

AUTOREFERAT

do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego
w dziedzinie Nauk Technicznych
w dyscyplinie Budowa i Eksploatacja Maszyn
**przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych,
w szczególności określonych w art. 16 ust. 2 ustawy**

Piotr Domanowski

**Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy
Wydział Inżynierii Mechanicznej**

Bydgoszcz, 25.06.2018

SPIS TREŚCI

1	Imię i nazwisko	3
2	Posiadane dyplomy i stopnie naukowe.....	3
3	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	3
4	Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r.....	4
4.1	Tytuł osiągnięcia naukowego	4
4.2	Charakterystyka technologii magnetronowych	4
4.3	Opis urządzeń technologicznych do nanoszenia powłok PVD metodą rozpylania magnetronowego – konstrukcja, badania, wdrożenia, zastosowania	6
4.3.1	Linia technologiczna do nanoszenia cienkich warstw i powłok na wielkogabarytowe powierzchnie szyb	7
4.3.2	Urządzenie modułowe do magnetronowego napyłania narzędzi	15
4.3.3	Napylarka laboratoryjna.....	20
4.4	Aplikacje prac projektowo-konstrukcyjnych.....	23
5	Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych, dydaktycznych i organizacyjnych	38
5.1	Pozostałe prace badawczo-naukowe po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych	37
5.2	Pozostałe oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	38
5.3	Działalność dydaktyczna	39
5.4	Działalność organizacyjna	40
5.5	Uzyskane nagrody, wyróżnienia i odznaczenia.....	41

1 Imię i nazwisko

Piotr Andrzej Domanowski

2 Posiadane dyplomy i stopnie naukowe

1983	Technik mechanik - Technikum Mechaniczne, Zespół Szkół Mechanicznych nr 1 w Bydgoszczy.
1988	Magister inżynier – kierunek mechanika i budowa maszyn, specjalność eksploatacja maszyn, Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy, Wydział Mechaniczny. Praca dyplomowa pt.: „Łożyska hydrostatyczne z automatyczną regulacją dławienia”.
1988	Dyplom ukończenia Studium Pedagogicznego, Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy.
1998	Stopień naukowy doktora nauk technicznych, dziedzina: nauki techniczne, dyscyplina: budowa i eksploatacja maszyn, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Produkcji, Rozprawa pt.: „Badania teoretyczne i doświadczalne quasi-obwiedniowej obróbki elektrochemicznej”, promotor: prof. dr hab. inż. Jerzy Kozak, recenzenci: dr hab. inż. Lucjan Dąbrowski, dr hab. inż. Adam Ruszaj.

3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu

1988 - 1989	Akademia Techniczno-Rolnicza, Zakład Podstaw Konstrukcji Maszyn Technologicznych - Jednostka Innowacyjna, pracownik naukowo-techniczny
1989 - 1998	Akademia Techniczno-Rolnicza w Bydgoszczy, Katedra Obrabiarek i Robotów, asystent naukowo-dydaktyczny
1998 - 2000	Akademia Techniczno-Rolnicza, Katedra Obrabiarek i Robotów, adiunkt
2000 - 2009	Akademia Techniczno-Rolnicza, Katedra Inżynierii Produkcji, adiunkt
2006 - obecnie	Biuro Konstrukcyjno-Wdrożeniowe Piotr Domanowski - jednoosobowa działalność gospodarcza
2009 - obecnie	Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Instytut Technik Wytwarzania, Zakład Inżynierii Produkcji, adiunkt

4 Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r.

4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki wskazuję wybrane oryginalne opracowania projektowe, konstrukcyjne i technologiczne pod tytułem:

PROJEKT, KONSTRUKCJA I WDROŻENIA URZĄDZEŃ TECHNOLOGICZNYCH ZWŁASZCZA DO NANOSZENIA POWŁOK METODĄ ROZPYLANIA MAGNETRONOWEGO

Zakres osiągnięcia obejmuje następujące opracowania projektowo-konstrukcyjne i prace wdrożeniowe w obszarze technologii magnetronowych:

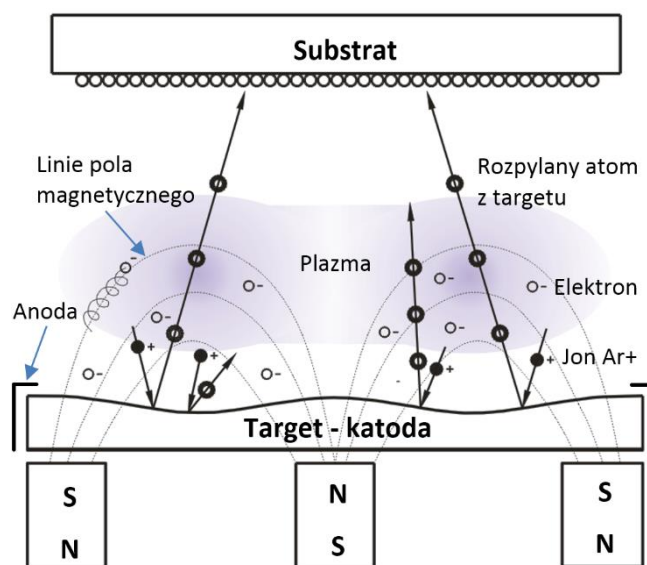
- projekt i konstrukcja linii przemysłowej do nanoszenia cienkich powłok na wielkogabarytowe powierzchnie szyb metodą jonowego rozpylania magnetronowego, wdrożenie Bohamet S.A., 2010,
- projekt i konstrukcja modułowej napylarki magnetronowej do nanoszenia cienkich powłok na narzędzia trzpieniowe oraz do obróbki plastycznej i form wtryskowych, wdrożenie Bohamet S.A., 2013,
- projekt i konstrukcja laboratoryjnej napylarki magnetronowej, wdrożenie Bohamet S.A., 2015.

4.2 Charakterystyka technologii magnetronowych

Obszar aktywności naukowo-technicznej autora dotyczy zagadnień związanych z nanoszeniem cienkich powłok na materiały konstrukcyjne metodą jonowego rozpylania magnetronowego oraz urządzeniami do realizacji tej technologii. W okresie ostatniej dekady obserwuje się znaczący postęp w wykorzystaniu metod plazmowej inżynierii powierzchni do modyfikacji warstwy wierzchniej. Jedną z najważniejszych metod jest metoda rozpylania magnetronowego. Metoda ta polega na wytwarzaniu par ciała stałego (targetu) poprzez bombardowanie jego powierzchni jonami, najczęściej argonu. Pary te podlegają częściowej jonizacji stając się w ten sposób składnikami plazmy [Wasa, K. *Handbook of Sputter Deposition Technology: Fundamentals and Applications for Functional Thin Films, Nano-Materials and MEMS*, 2012, Elsevier Science i in.]. Pęd cząstek par wynika z pędu jonów, bombardujących powierzchnię targetu. Pary targetu ulegają kondensacji na powierzchni podłoża, znajdującego się w odległości rzędu 10^{-1} m od powierzchni targetu, tworząc tam powłokę. W przypadku obecności cząstek gazu reaktywnego w stosunku do materiału targetu, pomiędzy parami

materiału targetu a cząstkami gazu reaktywnego dochodzi do reakcji chemicznej w rezultacie czego na powierzchni podłoża tworzy się warstwa związku chemicznego, np. azotku tytanu w przypadku rozpylania targetu tytanowego w atmosferze mieszaniny argonu i azotu. Odległość target-podłoże jest dobrana celowo i odpowiada w przybliżeniu drodze swobodnej cząstek przy ciśnieniu roboczym w komorze próżniowej rzędu 10^{-3} Pa, wynikającym z ustalonej ilości gazu podawanego w sposób ciągły do komory próżniowej oraz wydajności układu pompowego. Prowadzenie procesu plazmowego przy wyższych wartościach ciśnień sprzyja wydajności rozpylania, zmniejszając jednak wartość drogi swobodnej cząstek plazmy, zwiększając tym samym prawdopodobieństwo zderzeń międzycząstkowych i w konsekwencji prowadząc do dyssypacji energii tych cząstek na zderzenia, co prowadzi m. in. do silnej kolumnaryzacji struktury powłoki a krańcowym przypadku do zahamowania wzrostu powłoki. Prowadzenie procesu plazmowego przy niższych ciśnieniach zmniejsza wydajność rozpylania, sprzyja jednak zwiększeniu drogi swobodnej i w konsekwencji zapewnia możliwość wytwarzania powłok o dużej gęstości; w krańcowym przypadku rozpylanie ustaje ze względu na niemożność wywołania wyładowania elektrycznego w gazie. **Dobór ciśnienia procesu plazmowego jest więc jednym z najbardziej kluczowych elementów skutecznej technologii powłok.**

Podczas rozpylania magnetronego procesy jonizacji gazów procesowych są wspomagane obecnością lokalnego pola magnetycznego wytworzonego na bazie magnesów stałych umieszczonych bezpośrednio pod materiałem rozpylanym - targetem (rys. 1).



