus, E., Krot, K., Kuliberda, M. Z. (2012). Knowledge processing mechanisms for automated manufacturing processes planning. W: R. Knosala (rde.), *Innovations in management and production engineering* (s. 326–336). Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją.
- Chlebus, E., Krot, K., Kuliberda, M. Z., Antończak, A. (2014). Patent nr PL 218123.
- Chlebus, E., Krot, K., Kuliberda, M. Z., Jodkowski, B. (2012). Intelligent data processing in recycling of household appliances. *Hybrid Artificial Intelligent Systems. HAIS 2012. Lecture Notes in Computer Science*, 7209, s. 241–249; https://doi.org/10.1007/978-3-642-28931-6_23.
- Cho, J., & Gerhard, D. (2018). Preserving Design Intent in Feature-Based Parametric CAD Data Exchange. W: *Product Lifecycle Management to Support Industry 4.0, IFIP International Conference on Product Lifecycle Management PLM 2018* (s. 554–565).
- Cholewa, M., Czajka, J. (2018). Koncepcja usprawnienia procesów przygotowania i uruchomienia produkcji. *Modern Management Review*, 23(25), s. 9–21.
- Choroszy, B., Lustig, D., Smalec, Z. (1993). Zastosowanie systemu eksportowego do projektowania procesów technologicznych obróbki wałków. W: *Podstawy projektowania procesów i systemów produkcyjnych. Materiały na konferencję naukową [Wółka Zarzeczańska, 20–22 kwietnia 1993]* (s. 23–31). Politechnika Krakowska.
- Chougule, R. G., Ravi, B. (2005). Variant process planning of castings using AHP-based nearest neighbour algorithm for case retrieval. *International Journal of Production Research*, 43(6), s. 1255–1273; <https://doi.org/10.1080/00207540412331320517>
- Chrapek, K., Jodkowski, B., Krot, K., & Matuszewicz, W. (2017). Sterowanie przepływem elementów układów fotogalwanicznych we fluidalnym systemie transportowym. *Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze*, 3, s. 85–91.
- Chylińska, M., Trojanowski, K., Podgórski, A., Niemcewicz, P. (2018). Metody recyklingu odpadów z polistyrenu i potencjalne możliwości jego ponownego zastosowania. *Przetwórstwo Tworzyw*, 24(1), s. 27–38.
- Coombs, C. F., Holden, J. T. (2016). *Printed Circuits Handbook*.

- Czajka, J., Krot, K., Kuliberda, M. Z. (2011). *Selected issues of production systems organisation and computer aided process planning: production system organisation*. Politechnika Wrocławska.
- Czech-Polak, J., Oliwa, R., Oleksy, M., Budzik, G. (2018). Sztywne pianki poliuretanowe o zwiększonej odporności na płomień. *Polimery*, 63(2); DOI: [dx.doi.org/10.14314/polimery.2018.2.5](https://doi.org/10.14314/polimery.2018.2.5).
- Dassault_Systèmes. (2024). *SOLIDWORKS API Help*. Pobrane z: <https://help.solidworks.com/>
- Davim, J. P. (2013). *Machining composites materials*. John Wiley & Sons.
- Dobrzański, L. (2002). *Podstawy nauki o materiałach i metaloznawstwo*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- DS New Energy (2025). Pobrane z: Black Silicon Surface P Type Polycrystalline Solar Wafer Including 166mm*166mm; <https://www.dsneq.com/>
- Duda, J. (2003). *Wspomagane komputerowo generowanie procesu obróbki w technologii mechanicznej* (Zeszyty Naukowe Politechniki Krakowskiej. Monografia 286).
- Duda, J. (2018). Formal Description of Integrated Process and Assembly System Planning. W: A., Hamrol, O., Ciszak, S., Legutko, M., Jurczyk, (red.), *Advances in Manufacturing. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, (s. 79–89); https://doi.org/10.1007/978-3-319-68619-6_8
- Duda, J., Habel, J. (2019). Manufacturing Activities Modelling for the Purpose of Machining Process Plan Generation. W: A., Burduk, E., Chlebus, T., Nowakowski, A., (red.), *Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance. ISPEM 2018* (s. 215–224). Springer.
- Duda, J., Habel, J., Pobożniak, J. (2002). Semi-generative CAPP system. *Web of Journals*.
- Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/19/UE z dnia 4 lipca 2012 r. w sprawie zużytego sprzętu elektrycznego i elektronicznego (WEEE). Dz.U. L 197 z 24.7.2012, s. 38–71.
- Erden, M., Komoto H, v. B. (2008). A review of function modeling: Approaches and applications. *Artificial Intelligence for Engineering Design, Analysis and Manufacturing*, 22(2), s. 147–169; <https://doi.org/10.1017/S0890060408000103>
- European Commission, *Definition of recycling*; https://joint-research-centre.ec.europa.eu/projects-and-activities/less-waste-more-value/definition-recycling_en
- Faiz, A., Kaneda, S., Wang, R., Osi, R., Sharma, P., Chen, F., Jiang, L. (2023). *Ll-mcarbon: Modeling the end-to-end carbon footprint of large language models*. Published as a conference paper at ICLR 2024; <https://arxiv.org/pdf/2309.14393>.