Rys. 1. Rozpylanie magnetrone

Źródłem par nanoszonego materiału są najczęściej magnetrone układy rozpylające, produkowane przez wysoko wyspecjalizowane firmy zachodnie. Ich możliwości technologiczne determinowane są parametrami stosowanych magnetronów, w szczególności przemysłowych magnetronów prostokątnych i kołowych. Obecnie, najczęściej stosuje się

zasilanie impulsowe systemu: unipolarne lub bipolarne, ze średnią częstotliwością, co gwarantuje stabilność procesów rozpylania. Rozpylony z targetu materiał kondensuje na podłożu w postaci cienkiej warstwy materiału wyjściowego lub/i związku chemicznego z gazem reaktywnym występującym w atmosferze procesu osadzania. Układy magnetronowe do nanoszenia warstw przy obniżonym ciśnieniu są szeroko stosowane zarówno w wielu dziedzinach przemysłu, jak i w laboratoriach naukowo-badawczych.

Wybór systemu do nanoszenia powłok cienkowarstwowych zależy od stawianych wymagań oraz kształtu napyłanej powierzchni. Podłoża pokrywane za pomocą magnetronowych systemów/linii napyłających stosowane są na potrzeby: architektury budowlanej, optyki, narzędzi skrawających, narzędzi do obróbki plastycznej, form wtryskowych, elementów elektroniki i in. Urządzenia do napyłania powłok cienkowarstwowych stosowane są w dwóch odmianach, jako potokowe (In-line) i wsadowe (off-line) linie produkcyjne, różniące się sposobem realizacji cyklu próżniowego. Działanie systemu wsadowego zakłada prowadzenie procesu otrzymywania warstw w jednej komorze roboczej, przy czym umożliwia nanoszenie powłok na powierzchnie o rozwiniętych kształtach, lecz na ograniczonej liczbie podłoży, co wpływa bezpośrednio na ekonomię procesów wytwarzania powłok cienkowarstwowych. W systemie wsadowym cykl produkcyjny składa się z kolejno realizowanych cykli próżniowych.

Linie potokowe składają się z kilku (kilkunastu) komór roboczych, w których istnieje możliwość pokrywania wielu podłoży, ale w praktyce tylko płaskich. Po załadunku do komory roboczej określonej liczby podłoży realizowany jest cykl próżniowy. W systemie potokowym pokrywane powłokami podłoża przemieszczają się przez kolejne komory w sposób ciągły przy „otwartym” wejściu i wyjściu linii. Warunki próżniowe są osiąmane w wyniku pompowania kolejnych komór oraz śluz między nimi (tzw. komór buforowych). Dzięki odpowiednim rozwiązaniom konstrukcyjnym zapewnione są wymagane warunki procesów osadzania powłok przy dynamicznie „otwartym” systemie próżniowym.

4.3 Opis urządzeń technologicznych do nanoszenia powłok PVD metodą rozpylania magnetronowego – konstrukcja, badania, wdrożenia, aplikacje

Zainteresowanie autora technologiami nanoszenia powłok cienkowarstwowych a także projektowanie urządzeń do ich nanoszenia wynikało z wieloletniej współpracy z firmą Bohamet S.A. w Białych Błotach k. Bydgoszczy, producentem okien okrętowych. Zapewnienie wymaganych cech użytkowych okien wiąże się często z koniecznością nanoszenia cienkowarstwowych powłok funkcyjnych o dużej odporności na oddziaływanie środowiska. Sposobem, który może zapewnić równomierne, wydajne i stabilne osadzanie cienkich warstw na wielkogabarytowych taflach szklanych jest metoda próżniowego jonowego rozpylania magnetronowego. Zapewnienie powtarzalnych właściwości par materiału wyjściowego (targetu), a tym samym wytworzonych powłok na pokrywanych powierzchniach, szczególnie wielkogabarytowych, wymagało opracowania projektowego i konstrukcyjnego, łącznie

z wdrożeniem przemysłowym linii technologicznej. W wyniku dalszych prac badawczo-rozwojowych (2015-2016) zastosowano w urządzeniu, zamiast ciągłego dozowania gazu, innowacyjną technologię impulsowego wstrzykiwania gazu roboczego GIMS (Gas Injection Magnetron Sputtering). Po raz pierwszy na skalę przemysłową technologia została wdrożona przez autora przy współpracy z zespołem warszawskim w Bohamecie S.A. Za projekt ten otrzymałem w 2016 roku zespołową nagrodę naukową Politechniki Warszawskiej.

Drugie oryginalne osiągnięcie projektowe, o znaczeniu użytkowym, stanowi opracowanie modułowego urządzenia do nanoszenia cienkich warstw na powierzchnie narzędzi. W urządzeniu tym zastosowano technologię rozpylania magnetronowego metodą PA-PVD (Plasma Activated Physical Vapour Deposition), wraz z układem zasilania dwóch magnetronów i sterowania modulacją impulsów umożliwiającą wytwarzanie warstw gradientowych.

Kolejnym osiągnięciem jest napylarka laboratoryjna umożliwiająca prowadzenie prac badawczych związanych z opracowywaniem nowych technologii na ww. urządzenia przemysłowe oraz prowadzenie prac rozwojowych dot. układów zasilania elektrycznego i impulsowego zasilania gazowego.

4.3.1 Linia technologiczna do nanoszenia cienkich warstw i powłok na wielkogabarytowe powierzchnie szyb

Oryginalnym osiągnięciem projektowym, konstrukcyjnym, wdrożeniowym i badawczym jest linia do przemysłowego nanoszenia cienkich powłok na wielkogabarytowe tafle szklane o wymiarach $2250 \times 3210 \text{ mm}^2$ i grubościach od 4 do 25 mm, z zastosowaniem technologii magnetronowego nanoszenia powłok. W procesie projektowania linii istotne było zapewnienie specyficznych wymagań wynikających z kształtu i wymiarów szyb przeznaczonych na okna okrętowe, które istotnie różnią się od masowo produkowanych tafli szklanych. Przemysłowe układy magnetronowe produkowane są w Europie przez nieliczne firmy (Leybold Optics, Fraunhofer Institute, Von Ardenne Anlagentechnik w Niemczech i Gencoa w Wielkiej Brytanii). Ich parametry techniczne jednak nie spełniają specyficznych wymagań technologicznych i użytkowych stawianych w produkcji jednostkowej szyb z przeznaczeniem do okien okrętowych.

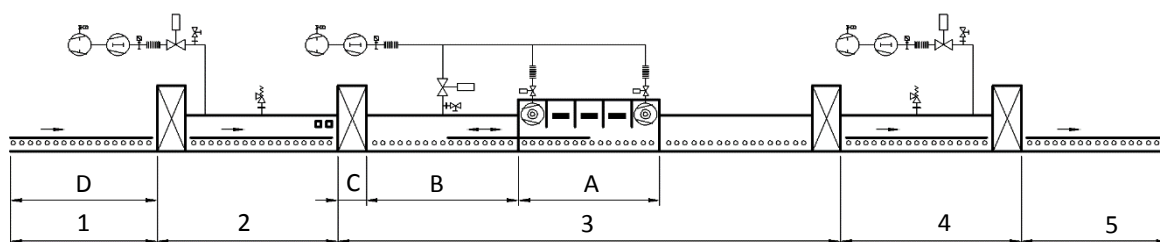
Proces wytworzenia linii produkcyjnej obejmował zaprojektowanie i wykonanie prototypu linii przeznaczonej do nanoszenia cienkich jedno- i wielowarstwowych powłok (optycznych, dekoracyjnych i in.) metodą magnetronowego rozpylania w atmosferze argonu i gazów reaktywnych [I.C.5]. Wybrano koncepcję linii w wersji off-line, zakładając jednak w przyszłości możliwość rozbudowywania systemu również w wersji in-line. Spełnienie wymagań stawianych powłokom nanoszonym na płyty szklane przeznaczone na okna okrętowe determinowało założenia konstrukcyjne związane z projektowaniem komór stanowiska próżniowego, parametrów układów pompowych i magnetronowego systemu rozpylającego. Zadania konstrukcyjno-badawcze obejmowały następujące prace:

- opracowanie konstrukcji mechanicznej i wykonanie prototypu linii,
- opracowanie algorytmu sterowania oraz kontroli cyklu pompowania i procesu technologicznego,
- wykonanie planarnych magnetronów prostokątnych,
- zastosowanie impulsowego zasilania elektrycznego systemu magnetronowego rozpylania.

Linie do nanoszenia cienkich powłok metodą rozpylania magnetronowego zaprojektowano w układzie horyzontalnym (rys. 2). Wymiary zespołu pięciu komór i elementów transportu podłoży w linii wynoszą $18000 \times 1400 \times 3030$ mm (długość $\times$ wysokość $\times$ szerokość).

Linia technologiczna składa się z następujących podzespołów: stołu załadowniczego (1), komory próżniowej wejściowej (2), komory próżniowej procesowej (3), komory próżniowej wyjściowej (4) oraz stołu wyładowniczego (5). Wszystkie te podzespoły zostały złożone z takich modułów jak: komora magnetronowa (A), komora próżniowa (B), zawór szczelinowy (C) oraz napęd rolnkowy (D).

Moduły linii (rys. 3) są połączone ze sobą za pomocą zunifikowanych kołnierzy, co umożliwia dowolną konfigurację linii. Sterowanie śluzami próżniowymi pozwala ustalać niezależne warunki ciśnieniowe w poszczególnych częściach linii podczas kolejnych faz cyklu technologicznego.

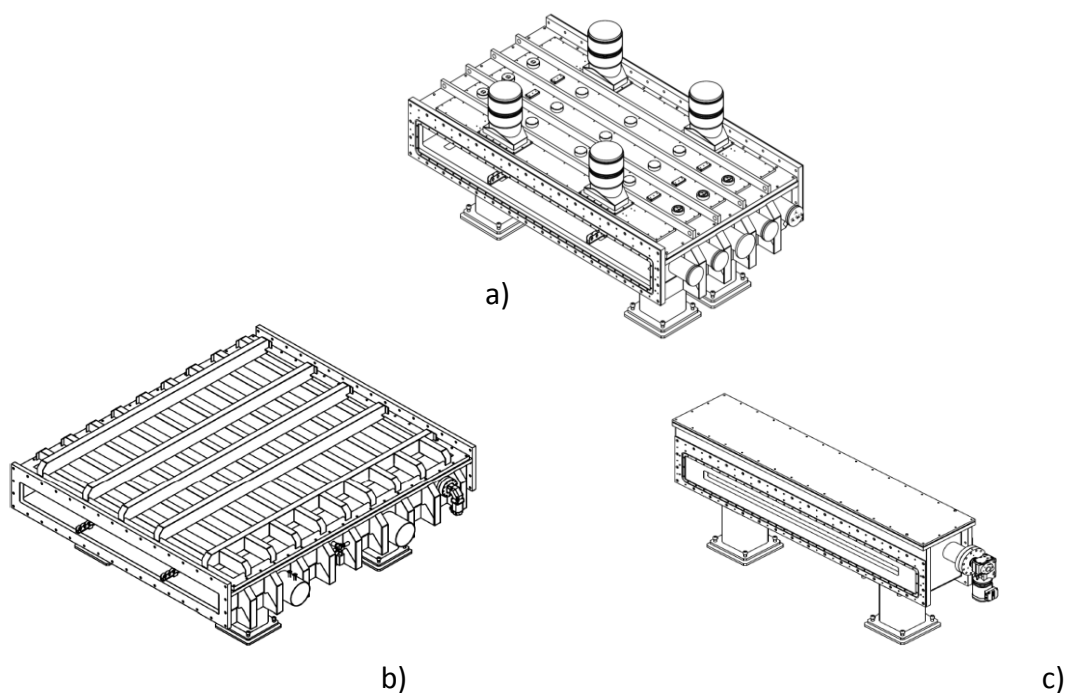


Rys. 2. Schemat linii do nanoszenia cienkich warstw na tafle szklane metodą magnetronową:
 (1) stół załadowniczy, (2) moduł wejściowy, (3) komora procesowa, (4) moduł wyjściowy,
 (5) stół wyładowniczy, gdzie: (A) obszar strefy rozpylania; (B) obszar poza strefą rozpylania,
 (C) zawór szczelinowy, [I.C.6]

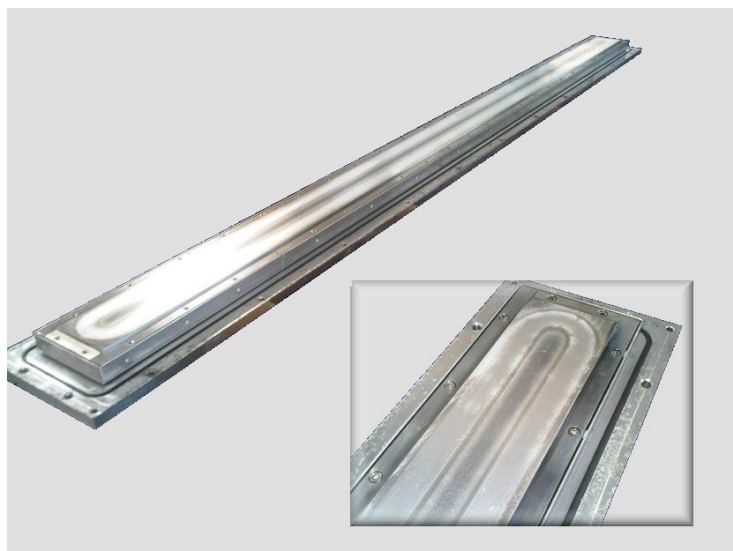
Wstępna próżnia w komorach podzespołów (2) i (4) jest uzyskiwana za pomocą zestawu pomp: obrotowej olejowej, dwustopniowej BW-200 i Root'a PR-2100 produkcji Tepro Koszalin. Pompy umożliwiają osiągnięcie tzw. wstępnej próżni rzędu 1×10^{-3} hPa. Pomiar próżni realizowany jest za pomocą głowic Piraniego TPR. Próżnia w komorze procesowej (3) jest utrzymywana na poziomie 10^{-5} hPa za pomocą zespołu pomp turbomolekularnych (cztery pompy turbomolekularne HiPace 1500U firmy Pfeiffer Vacuum). Ciśnienie jest mierzone głowicą jonizacyjną z gorącą katodą IMR oraz głowicą pojemnościową CMR. Do komory procesowej (3) możliwe jest wprowadzenie gazów technologicznych takich jak argon, tlen i azot, których obecność i ilość (natężenie przepływu) są określone wymaganiami procesu

rozpylania (procesy reaktywne i niereaktywne). Natężenie przyływu gazów jest ustalane przepływomierzem masowym ($18 \div 900$ sccm dla argonu i $6 \div 300$ sccm dla tlenu i azotu). Między magnetronami zamontowano przesłony separujące strefy rozpylania magnetronów i minimalizujące krzyżowe „przepylenia” parami materiałów rozpylanych z sąsiednich magnetronów. Komora procesowa (3) osłonięta jest od wewnątrz przykręcanymi ekranami ochronnymi, co minimalizuje czas obsługi podczas czyszczenia komory, ponadto wyposażona jest w szklane wzierniki, pozwalające śledzić in-situ proces rozpylania.

W pierwszej fazie cyklu technologicznego podłoża jest umieszczane na stole wejściowym (1). Po otwarciu zaworu szczelinowego podłoża są wprowadzane do komory próżniowej wejściowej (2). Komora tego modułu jest wyposażona w elektrody służące do czyszczenia podłoży szklanych w wyładowaniu jarzeniowym. Następnie, podłoża są przemieszczane do komory procesowej (3). W komorze tej można wyróżnić trzy strefy. Główna z nich to strefa rozpylania magnetronowego, zawiera trzy magnetrony liniowe WMP100 o długości 2500 mm, wykonane na Politechnice Wrocławskiej (rys. 4), których podstawowym elementem jest układ magnetyczny na bazie magnesów stałych NdFeB [II.E.9]. Po zakończeniu napyłania w komorze procesowej (3) i odpompowaniu objętości komór próżniowych podzespołów (2) i (4) następuje otwarcie zaworów szczelinowych między komorą procesową oraz komorami: wejściową i wyjściową. Podczas pracy linii, podłoża (tafle szklane) są transportowane przez całą długość linii za pomocą mechanizmu rolkowego, napędzanego serwosilnikiem za pomocą łańcucha dwurzędowego. Charakterystyka ruchu jest w pełni programowalna w zakresie prędkości od 0 do 50 mm/s. Mniejsze tafle umieszczane są na paletach. Na stole zamontowano nastawny przyrząd liniowy umożliwiający prawidłowe ustalenie położenia tafli.



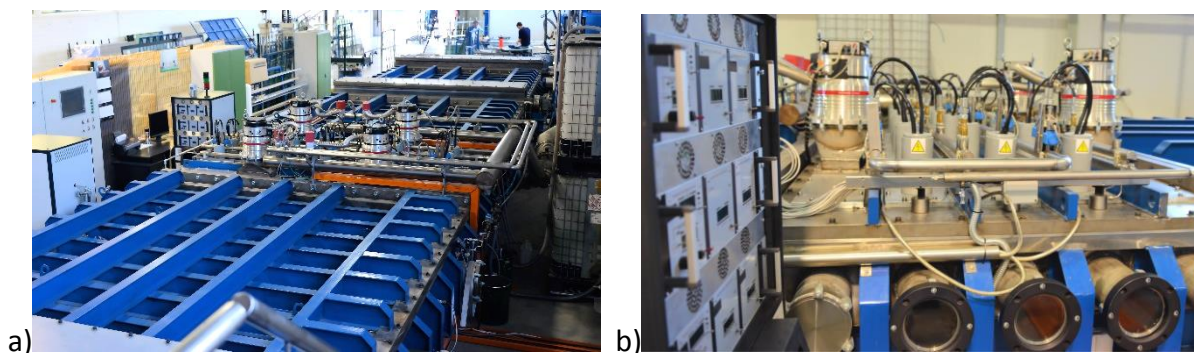
Rys. 3. Moduły: a) komora magnetronowa, b) komora próżniowa, c) zawór szczelinowy [I.C.6]



Rys. 4. Magnetron liniowy WMP100x2500 mm [II.E.9]

Strefa rozpylania w komorze procesowej umiejscowiona jest między strefami, w których nie następuje osadzanie cienkich warstw. W zależności od wymagań realizowany jest programowalny, dwukierunkowy, wielokrotny ruch taflí pod magnetronami. Możliwe jest pokrywanie taflí szklanej podczas ruchu między poszczególnymi strefami komory procesowej (3) tak, że może ona, przesuając się ruchem posuwisto-zwrotnym całkowicie opuszczać strefę rozpylania pod magnetronami.