- Feldhausen, T., Heinrich, L., Saleeby, K., Burl, A., Post, B., MacDonald, E., Saldana, C., Love, L. (2022). Review of Computer-Aided Manufacturing (CAM) strategies for hybrid directed energy deposition. *Additive Manufacturing*, 56; <https://doi.org/10.1016/j.addma.2022.102900>
- Förster, R., Kaiser, M., Wenninger, S. (2023). Future vehicle energy supply - sustainable design and operation of hybrid hydrogen and electric microgrids. *Applied Energy*, 334; <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2023.120653>
- Frączek, J., Wojtyra, M. (2008). *Kinematyka układów wieloczołowych – metody obliczeniowe*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- Fu, Y., Qiu, C., Ni, L., Ye, H., Zou, H., Luo, Y., Liang, M. (2024). Cell structure control and performance of rigid polyurethane foam with lightweight, good mechanical, thermal insulation and sound insulation. *Construction and Building Materials*, 447; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.138068>
- Gawlik, J., Plichta, J., Świć, A. (2013). *Procesy produkcyjne*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Ghimouz, C., Kenn'e, J. P., Hof, L. A. (2023). On sustainable design and manufacturing for the footwear industry. *Materials & Design*, 233; <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112224>
- Goodrich, A., Hacke, P., Wang, Q., Sopori, B., Margolis, R., James, T. L., Woodhouse, M. (2013). A wafer-based monocrystalline silicon photovoltaics road map: Utilizing known technology improvement opportunities for further reductions in manufacturing costs. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 114, s. 110–135; <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2013.01.030>.
- Goosey, M., Poole, M. (2004). An introduction to high performance laminates and the importance of using optimised chemical processes in PCB fabrication. *Circuit World*, 30(4), s. 34–39, [DOI: 10.1108/03056120410539894].
- Górski, P., Krot, K., & Matuszewicz, W. (2016). Symulacje numeryczne fluidalnego systemu transportowego. In p. r. Knosali, *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji. T. 2* (s. 740–748). Opole: Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją.
- Górski, P., Krot, K., Zawisłak, M., Górnicz, T. M., Matuszewicz, W. (2017). Zastosowanie numerycznej mechaniki płynów w projektowaniu procesu technologicznego bazującego na transporcie fluidalnym na przykładzie wytwarzania elementów do układów fotogalwanicznych. *Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze*, 3, s. 75–80.
- Grabowik, C., Knosala, R. (2003). The method of knowledge representation for a CAPP system. *Journal of Materials Processing Technology*, 133, s. 90–98.

- Hallmann, M., Goetz, S., Schleich, B. (2019). Mapping of GD&T information and PMI between 3D product models in the STEP and STL format. *Computer-Aided Design*, 115, s. 293–306; <https://doi.org/10.1016/j.cad.2019.06.006>
- Hamilton, C. (1984). *A Guide to Printed Circuit Board Design*. Elsevier.
- Hamrol, A. (2023). *Zarządzanie i inżynieria jakości: Ze spojrzeniem w rzeczywistość 4.0*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Han, H., Gao, C., Zhao, Y., Liao, S., Tang, L., Li, X. (2020). Polycrystalline silicon wafer defect segmentation based on deep convolutional neural networks. *Pattern Recognition Letters*, 130, s. 234–241; <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2018.12.013>
- Han, Z., Huang, R., Huang, B., Jiang, J., Li, X. (2023). Data-Driven and Knowledge-Guided Approach for NC Machining Process Planning. *Computer-Aided Design*, 162; <https://doi.org/10.1016/j.cad.2023.103562>
- He, J., Zhang, P., Lu, X. (2025). The risk-based environmental footprints and sustainability deficits of nations. *Ecological Economics*, 230; <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2024.108501>
- Hendor Pompen (2024). Pobrane z: <https://www.hendor.com/en/vertical-immersion-pumps>
- Holland, P. P. M., Long, H., Mynors, D. (2002). Feature extraction from STEP (ISO 10303) CAD drawing files for metalforming process selection in an integrated design system. *Journal of Materials Processing Technology*, 125–126, s. 446–455.
- Honczarenko, J. (2000). *Elastyczna automatyzacja wytwarzania*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- Hosain, M. L., Fdhila, R. B. (2015). Literature Review of Accelerated CFD Simulation Methods towards Online Application. *Energy Procedia*, 75, s. 3307–3314; <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.07.714>.
- Hoshiba, K., Arai, H., Fukushima, S. (2024). Development of a voxel-based CAD system for upstream life cycle design and its application to LCA. *Procedia CIRP*, 122; <https://doi.org/10.1016/j.procir.2024.01.086>
- Houkes, W. (2009). The Nature of Technological Knowledge. Handbook of the Philosophy of Science. *Philosophy of Technology and Engineering*, 9, s. 309–350.
- Huang, G., Chairapat, S., Waiyagan, K. (2016). Automated process planning and cost estimation under material. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 86, s. 323–335.
- Huang, R., Fang, Z., Huang, B., Jiang, J. (2024). An effective NC machining process planning method via integrating grammar knowledge with deep learning. *Expert Systems with Applications*, 249, część: C; <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.123872>

- Ibrahim, O. A.-M., K. S., Hammoodi, K. A., Rashid, F. L., Askar, A. H. (2024). Review of hydrocarbon refrigerants as drop-in alternatives to high-GWP refrigerants in VCR systems: The case of R290. *Cleaner Engineering and Technology*, 23; <https://doi.org/10.1016/j.clet.2024.100825>
- Indhu, R., Vivek, V., Sarathkumar, L., Bharatish, A., Soundarapandian, S. (2018). Overview of Laser Absorptivity Measurement Techniques for Material Processing. *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*, 5; <https://doi.org/10.1007/s40516-018-0075-1>
- ISO 9013 (2017). *Thermal cutting – Classification of thermal cuts – Geometrical product specification and quality tolerances, reviewed and confirmed in 2022*.
- Jaeger, F. A. (2022). Challenges and requirements of exchanging Product Carbon Footprint information in the supply chain. *E3S Web of Conferences*, 349, s. 07005; <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202234907005>.
- Jun, Y., Raja, S., Park, S. (2001). Geometric Feature Recognition for Reverse Engineering using Neural Networks. *International Journal of Advancing Manufacturing Technology*, 17, s. 462–470.
- Kans, M., Löfving, M. (2024). Unlocking the circular potential: A review and research agenda for remanufacturing in the European wood products industry. *Heliyon*, 10(22); <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e40264>
- Kanyilmaz, A. (2019). The problematic nature of steel hollow section joint fabrication, and a remedy using laser cutting technology: A review of research, applications, opportunities. *Engineering Structures*, 183; <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.12.080>
- Karsandik, Y., Sabuncuoglu, B., Yildirim, B., Silberschmidt, V. V. (2023). Impact behavior of sandwich composites for aviation applications: A review. *Composite Structures*, 314; <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116941>
- Kassim, N., Yusof, Y., Awang, M. Z. (2016). Reviewing ISO 14649 though ISO10303. *ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11, s. 6599–6603.
- Khabbazi, M., Wikander, J., Onori, M., A., M. (2018). Object-oriented design of product. *Assembly Automation*, 38(1), s. 97–112; <https://doi.org/10.1108/AA-07-2016-084>
- Kijęński, J., Błędzki, A. K., Jeziórska, R. (2011). *Odzysk i recykling materiałów polimerowych*. Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Klimpel, A. (2012). Podstawy teoretyczne cięcia laserowego metali. *Przegląd Spawalnictwa – Welding Technology Review*, 84(6); <https://doi.org/10.26628/wtr.v84i6.289>

- Kosalaraman, K. K., Kendre, P. P., Manilal, R. D., Muthuganapathy, R. (2024). SketchCleanGAN: A generative network to enhance and correct query sketches for improving 3D CAD model retrieval systems. *Computers & Graphics*, 123; <https://doi.org/10.1016/j.cag.2024.104000>.
- Koszkul, J. (1999). *Materiały polimerowe*. Wydawnictwo. Politechniki Częstochowskiej.
- Krot, K., Chlebus, E. (2007). Aplikacja parametrycznych danych modeli CAD 3D w planowaniu procesów wytwarzania. Cz. 2: *Mechanik*, 7, s. 586–588.
- Krot, K., Chlebus, E. (2007). Identyfikacja parametrycznych cech konstrukcyjnych i technologicznych w środowisku systemów CAD 3D. Cz 1. *Mechanik*, 5/6, s. 522–524.
- Krot, K., Czajka, J. (2019). Processing of Design and Technological Data Due to Requirements of Computer Aided Process Planning Systems. *Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance. ISPEM 2018. Advances in Intelligent Systems and Computing* (s. 267–274). Springer.
- Krot, K., Kuliberda, M. Z. (2006.). Identyfikacja technologicznych obiektów elementarnych części maszyn w modelach geometrycznych CAD 3D w reprezentacji brzegowej. W: E. Chlebus (red.), *Inżynieria produkcji. Wiedza–wizja–programy ramowe*, (s. 169–176); Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.
- Krot, K., Kuliberda, M. Z. (2008). Metody integracji systemów CAD i CAPP. *Przegląd Mechaniczny*, 67(7–8), s. 47–50.
- Krot, K., Chlebus, E., Kuźnicka, B. (2017). Laser cutting of composite sandwich structures. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 17(3); <https://doi.org/10.1016/j.acme.2016.12.007>
- Krot, K., Chlebus, E., Chrapek, K., Jodkowski, B. (2013). Patent nr PL214786.
- Krot, K., Chlebus, E., Jodkowski, B., & Chrapek, K. (2013). Patent nr PL 214787.
- Krot, K., Górski, P., Matusiewicz, W. (2013). System transportu fluidalnego w obróbie horyzontalnej elementów do układów fotogalwanicznych. W: R. Knosala (red.), *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji* (s. 173–180). Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją.
- Krot, K., Górski, P., Matusiewicz, W. (2015). Warianty konstrukcyjne rozwiązań transportu fluidalnego elementów do układów fotogalwanicznych. W: R. Knosala (red.), *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji*, (t. 1, s. 881–889). Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją.
- Krot, K., Jodkowski, B., Chlebus, E., Faliński, W. (2012). Coating methods of polyurethane foam sandwich panel obtained by disassembly household appliances us-