Elementy przyłączeniowe pomp turbomolekularnych w tym module mają takie same wymiary jak elementy mocujące wyrzutnie magnetronowe, co umożliwia ich montaż w różnych konfiguracjach i może mieć znaczenie przy optymalizacji parametrów procesu technologicznego (np. przy montażu większej ilości magnetronów). Komora technologiczna jest w trakcie pracy „pod próżnią”, a ruch podłoża między sąsiednimi komorami: wejściową i wyjściową jest możliwy po wyrównaniu ciśnień. Podzespół wejściowy (2) wyposażony został dodatkowo w elektrody do czyszczenia plazmowego podłoży. Na stole wyładowczym (5) realizowane są operacje służące przygotowaniu szklanych taflí do zespalandu lub pokrywania lakierem zabezpieczającym napyloną powierzchnię. Zapowietrzanie komory odbywa się przez wtłaczanie azotu, ograniczone czujnikiem ciśnienia oraz zabezpieczone zaworem bezpieczeństwa do ciśnienia 0,2 bar. Dla celów serwisowych przewidziano możliwość zdejmowania górnej pokrywy komory próżniowej. Zaprojektowany prototyp (rys. 5 i 6) został wykonany i wdrożony do produkcji w firmie Bohamet S.A. w Białych Błotach (*załącznik 8.1*). Koszt linii produkcyjnej wyniósł ok. 5 900 000 PLN.

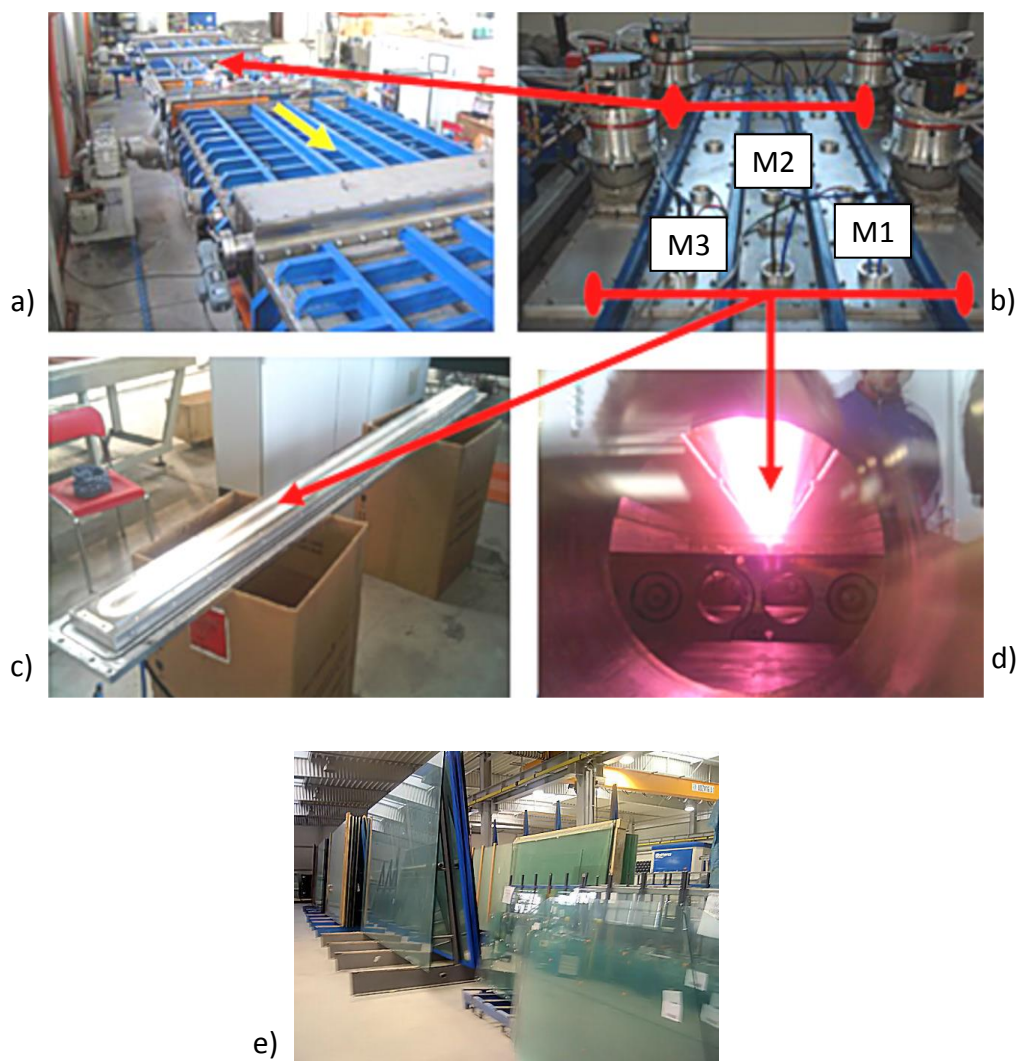


Rys. 5. Ilustracja prototypu linii do nanoszenia cienkich powłok na tafle szklane metodą magnetronową: a) widok linii, b) widok wyrzutni magnetronowych

Dla potrzeb sterowania cyklem pracy linii i procesem napyłania zaprojektowałem wraz z zespołem automatyków, algorytm sterowania linią technologiczną będący podstawą budowy układu sterowania oraz programu sterującego [I.C.6]. Zasadniczymi elementami układu sterowania linią są układy sterowania systemem próżniowym, których zadaniem jest realizacja następujących funkcji:

- sterowanie procesem otrzymywania próżni w komorach technologicznych,
- sterowanie wprowadzaniem, wyprowadzaniem i przemieszczaniem tafli szklanych w komorach próżniowych,
- sterowanie procesem technologicznym nanoszenia cienkich warstw (sterowanie dozowaniem gazów technologicznych, zasilaniem magnetronów, przemieszczaniem tafli szklanych podczas napyłania),
- tworzenie receptur procesu technologicznego wyrobu, generowanie raportów przebiegu produkcji.

System sterowania zawiera zabezpieczenia, układy zasilające, układy napędowe zaworów klapowych (otwierających i zamykających komory próżniowe), układy napędowe przemieszczania tafli szklanych w komorach próżniowych, układy napędowe pomp próżniowych obrotowych, Root'a i turbomolekularnych, pomocnicze układy stykowe, sterownik PAC (Programowalny Sterownik Automatyki) typu ControlLogix firmy Rockwell oraz komputer panelowy typu PC wyposażony w ekran dotykowy, spełniający rolę interfejsu HMI (ang. Human Machine Interface). Z pulpitu komputera PC istnieje możliwość wyboru opcji pracy, konfigurowanie linii, zadawanie parametrów i wizualizacja procesu. Pomocnicze pulpity operatorskie umieszczone na początku i końcu linii technologicznej umożliwiają rozpoczęcie i zatrzymanie procesu przez operatora linii. Ciśnienie w komorach próżniowych mierzone jest za pośrednictwem czujników o różnych zakresach pomiarowych. Serwonapędy, sterujące ruchem tafli szklanych w komorach próżniowych, pozwalają na ustalanie zadanych szybkości, zakresu i kierunku przesuwu.

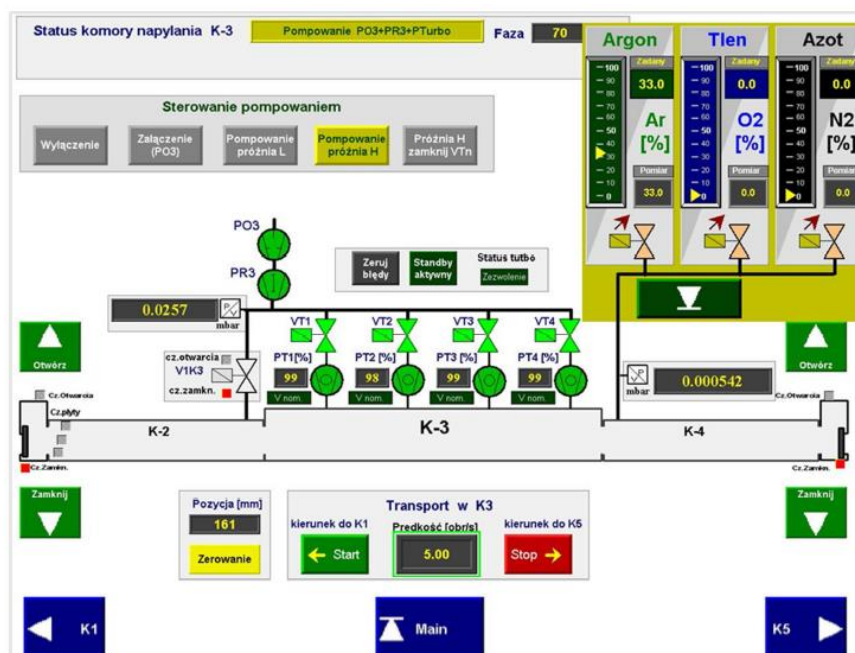


Rys. 6. Ilustracja prototypu linii do nanoszenia cienkich powłok na tafle szklane o złożonej konstrukcji metodą magnetronową: (a) – wielokomorowa linia technologiczna w firmie Bohamet S.A. (b, c, d) - 3 magnetryny liniowe M1, M2, M3, (e) - wielkogabarytowe szyby pokrywane powłokami przy wykorzystaniu stanowiska magnetronowego

Oprogramowanie linii technologicznej obejmuje program sterowania w sterowniku PAC oraz program interfejsu użytkownika (HMI). Program interfejsu umożliwia wybór jednego z trzech trybów pracy linii:

- tryb automatyczny – nanoszenie warstw zgodnie ze zdefiniowaną procedurą,
- tryb półautomatyczny – nanoszenie warstw w opcji sterowania ręcznego,
- tryb serwisowy – testowanie wszystkich elementów składowych linii technologicznej.