- ing laser processing. W: J. Lewandowski (red.), *Product and packaging: tendencies for development in manufacturing* (s. 33-49). Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej.
- Kuliberda, M. Z., Krot, K. (2010). Praktyczne aspekty automatycznego rozpoznawania technologicznych obiektów elementarnych. *Mechanik*, 1, supl. *Referat z XVII Konferencji nt. Metody i środki projektowania wspomaganego komputerowo*, Kraszycyn, 7-9 października 2009 (s. 1-8).
- Kuttler Automation Systems (2025). *Wet Etching Isolation Machine*. Pobrane z: <http://kuttler.com.cn/en/product.asp?id=280>
- Lechler (2024). Pobrane z: <https://www.lechler.com/de/produkte/sortiment/industrie/flachstrahllduesen>
- Lee, H. C., Ihee, W. C., Park, H.-S. (2007). Generative CAPP through projective feature recognition. *Computers & Industrial Engineering*, 53, s. 241-246.
- Lee, K. S., Alam M., R., Rahman, M., Zhang, Y. F. (2001). Automated process planning for the manufacture of lifters. W: *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 17, s. 727-734.
- Lewandowski, J., Skołud, B., Plinta, D. (2014). *Organizacja systemów produkcyjnych*. Polskie Wydawnictwo Ekonomiczne.
- Li, J., Zhou, G., Zhang, C. (2022). A twin data and knowledge-driven intelligent process planning framework of aviation parts. *International Journal of Production Research*, 60(17), s. 5217-5234; <https://doi.org/10.1080/00207543.2021.1951869>
- Li, L., Zheng, Y., Yang, M., Leng, J., Cheng, Z., Xie, Y., Jiang, P., Ma, Y. (2020). A survey of feature modeling methods: Historical evolution and new development. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 61; <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2019.101851>
- Li, Y., Liu, X., Gao, J. X., Maropoulos, P. G. (2012). A dynamic feature information model for integrated manufacturing planning and optimization. *CIRP Annals*, 61(1), s. 167-170; <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2012.03.085>
- Lipman, R., Lubell, J. (2015). Conformance checking of PMI representation in CAD model STEP data exchange files. *Computer-Aided Design*, 66, s. 14-23; <https://doi.org/10.1016/j.cad.2015.04.002>
- Liu, J., To, A. (2017). Topology optimization for hybrid additive-subtractive manufacturing. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 55, s. 1281-1299; <https://doi.org/10.1007/s00158-016-1565-4>
- Liu, X., Salmeia, K. A., Rentsch, D., Hao, J., Gaan, S. (2017). Thermal decomposition and flammability of rigid PU foams containing some DOPO derivatives and other phosphorus compounds. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 124; <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2017.02.003>

- Locock, K. E., Terhorst, A., King, S., Scroggie, K. R. (2025). Disruptive technologies that deliver a circular economy for plastics. *Next Sustainability*, 6; <https://doi.org/10.1016/j.nxsust.2025.100098>
- Lustig, D., Paluszyński, W., Smalec, Z., Choroszy, B. (1990). Opracowanie systemów ekspertowych do komputerowo wspomaganego projektowania procesów technologicznych obróbki skrawaniem. *Raporty Instytutu Technologii Budowy Maszyn Politechniki Wrocławskiej SPR nr 45*.
- Ma, T., Shi, W., Han, J., Li, J., Guo, B., Li, J., Wang, Li., Yan, T. (2025). Bionic stepped drilling and milling composite tool based on beetle mouthparts: A comprehensive analysis of machining mechanism and cutting performance. *Journal of Manufacturing Processes*, 134, s. 263–284; <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.12.041>
- Macchi-Tejeda, H., Opatová, H., Leducq, D. (2007). Contribution to the gas chromatographic analysis for both refrigerants composition and cell gas in insulating foams – Part I: Method. *International Journal of Refrigeration*, 30(2); <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.04.003>
- Macchi-Tejeda, H., Opatová, H., Leducq, D. (2007). Contribution to the gas chromatographic analysis for both refrigerants composition and cell gas in insulating foams – Part II: Aging of insulating foams. *International Journal of Refrigeration*, 30(2); <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.04.004>
- Madan, A. K., Kunal, K., Kumar, B. (2022). A survey and feasibility research study on computer aided process planning (CAPP). *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 10(2); <https://doi.org/10.22214/ijraset.2022.38581>
- Mahajan, K. A., Javanjal, V. K., Sudhakar, G. P., Roundal, V. B., & Munde, K. H. (2022). Research on improvement of computer-aided process planning functions. *NeuroQuantology*, 20(10); doi: 10.14704/nq.2022.20.10.NQ551253
- Marin, M., Dumitru, B., Vlase, S. (2022). *Multibody Systems with Flexible Elements*. Basel, Beijing, Wuhan, Barcelona, Belgrade, Manchester, Tokyo, Cluj, Tianjin: Printed Edition of the Special Issue Published in Symmetry; <https://doi.org/10.3390/books978-3-0365-5257-6>
- Maszyzny do obróbki drewna Holzmann (2025). Pobrane z: <https://holzmann.pl/produkty/item/2837/Trak-pila-tasmowa-pozioma-Holzmann-BBS350>
- Matuszewicz, W., Krot, K., Chlebus, E., Górski, P., Zawislak, M. (2017). Patent nr PL 225094.
- Matuszewicz, W., Krot, K., Chlebus, E., Górski, P., Zawislak, M. (2017). Patent nr PL 225095.

- Matuszewicz, W., Krot, K., Chlebus, E., Górski, P., Zawiślak, M. (2017). Patent nr PL 225096.
- Matuszewicz, W., Krot, K., Chlebus, E., Górski, P., Zawiślak, M. (2017). Patent nr PL 225097.
- Matuszek, J., Plinta, D. (2000). *System komputerowego wspomagania projektowania procesów wytwarzania „SYSKLASS”*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Filia w Bielsku-Białej.
- Mauthner, G., Votruba, W., Ramsauer, C., Plessing, L., Trautner, T., Bleicher, F. (2022). Development of a CAM-in-the-Loop System for Cutting Parameter Optimization using an Instrumented Tool Holder. *Procedia CIRP*, 107: <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.04.053>
- Mengistu, A. T., Dieste, M., Panizzolo, R., Biazzo, S. (2024). Sustainable product design factors: A comprehensive analysis. *Journal of Cleaner Production*, 463; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2024.142260>
- Miles, V., Giani, S., Vogt, O., Kafieh, R. (2024). Recursive autoencoder network for prediction of CAD model parameters from STEP files. *Procedia Computer Science*, 232, s. 3239–3246; <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.02.139>
- Modak, N. M., Sinha, S., Ghosh, D. K. (2023). A review on remanufacturing, reuse, and recycling in supply chain – Exploring the evolution of information technology over two decades. *International Journal of Information Management Data Insights*, 3(1).
- Mohammed, S. K., Arbo, M. H., Tingelstad, L. (2021). Leveraging model based definition and STEP AP242 in task specification for robotic assembly. *Procedia CIRP*, 97, s. 92–97; <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.05.209>
- Mordaschew, V., Tackenberg, S. (2024). The Product Environmental Footprint – A Critical Review. *Procedia Computer Science*, 232; <https://doi.org/10.1016/j.procs.2024.01.049>
- Mun, D., Han, S., Junhwan, K., Oh, Y. (2003). A set of standard modeling commands for the history-based parametric approach. *Computer-Aided Design*, 35(13), s. 1171–1179; [https://doi.org/10.1016/S0010-4485\(03\)00022-8](https://doi.org/10.1016/S0010-4485(03)00022-8)
- Musiał, M. M., Chlebus, E., Krot, K., Chrapek, K. (2012). Automatyzacja systemu transportowego na linii technologicznej do recyklingu sprzętu AGD. W: R. Knosala (red.), *Innowacje w zarządzaniu i inżynierii produkcji* (s. 395–406). Oficyna Wydawnicza Polskiego Towarzystwa Zarządzania Produkcją.
- Naresh, Khatak, P. (2022). Laser cutting technique: A literature review. *Materials Today: Proceedings*, 56(5).