Wizualizacja działania linii może odbywać się na różnych poziomach i obejmować dowolne podzespoły linii technologicznej (rys. 7).

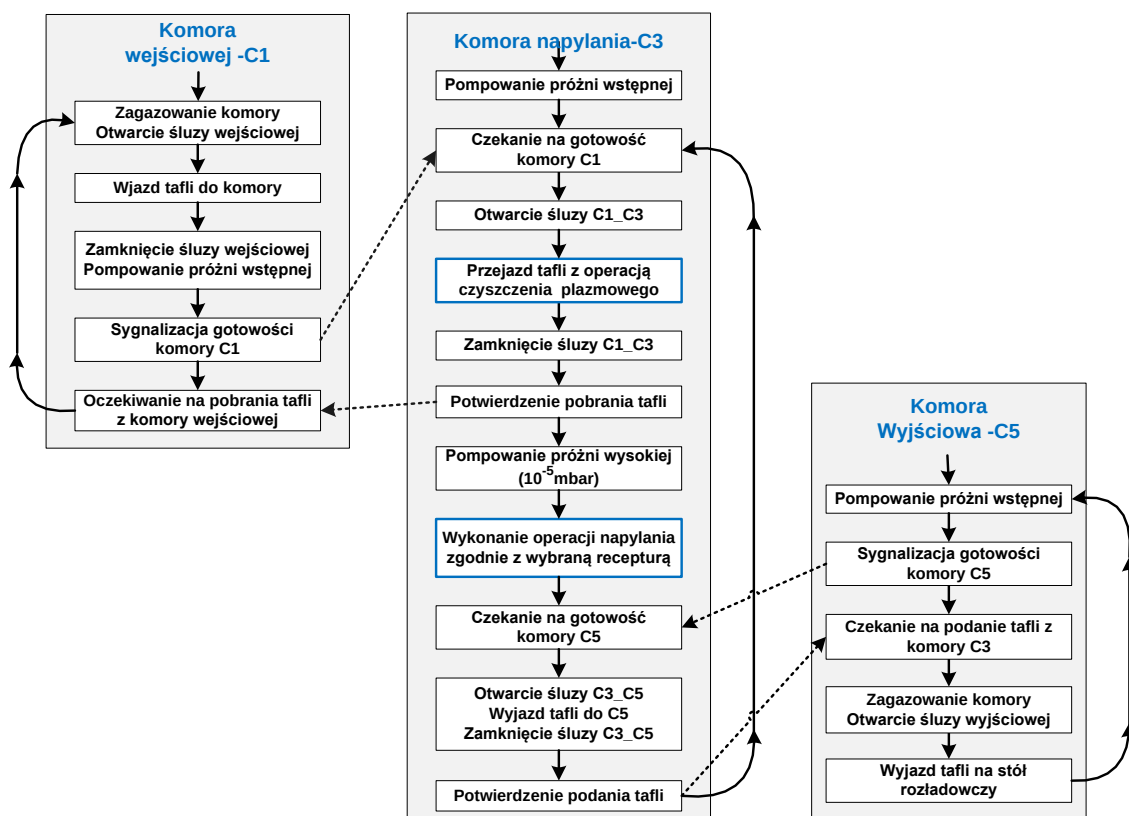


Rys. 7. Wizualizacja stanu linii technologicznej (ekran komputera PC) [I.C.6]

Proces technologiczny realizowany jest w trybie automatycznym i półautomatycznym wg głównej procedury sterowania poprzez zadawanie wartości wybranych parametrów technologicznych i synchronizację działających współbieżnie niezależnych modułów programowych. Jako niezależny proces, realizowana jest równoległa procedura testująca stany zabronione i awaryjne. Procedura ta dotyczy również trybu serwisowego i zabezpiecza linię technologiczną przed błędnymi poleceniami mogącymi spowodować uszkodzenie. W trybie pracy automatycznej proces nanoszenia warstw na powierzchnię podłoża odbywa się zgodnie z parametrami zdefiniowanymi w procedurze procesu napyłania. Algorytm sterowania komorą próżniową ilustruje rys. 8.

W trybie pracy półautomatycznej parametry dla poszczególnych operacji wybiera i ustawia operator. Tryb ten jest dedykowany do wykonywania testów oraz opracowywania nowych procedur technologicznych. Procedury technologiczne zadają określone wartości parametrów procesu napyłania, między innymi takich jak:

- liczba cykli przemieszczania taflí w strefie (A) komory modułu (3) – rys. 2,
- prędkość przemieszczania podłoża w kolejnych fazach ich ruchu,
- ciśnienie gazów roboczych w komorze rozpylania oraz natężenia przepływów gazów technologicznych (argon, tlen, azot),
- moc wydzielana w materiałach rozpylanych (targetach) magnetronów WMP100×2500 w poszczególnych fazach ruchu podłoża.



Rys. 8. Algorytm sterowania komorą próżniową [I.C.6]

Do zasilania układów magnetronowych zastosowano autonomiczne źródła prądowe, w których dystrybucja energii odbywa się niezależnie od impedancji obciążenia. Stabilizacja prądu następuje w układzie przetwarzania bez wykorzystania ujemnego sprzężenia zwrotnego.

Zasilacz pojedynczego magnetronu WMP100×2500 pracuje w systemie master-slave (trzy jednostki 10kW połączone równolegle, co pozwala zasilać magnetron mocą 30 kW). Jak wykazały przeprowadzone pomiary układu zasilania niestabilności związane z wyładowaniami łukowymi (w szczególności podczas rozpylania targetu Al, gdy reaktywne gazy reszkowe tworzą dielektryczne aglomeraty na bazie tlenków/azotków) były wytłumiane dzięki impulsowemu charakterowi zasilania. Przeprowadzone badania rozkładu grubości nanoszonych warstw metodą pomiaru rezystancji powierzchniowej wykazały, że rozrzut grubości otrzymanych warstw nie przekracza $\pm 5\%$.

Do innowacyjnych cech urządzenia zaliczyć można:

- **modułową budowę linii umożliwiającą elastyczność konfigurowania układów z wieloma wyrzutniami magnetronowymi,**
- możliwość nanoszenia powłok na podłoża o zróżnicowanych cechach geometrycznych charakterystycznych dla produkcji jednostkowej,
- osiągnięcie dużej jednorodności nanoszonych powłok poprzez opracowanie oryginalnego układu doprowadzającego gaz technologiczny,

- wdrożenie systemu impulsowego wstrzykiwania gazu plazmotwórczego GIMS,
- zastosowanie kontroli przebiegu procesu plazmowego poprzez zastosowanie, jako parametru technologicznego wartości tzw. mocy krążącej do zasilania dział plazmowych, która stanowiła oryginalny składnik metodyczny unikalnej konstrukcji zasilaczy,
- opracowanie algorytmu sterowania pracą układu dla powłok wielowarstwowych.

Mój wkład własny w budowę i wdrożenie linii technologicznej polegał na:

- opracowaniu koncepcji urządzenia (w konsultacji z prof. B. Leją),
- opracowaniu projektu i konstrukcji całego urządzenia technologicznego, wykonaniu dokumentacji konstrukcyjnej,
- współudziale w obliczeniach wytrzymałościowych i doborze zespołów i komponentów urządzenia,
- współudziale w opracowaniu algorytmu sterowania,
- prowadzeniu projektu i nadzorem konstruktorskim,
- współudziale w prowadzeniu prób technologicznych i badań eksploatacyjnych,
- współudziale z prof. Zdunkiem i jego zespołem z Politechniki Warszawskiej pierwszego przemysłowego wdrożenia metody impulsowego zasilania gazowego - GIMS, za co zostałem nagrodzony zespołową Nagrodą Politechniki Warszawskiej. W ramach tego zadania opracowałem oryginalny system rozprowadzenia gazów technologicznych zapewniający uzyskanie dużej jednorodności uzyskiwanych powłok i układ zaworów impulsowych, prowadziłem badania technologiczne i powłok nanoszonych na urządzeniu, współuczestniczyłem w przystosowaniu układu sterowania do zastosowania metody GIMS.