- Nzetchou, S., Durupt, A., Remy, S., Eynard, B. (2022). Semantic enrichment approach for low-level CAD models managed in PLM context: Literature review and research prospect. *Computers in Industry*, 135; <https://doi.org/10.1016/j.com-pind.2021.103575>
- Olczyk, W. (1968). *Poliuretany*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne.
- Overview of PCBA Manufacturing Process. (2025). Pobrane z: <https://www.pcbasic.com/blog/pcb-assembly-process.html>
- Park, K., Lee, S., Yi, J., Kim, S., Kwak, Y., Wang, I. (1996). Contactless magnetically levitated silicon wafer transport system. *Mechatronics*, 6(55), s. 591–610; [https://doi.org/10.1016/0957-4158\(95\)00083-6](https://doi.org/10.1016/0957-4158(95)00083-6)
- Paul, M., Kerkhoff, F., Ballenberger, T., Reinbold, N., Reinhart, G. (2024). Remanufacturing implementation on the shop floor – Insights from an industrial perspective. *Sustainable Production and Consumption*; <https://doi.org/10.1016/j.spc.2024.11.016>
- Pedersen, E., Arne, R. (2022). Challenges with product environmental footprint: a systematic review. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 27.2, s. 342–352; <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02022-3>
- Peng, P., Tian, T., Xiang, D., Yu, H., Niu, K., Gao, W., Yuan, Z., Gao, G. (2025). Research on cutting temperature of laser-ultrasonic composite turning of high volume fraction SiCp/Al composite materials. *Thermal Science and Engineering Progress*, 57; <https://doi.org/10.1016/j.tsep.2024.103100>
- Peyrton, J., Avérous, L. (2021). Structure-properties relationships of cellular materials from biobased polyurethane foams. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 145; <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100608>
- Pilch, R. (2022). APEKS 2 as a Modification of the APEKS Method. *Journal of KON-BiN*, 52(2); DOI 10.2478/jok-2022-0019
- Piłat, T., Knosala, R. (1998). The application of neural networks in group technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 78, s. 150–155.
- Pisec, I. F., Sandu, B. F., Oancea, G. O. (2019). A feature recognition and extraction method to used to develop a capp model for l-block family of parts. *Applied Mathematics, Mechanics, and Engineering*, 62, s. 201–210.
- Pobożniak, J. (2001). *Modelowanie przedmiotów w środowisku współbieżnego projektowania procesów technologicznych*. Rozprawa doktorska. Politechnika Krakowska, Wydział Mechaniczny.
- Prociak, A., Rokicki, G., Ryszkowska, J. (2016). *Materiały poliuretanowe*. Wydawnictwo Naukowe PWN.

- Qin, Y., Huang, Z., Ma, K., Dong, L., Li, J., Wang, Q.-C., Xu, Z., Chen, W.-Q. (2024). Life cycle assessment of recycling high impact polystyrene and acrylonitrile butadiene styrene plastic from waste refrigerators. *Journal of Cleaner Production*, 435; <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140294>
- Rai, P., Mehrotra, S., Priya, S., Gnansounou, E., Sharma, S. K. (2021). Recent advances in the sustainable design and applications of biodegradable polymers. *Biore-source Technology*, 325; <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2021.124739>
- RENA Technologies (2025). *High throughput surface treatment of bare semiconductor wafers for wafer fabrication*. Pobrane z: <https://www.rena.com/en/products/semiconductor/wafering>
- Riveiro, A., Quintero, F., Lusquiños, F., Comesaña, R., del Val, J., Pou, J. (2011). The Role of the Assist Gas Nature in Laser Cutting of Aluminum Alloys. *Physics Procedia*, 12, cz. A; <https://doi.org/10.1016/j.phpro.2011.03.069>
- Rojek, I. (2015). MLP neural nets in design of technological process. *Advances in Manufacturing Science and Technology*, 39, s. 87–95.
- Schuh, G., Prote, J.-P., Luckert, M., Hünnekes, P. (2017). Knowledge discovery approach for automated process planning. *Procedia CIRP*, 63, s. 539–544.
- Sharma, A., Yadava, V. (2018). Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials – A review. *Optics & Laser Technology*, 98.
- Shi, Y., Yicha, Z., Xia, K., Harik, R. (2020). A Critical Review of Feature Recognition Techniques. *Computer-Aided Design and Applications*, 17, s. 861–899; DOI: 10.14733/cadaps.2020.861-899
- Skogh, I.-B., De Vries, M. J. (2013). *Technology Teachers as Researchers*. Sense Publishers.
- Soori, M., Asmael, M. (2021). Classification of research and applications of the computer aided process planning in manufacturing systems. *Independent Journal of Management & Production*, 12(5), s. 1250–1281; <https://doi.org/10.14807/IJMP.V12I5.1397>, s. 1250-1281.
- Sormaz, D. N., Khoshnevis, B. (2003). Generation of alternative process plans in integrated manufacturing systems. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 14, s. 509–526.
- Srinivas, M. S., Shyam, Sankar, M. R., Khatri, O., Udayakumar, A. (2024). Machining of Cf/SiC composite with indigenously developed nano green cutting fluid: Machined surface fibre morphology. *Journal of Manufacturing Processes*, 132, s. 296–309; <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2024.10.084>, s. 296-309.