4.3.2 Urządzenie modułowe do magnetronowego napyłania narzędzi

Kolejnym osiągnięciem w obszarze magnetronowego nanoszenia cienkich powłok było opracowanie projektowe, konstrukcyjne i wdrożeniowe modułowego urządzenia do magnetronowego impulsowego napyłania narzędzi skrawających, form oraz tłoczników i wykrojników. Modyfikowanie warstwy wierzchniej narzędzi jest zabiegiem stosowanym na skalę przemysłową od kilkudziesięciu lat. Geneza ideowa tego zabiegu jest oczywista i wynika z dążenia do zwiększenia trwałości eksploatacyjnej narzędzi poprzez ulepszenie stanu ich powierzchni przyczyniającego się do kontrolowanego zwiększenia twardości powierzchni, kontrolowanego ustalenia stanu naprężeń powierzchniowych, obniżenia współczynnika tarcia, zwiększenia przewodności cieplnej, zwiększenia odporności na korozję w środowisku pracy itp. Istotny postęp w tym zakresie nastąpił w latach dziewięćdziesiątych ubiegłego wieku wraz z coraz lepszym opanowaniem w skali przemysłowej niektórych technik plazmowej inżynierii powierzchni. Zastosowane plazmy oraz aktywacji elektrycznej w inżynierii powierzchni zamiast typowo stosowanych: środowiska gazowego i aktywacji termicznej (intensywnie badania podstawowe prowadzone w latach osiemdziesiątych) wprowadziło

nowe mechanizmy oddziaływań na przebieg zjawisk elementarnych prowadzących do modyfikacji powierzchni. Najistotniejszymi skutkami tych modyfikacji były nowe możliwości: poszerzenia spektrum materiałów powłok oraz zmniejszenia temperatury podłoża, na których wytwarzane były warstwy. Obie możliwości otworzyły nieznane dotychczas perspektywy postępu naukowo-technicznego, wręcz wykreowały ten postęp. Szczególną zaletą zjonizowania środowiska gazowego poprzez celowo zadane pole elektryczne stało się wykorzystanie plazmy, jako specyficznego środowiska syntezy materiałów odznaczających się wysokimi barierami zarodkowania (np. powłoki węglowe o strukturze diamentu).

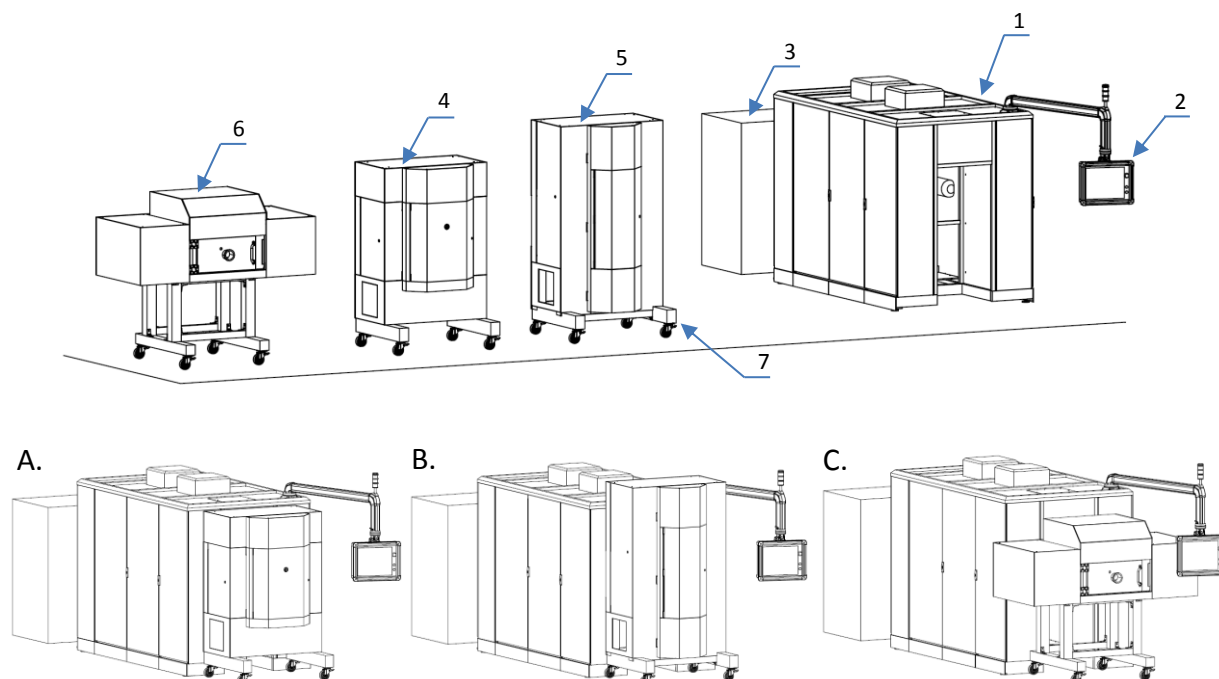
Opisaną technologię magnetronowego nanoszenia powłok zastosowano w zaprojektowanym i wdrożonym przemysłowo innowacyjnym modułowym urządzeniu do napylania narzędzi (rys. 9). Urządzenie składa się z modułu zintegrowanych zasilaczy (1): elektrycznych do wyrzutni magnetronowych, zasilacza gazów technologicznych, pompy próżniowej, zasilacza czyszczenia jarzeniowego, zasilacza prądu podkładu, grzałek oraz sterownika. Moduł ten wyposażony jest w pulpit sterowniczy (2) i połączony jest z chłodnicą (3). Do modułu zasilaczy podłączyć można różne komory próżniowe wyposażone w zunifikowany układ przyłączy. Moduły komór próżniowych (4, 5, 6) stanowią wymienne podzespoły urządzenia (1), dostosowane do określonego zakresu wymiarów napylanego elementu i/lub technologii napylania.

Wymienione moduły zawierają (rys. 9):

- komorę z uchwytami na narzędzia trzpieniowe zamocowane na obrotnicy (A) (rys. 10),
- komorę do narzędzi długich, takich jak przeciągacze oraz narzędzia skrawające o znacznej długości do 1,5m (B),
- komorę do napylania narzędzi do przetwórstwa tworzyw sztucznych w postaci prostopadłościanu oraz narzędzi do obróbki plastycznej (C).

Integralną częścią każdej komory próżniowej są czujniki do pomiaru temperatury, które zabudowane są na ścianach i drzwiach komory oraz na obrotowym stoliku dla narzędzi. Moduły w zależności od potrzeb produkcyjnych przemieszczane są na platformach (7) zaopatrzonych w koła jezdne.

Wymienione komory wyposażone są w zunifikowane zespoły podłączeniowe do układów zasilania próżnią, doprowadzenia gazów technologicznych, zasilania wyrzutni magnetronowych, chłodzenia wodą, co pozwala na zastosowanie różnych komór przy tych samych pozostałych modułach obrabiarki. Przyjęte rozwiązania przyczyniły się do dużej elastyczności urządzenia. Zamocowanie prostokątnych lub kołowych wyrzutni magnetronowych w drzwiach komory procesowej umożliwiło łatwy i wygodny dostęp dla wymiany targetów. Podczas realizacji procesu napylania w próżni ciepło transportowane jest od grzałek zamocowanych na wewnętrznej stronie komory za pomocą promieniowania podczerwonego IR, nagrzewając narzędzia do temperatury <550 °C. Do chłodzenia ścian komory zastosowano wężownicę wodną na zewnętrznej stronie ścian komory. Wężownica oraz wyrzutnie magnetronowe podłączane są do modułu zasilania wodą chłodzącą.

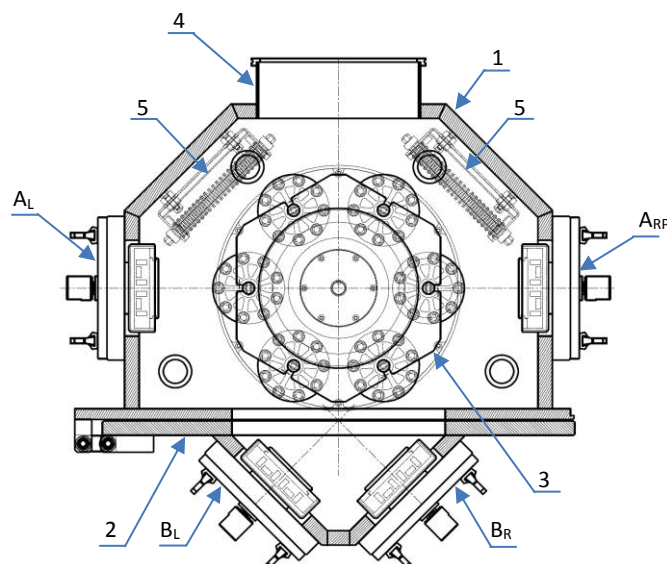


Rys. 9. Widok modułowego urządzenia do nanoszenia powłok metodą rozpylania magnetronowego na narzędzi [II.C.3.3]

Z modułem zasilania elektrycznego połączone są wyrzutnie magnetronowe oraz grzałki elektryczne. Zastosowano indywidualne zasilanie elektryczne obu wyrzutni za pomocą dwóch zasilaczy impulsowych w celu umożliwienia oddzielnego sterowania wyrzutniami przy napyłaniu powłok wielowarstwowych i gradientowych. Do komory procesowej w obszarze wyrzutni magnetronowych doprowadzone są gazy technologiczne za pomocą zaworu do impulsowego wstrzykiwania gazu.

W urządzeniu zastosowano technologię rozpylania magnetronowego metodą PAPVD (Plasma Activated Physical Vapour Deposition) z wykorzystaniem rezonansowych zasilaczy impulsowych Dora Power System. Umożliwia to wytwarzanie złożonych warstw gradientowych typu (Ti, Al)N, Ti(C,N), (Ti,Al, Si)N i (Al,Ti,Si)N o grubości 2-5 μm na podłożach konwencjonalnych, węglików spiekanych, spiekanych stali narzędziowych, a także cermetali. Narzędzia z gradientowo ukształtowaną warstwą powierzchniową charakteryzują się dużą odpornością na zużycie ścierne połączoną z relatywnie wysoką ciągliwością rdzenia materiału, co umożliwia stosowanie wysokich prędkości skrawania i zwiększenie trwałości części roboczej narzędzi.

Utworzone w ten sposób powłoki charakteryzują się płynną zmianą składu chemicznego w kierunku od podłoża do powierzchni powłoki, natomiast warstwy wierzchnie narzędzi odznaczają się ulepszonymi (wyższymi) właściwościami mechanicznymi, większą odpornością termiczną i chemiczną oraz niższym współczynnikiem tarcia, ponadto wykazują dużą przyczepność do podłoża.



Rys. 10. Budowa komory do narzędzi trzpieniowych: 1 – komora próżniowa, 2 – drzwi załadownicze, 3 – obrotnica, 4 – przyłącze pomp i czujników próżni, 5 – grzałki, A_L A_R – para wyrzutni magnetronowych w układzie gemini, B_L B_R – para wyrzutni magnetronowych w układzie konfokalnym dla nanoszenia warstw gradientowych

Nakładanie powłok innowacyjną technologią rozpylania magnetronowego przy wykorzystaniu zasilaczy impulsowych, w których tzw. moc krążąca umożliwia uzyskiwanie powłok odznaczających się wysoką gęstością. Możliwość sterowania mocą krążącą pozwala na ograniczenie, typowej dla procesu magnetronowego, tendencji do powstawania struktury kolumnowej. Struktura kolumnowa materiału powłoki uwarunkowana jest zjawiskami fizyko-chemicznymi na powierzchni rozdziału warstwa/podłoże i powstaje w standardowo realizowanym procesie rozpylania magnetronowego. W zastosowaniach antyściernych/przeciwzużyciowych może ona powodować obniżenie właściwości użytkowych powłoki. W technologii z zastosowaniem zasilaczy impulsowych dozowanie plazmy odbywa się w postaci tzw. „paczek”, co przyczynia się do zmniejszenia tendencji do tworzenia się struktury kolumnowej poprzez wytwarzanie dodatkowych centrów zarodkowania. Dodatkowo technologia ta umożliwia, dzięki wykorzystaniu energii elektrycznej do przyspieszenia cząstek w polu magnetycznym magnetronu, obniżenie poziomu aktywacji termicznej powierzchni podłoża, co pozwala na obniżenie temperatury, do której należy podgrzać materiał/target, z 500-550°C w przypadku technologii standardowej do 200°C z zastosowaniem zasilaczy impulsowych. Wytworzona w innowacyjnej technologii powłoka charakteryzuje się większą gęstością niż w technologii standardowej, jej struktura pozbawiona jest niekorzystnych ziaren kolumnowych, a ponadto odznacza się większą przyczepnością do powierzchni materiału podłoża. Również koszt wytworzenia powłoki jest niższy w porównaniu do technologii standardowej.

Do oryginalnych cech urządzenia zaliczyć można:

- **zastosowanie wymiennych komór próżniowych podłączanych do modułu zasilania,**
- zastosowanie unikalnego sposobu prowadzenia procesu rozpylania magnetronowego z wykorzystaniem techniki impulsowego wstrzykiwania gazu plazmotwórczego GIMS,
- zastosowanie kontroli przebiegu procesu plazmowego poprzez zastosowanie, jako parametru technologicznego wartości tzw. mocy krążącej do zasilania dział plazmowych, która stanowiła oryginalny składnik metodyczny unikalnej konstrukcji zasilaczy Dora Power System,
- zastosowanie unikalnego sposobu sterowania pracą układu wielomagnetronowego pozwalającego na wytwarzanie powłok wielowarstwowych i gradientowych.



Rys. 11. Moduł zasilania komórek próżniowych i podłączona komora próżniowa V-800



Rys. 12. Widok komory do napylania narzędzi trzpieniowych V-800

Mój wkład własny w budowę i wdrożenie linii technologicznej polegał na (*załącznik 8.2*):

- **opracowaniu koncepcji urządzenia modułowego (współautorstwo zgłoszenia patentowego),**
- **opracowaniu projektu i konstrukcji całego urządzenia technologicznego, wykonaniu dokumentacji konstrukcyjnej,**
- współudziale w obliczeniach wytrzymałościowych,
- doborze zespołów i komponentów urządzenia,
- współudziale w opracowaniu algorytmu sterowania,
- prowadzeniu projektu i nadzorem konstruktorskim,
- prowadzeniu prób technologicznych i badań eksploatacyjnych.

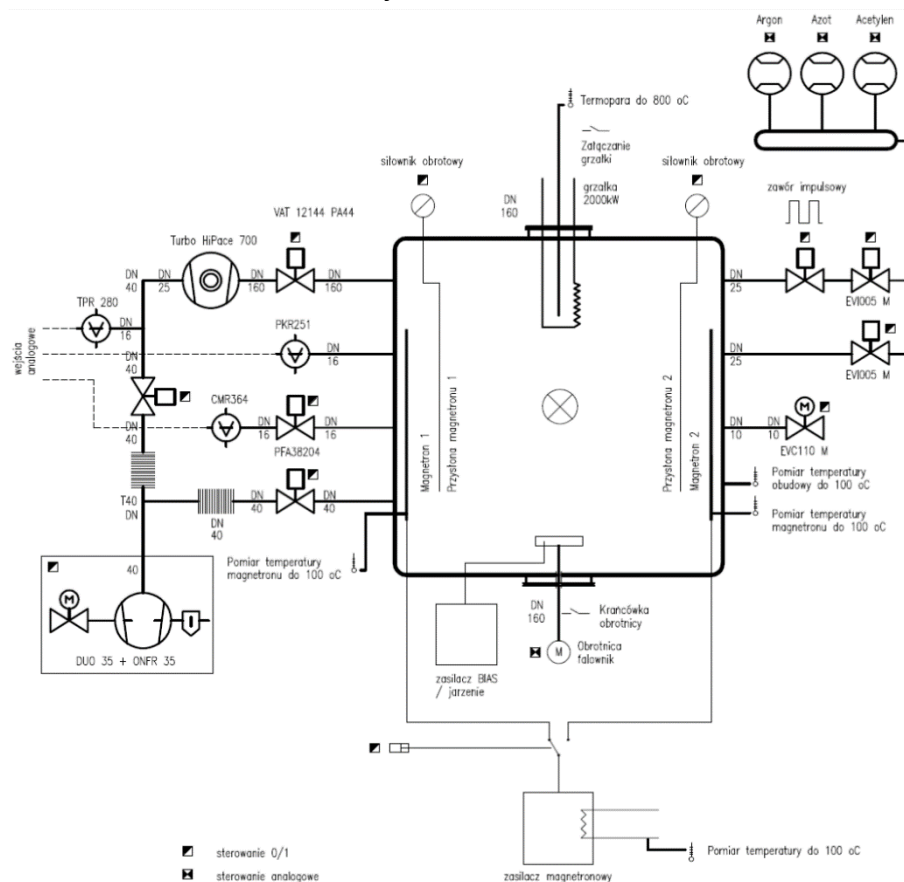
4.3.3 Napylarka laboratoryjna

Napylarka laboratoryjna jest kolejnym osiągnięciem projektowym, badawczym i wdrożeniowym technologii plazmowej inżynierii powierzchni, w której zastosowano zarówno elektryczne jak i gazowe impulsowe oddziaływanie na proces plazmowy w technice magnetronowej. Potrzeba opracowania napylarki laboratoryjnej wynikała z rozwijania zarówno technologii zasilania impulsowego elektrycznego oraz gazowego zaaplikowanego we wcześniejszych urządzeniach jak i na połączeniu obu technologii w jednym urządzeniu. Zastąpienie, dotychczas stosowanego, ciągłego dozowania gazu, w technice standardowej, impulsowym wstrzykiwaniem gazu roboczego (pierwsze wdrożenie przemysłowe miało miejsce w opisaney w punkcie 4.3.2. linii technologicznej przy udziale zespołu prof. Zdunka z Politechniki Warszawskiej) spowodowało zwiększenie energii kinetycznej cząstek plazmy i stopnia nierównowagowości plazmy a także zmniejszenie tendencji do wzrostu kolumnowego materiału i stopnia zdefektowania struktury wytworzonej powłoki metodą GIMS (Gas Injection Magnetron Sputtering). Dozowanie impulsowe gazu powoduje impulsowe wyładowania jarzeniowe w strefie międzyelektrodowej magnetronu oraz impulsową generację par/plazmy, z których syntetyzowana jest powłoka. W przerwach pomiędzy kolejnymi, następującymi po sobie porcjami wstrzykniętego gazu układ pompowy usuwa wstrzyknięty gaz oraz pozostałe pary materiału/targetu do ciśnienia uniemożliwiającego dalsze wyładowania. Każda nowa porcja impulsowo wstrzykniętego gazu inicjuje ponownie proces plazmowy. Na urządzeniu laboratoryjnym opracowano rozwinięcie metody GIMS poprzez skorelowanie impulsów gazowych z impulsem elektrycznym. Umożliwia to skrócenie czasu wygasania plazmy, które następuje przy braku dopływu prądu. W wcześniejszym rozwiązaniu plazma wygasła jeszcze przez pewien czas po odcięciu dopływu gazu. Rozwiązanie to znalazło zastosowanie w autonomicznych urządzeniach, kontrolerach dozowania gazów GIMS, wdrożonych na Wydziale Inżynierii Materiałowej Politechniki Warszawskiej i w Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku.