- Sundin, E. (2019). *The Role of Remanufacturing in a Circular Economy*. W: N.Z. Nasr (Ed.), *Remanufacturing in the Circular Economy (1st edition)*. s. 31–60; <https://doi.org/10.1002/9781119664383.ch2>
- Szybka, J., Pabian, S. (2021). APEKS – metoda podejmowania decyzji. *Science, Technology and Innovation*, 12(1), s. 45–50; doi: 10.5604/01.3001.0015.3310
- Tian, S., Sharma, A., Wu, L., Pawar, K. S. (2024). A systematic literature review on the Digital Platform and its role in the circular economy: state-of-the-art and future research directions. *Journal of Digital Economy*; <https://doi.org/10.1016/j.jdec.2024.12.001>.
- Tiwari, M. K., Rama Kotaiah, K., Bhatnagar, S. (2001). A Case-Based Computer-Aided Process-Planning System for Machining Prismatic Components. *International Journal of Advancing Manufacturing Technology*, 17, s. 400–411.
- Trzepieciński, T. (2018). Wybór metody cięcia materiałów kompozytowych. *Stal, Metale & Nowe Technologie*, 11–12, s. 10–14.
- Volpp, J. (2023). Laser beam absorption measurement at molten metal surfaces. *Measurement*, 209; <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2023.112524>.
- Wang, L. (2013). Machine availability monitoring and machining process planning towards Cloud manufacturing. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 6, s. 263–273.
- Wang, M., Ju, H., Wu, J., Qiu, H., Liu, K., Tian, W., Su, G. (2024). A review of CFD studies on thermal hydraulic analysis of coolant flow through fuel rod bundles in nuclear reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 171; <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2024.105175>.
- Wang, S., Lu, X., Li, X., Li, W. (2015). A systematic approach of process planning and scheduling optimization for sustainable machining. *Journal of Cleaner Production*, 67, s. 914–929.
- Weiss, Z., Dostatni, E., Hamrol, A., Miedziński, M. (1998). *Projektowanie współbieżne – concurrent engineering*. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej.
- Wen, P., Ma, Y., & Wang, R. (2023). Systematic knowledge modeling and extraction methods for manufacturing process planning based on knowledge graph. *Advanced Engineering Informatics*, 58; <https://doi.org/10.1016/j.aei.2023.102172>
- Wen, X., Liu, J., Du, C., Qu, P., Sheng, S., Liu, X., Zhou, H. (2022). The key technologies of machining process design: a review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 120, s. 2903–2921; <https://doi.org/10.1007/s00170-022-08982-y>

- Wieczorowski, K., Uniejewski, J. (1998). *Projektowanie procesów technologicznych wspomaganych komputerowo pakietem programów POLCAP*. Politechnika Poznańska, Instytut Technologii Mechanicznej.
- Wiedmann, T., Minx, J. (2008). A definition of 'carbon footprint'. *Ecological economics research trends, 1*, s. 1–11.
- Więckowski, J., Sałabun, W. (2025). Supporting multi-criteria decision-making processes with unknown criteria weights. *Engineering Applications of Artificial Intelligence, 140*; <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2024.109699>
- Winkler-Skalna, A., Łoboda, B. (2020). Determination of the thermal insulation properties of cylindrical PUR foam products throughout the entire life cycle using accelerated aging procedures. *Journal of Building Engineering, 31*; <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.101348>
- Wobit (2024). *Czujniki i urządzenia pomiarowe. Pomiar siły, momentu i ciśnienia. Czujniki siły (tensometryczne)*; <https://wobit.com.pl/produkty/738/kb52-czujniki-sily/>
- Wojtyra, M., Frączek, J. (2007). *Metoda układów wieloczłonowych w dynamice mechanizmów*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- Wu, W., Huang, Z., Zeng, J., Fan, K. (2021). A fast decision-making method for process planning with dynamic machining resources via deep reinforcement learning. *Journal of Manufacturing Systems, 58*, cz. A, s. 392–411; <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.12.015>
- Xiao, R., Zhang, C., Zhou, F., Chi, B., Zhang, J. (2024). An introduction to 5aCAE software based on DiBFM: CAD/CAE integration, dual interpolation, exact geometry and non-conforming mesh. *Engineering Analysis with Boundary Elements, 166*; <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.105843>
- Xiao, Y., Zheng, S., Shi, J., Du, X., Hong, J. (2023). Knowledge graph-based manufacturing process planning: A state-of-the-art review. *Journal of Manufacturing Systems, 70*, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2023.08.006>
- Xu, X., Wang, L., Newman, S. T. (2011). Computer-aided process planning – A critical review of recent developments and future trends. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, s. 1–31; DOI: 10.1080/0951192X.2010.518632
- Xue, Z., Marchi, M., Parashar, S., Li, G. (2015). Comparing Uncertainty Quantification with Polynomial Chaos and Metamodel-Based Strategies for Computationally Expensive CAE Simulations and Optimization Applications. *SAE Technical Paper*; <https://doi.org/10.4271/2015-01-0437>
- Yadroitsev, I. (2009). *Selective laser melting: Direct manufacturing of 3D-objects by selective laser melting of metal powders*. Lap Lambert Academic Publishing.

- Yoo, J. (2010). Solar cell fabrication using edge-defined film-fed growth (EFG) silicon wafers. *Applied Surface Science*, 257(5), s. 1612–1615; <https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2010.08.108>
- Yusof, Y., Latif, K. (2014). Survey on computer-aided process planning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75, s. 77–89.
- Zbiciak, R., Grabowik, C. (2017). Feature recognition methods review. *Proceedings of the 13th International Scientific Conference: Computer aided engineering, Polanica Zdrój, 22–25 June 2016*, (s. 605–615).
- Zhang, H., Wang, W., Wang, Y., Zhang, Y., Zhou, J., Huang, B., Zhang, S. (2025). Employing deep reinforcement learning for machining process planning: An improved framework. *Journal of Manufacturing Systems*, 78, s. 370–393; <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2024.12.010>
- Zhang, H., Wang, W., Zhang, S., Zhang, Y., Zhou, J., Wang, Z., Huang, R. (2024). A novel method based on deep reinforcement learning for machining process route planning. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 86; <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2023.102688>
- Zhang, S., Guan, Z., Jiang, H., Wang, X., Tan, P. (2024). BrepMFR: Enhancing machining feature recognition in B-rep models through deep learning and domain adaptation. *Computer Aided Geometric Design*, 111; <https://doi.org/10.1016/j.cagd.2024.102318>
- Zhang, Y., Wang, F., Chen, T. (2023). User-defined machining feature recognition based on semantic reasoning for B-rep models. *Computer-Aided Design & Applications*, 20(4), s. 763–785; <https://doi.org/10.14733/cadaps.2023.763-785>
- Zheng, J., Mu, Z. D., Xiao, H. B. (2011). The Research of the Semi-Generative CAPP System Design Based on Rough Set. *Applied Mechanics and Materials*, 66–68, s. 284–288.
- Zhou, J., & Camba, J. D. (2021). Computer-aided process planning in immersive environments: A critical review. *Computers in Industry*, 133; <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103547>
- Zhou, P., Yan, Y., Huang, N., Wang, Z., Kang, R., Guo, D. (2017). Residual Stress Distribution in Silicon Wafers Machined by Rotational Grinding. *Journal of Manufacturing Science and Engineering, Transactions of the ASME*, 139(8); DOI: 10.1115/1.4036125
- Zhou, S., Tang, T., Zhou, B. (2023). CADParser: A Learning Approach of Sequence Modeling for B-Rep CAD. *Proceedings of the Thirty-Second International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-23)*, (s. 1804–1812)).

- Zou, Q., & Feng, H.-Y. (2022). A robust direct modeling method for quadric B-rep models based on geometry–topology inconsistency tracking. *Engineering with Computers*, 38, s. 3815-3830; <https://doi.org/10.1007/s00366-021-01416-5>
- Zwickl-Bernhard, S. (2024). Integrating material recycling and remanufacturing in energy system optimization modeling: A review and showcase. *Advances in Applied Energy*, 16; <https://doi.org/10.1016/j.adapen.2024.100198>
- Zygmunt-Kowalska, B., Szajding, A., Zakrzewska, P., Kuźnia, M., Stanik, R., Gude, M. (2024). Disposal of rigid polyurethane foam with fly ash as a method to obtain sustainable thermal insulation material. *Construction and Building Materials*, 417; <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.135329>

Innovative Technologies in Production Planning, Recycling, and Technological Transport

The monograph provides a comprehensive summary of research on modern methods supporting product development, preparation of technological processes, recycling of composite materials, and the transport of components in continuous chemical processing. The publication covers three main research areas, complemented by a summary.

In the first chapter, the author analyzes computer-aided process planning (CAPP). The development of variant and generative approaches is described, with particular emphasis on their limitations and implementation possibilities. A key element of the chapter is the concept of features, which include functional, design, technological, and machining features. The monograph also presents methods for integrating CAD design data with CAPP systems through the analysis of 3D models in boundary representation (B-rep). Of particular importance are algorithms for identifying technological features (TEO) and the possibility of declarative representation of technological knowledge in the form of rules. The formulated research hypotheses concern the impact of functional features on defining product requirements and the effectiveness of rule-based TEO identification.

The second chapter presents innovative methods for recycling multi-material sandwich composites, especially those used in the housings of refrigeration devices. The author discusses the structure of these composites, analyzes the laser cutting process, and presents a technological line enabling efficient recycling processes. The presented solutions enable the achievement of high-purity recycled fractions and the partial reuse of recycled materials in the form of insulation panels.

The third chapter describes fluidized transport solutions used in the production of PCB boards and silicon components for photovoltaics. The developed variants of transporters minimize the contact between components and mechanical parts, reducing the risk of damage. Numerical modeling (MBS, CFD) and laboratory test results confirming the effectiveness of the developed designs are presented.

The summary of the monograph indicates the directions of further research work.

Key words: process planning, CAPP, features, composites recycling, technological transport

Monografia jest kompleksowym opracowaniem poświęconym nowoczesnym metodom wspierającym rozwój produktu i procesów technologicznych. Autor analizuje komputerowo wspomagane planowanie procesów (CAPP), innowacyjne technologie w recyklingu kompozytów warstwowych oraz zaawansowane rozwiązania transportu fluidalnego w przemyśle elektronicznym i fotowoltaicznym. Publikacja łączy teorię z praktycznymi badaniami, prezentując modele numeryczne, linie technologiczne i metody integracji danych, wskazując jednocześnie kierunki dalszych badań w zakresie recyklingu materiałów i optymalizacji procesów produkcyjnych.



OFICyna WYDAWNICZA
POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ

Wydawnictwa Politechniki Wrocławskiej
są do nabycia w sprzedaży wysyłkowej:
zamawianie.ksiazek@pwr.edu.pl

ISBN 978-83-8134-000-7