Uzasadnieniem dla podjęcia prac projektowych i badawczych z zastosowaniem nowatorskiej technologii było:

- dążenie do zwiększenia energii kinetycznej cząstek plazmy poprzez ograniczenie dyssypacji energii na zderzenia międzycząstkowe w plazmie,
- zwiększenie stopnia nierównowagowości plazmy (czas trwania stanu wzbudzonego jest relatywnie bliski czasowi generacji i zaniku plazmy podczas każdego kolejnego aktu wstrzyknięcia gazu roboczego),
- możliwość minimalizacji tendencji do wzrostu kolumnowego materiału tworzącej się powłoki.

Laboratoryjna napylarka magnetronowa została opracowana a następnie wdrożona w 2015 r. (załącznik 8) i służy do wytwarzania powłok na podłożach testowych dla różnych wariantów syntezy powłok. Przeprowadzone badania potwierdziły skuteczność w zakresie poprawy adhezji powłok nowego rozwiązania konstrukcyjnego i w rozwijanej technologii GIMS. Fotografie urządzenia przedstawiono na rys. 13-15. Urządzenie wykorzystuje się przy badaniach prototypów zasilaczy firmy Trumpf Hüttinger [II.L.1.12]: DC, bipolarnych w układzie gemini wyrzutni magnetronowych oraz zasilaczy HIPIMS. Urządzenie umożliwia zastosowanie wyrzutni magnetronowych kołowych, prostokątnych oraz rurowych. Te ostatnie posłużyły do prowadzenia badań nanoszenia powłok na wewnętrzne powierzchnie rur, w wyniku których, wspólnie z Instytutem Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie, opracowano nowe technologie [II.C.3.9] zgłoszone w Urzędzie Patentowym RP, również z możliwością zastosowania w obszarze obronności kraju [II.C.3.7, II.C.3.8].



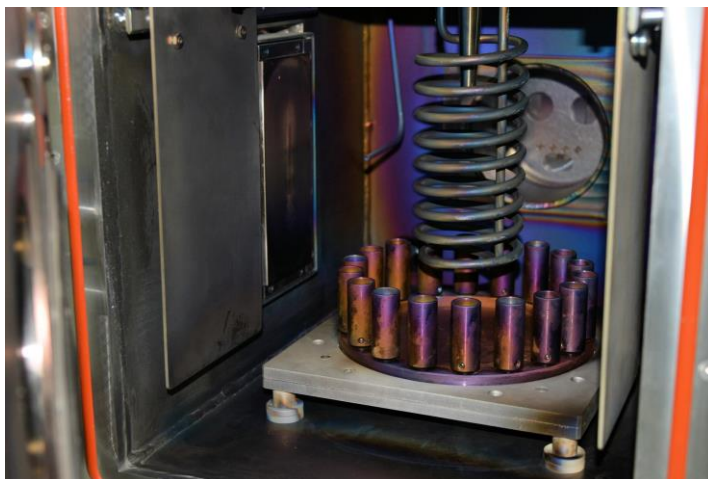
Rys. 13. Schemat układu zasilania laboratoryjnej napylarki magnetronowej (opracowanie autora)



(a)

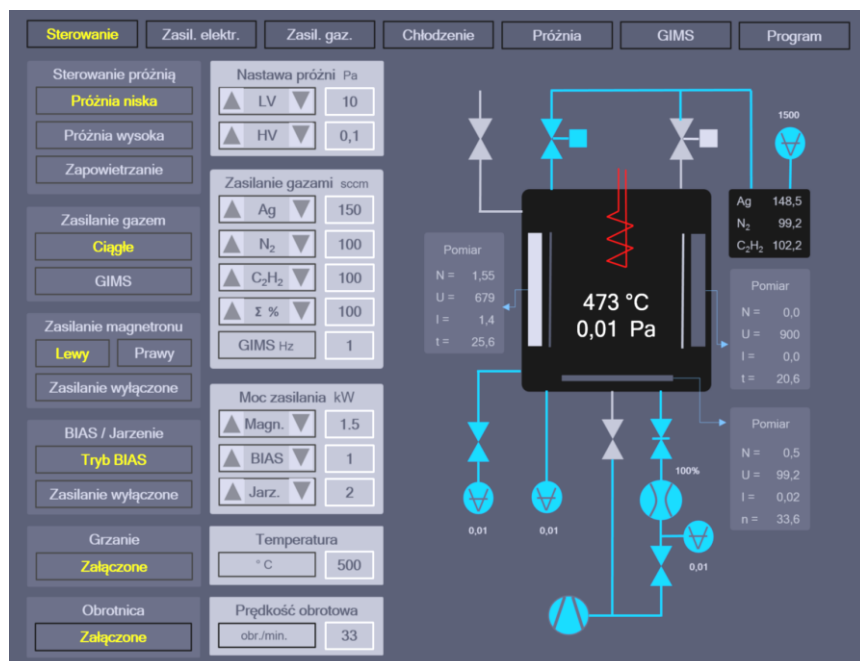


(b)



(c)

Rys. 14. Widok laboratoryjnej napylarki magnetronej (a) moduły (od lewej) chiller, komora robocza, sterowanie, zasilanie, (b) komora próżniowa, c) wnętrze komory



Rys. 15. Panel interfejsu operatora (opracowanie autora)

Zaprojektowane urządzenie technologiczne zostało wykonane i wdrożone do produkcji w firmie Bohamet S.A. w Białych Błotach (załącznik 8.3).

4.4 Aplikacje prac projektowo-konstrukcyjnych

Poza opisanymi osiągnięciami technicznymi wskazuję wybrane publikacje naukowe, stanowiące, w mojej ocenie, liczący się wkład w rozwój dyscypliny naukowej „Budowa i eksploatacja maszyn”. W przedstawionych niżej publikacjach (1-4), zaprezentowane zostały wybrane wyniki badań metod rozpylania magnetronowego, z udziałem urządzeń, wskazanych w punkcie 4.3 autoreferatu, w zastosowaniu do nanoszenia cienkowarstwowych powłok na powierzchnie szklane, materiały konstrukcyjne i tworzywa polimerowe. Kolejne zamieszczone publikacje (5-8) dotyczą badań opracowywanych próżniowych urządzeń technologicznych. Ponadto zamieściłem 2 prace z zakresu technologii elektrochemicznej (9-10), które są przykładem pełnej realizacji projektu naukowego od opracowania nowej metody obróbki, poprzez jej modelowanie, badania doświadczalne oraz zaprojektowanie i zbudowanie prototypu urządzenia technologicznego.

Aktualnie prowadzę badania teoretyczno-eksperymentalne nad technologią i urządzeniem przemysłowym do nanoszenia powłok na materiał sypki. Badania właściwości powłok napylnych w opracowanych przeze mnie urządzeniach, realizowałem wspólnie z naukowcami z Politechniki Wrocławskiej, Politechniki Warszawskiej, Politechniki Łódzkiej, Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy oraz Instytutu Mechaniki Precyzyjnej w Warszawie.

Cykl publikacji składa się z niżej wymienionych pozycji:

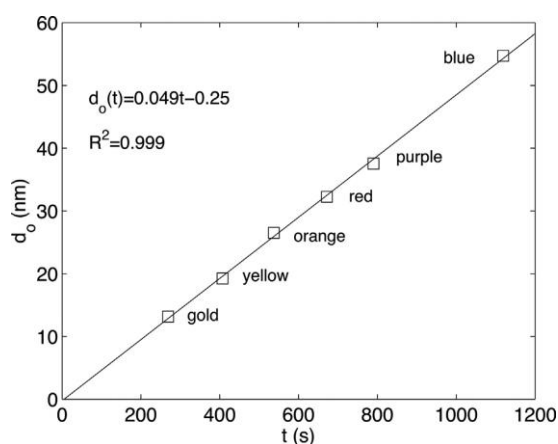
1. Skowroński Ł., Trzciński M., Antończak A., **Domanowski P.**, Kustra M., Wachowiak W., Naparty M., Hiller T., Bukaluk A., Wronkowska A., 2014, Characterization of Coloured TiO_x/Ti/glass systems, **Applied Surface Science**, vol. 322, s. 209-214;
2. Domaradzki J., Kaczmarek D., Mazur M., Wojcieszak D., Halarewicz J., Głodek S., **Domanowski P.**, 2016, Investigations of optical and surface properties of Ag single thin film coating as semitransparent heat reflective mirror, **Materials Science-Poland**, vol. 34, nr 4, s. 747-753;
3. Mazur M., Sieradzka K., Kaczmarek D., Domaradzki J., Wojcieszak D., **Domanowski P.**, 2013, Investigation of physicochemical and tribological properties of transparent oxide semiconducting thin films based on Ti-V oxides. **Materials Science-Poland**, vol. 31, nr 3, s. 434-445;
4. Zdunek K., Skowroński Ł., Chodun R., Nowakowska-Langier K., Grabowski A., Wachowiak W., Okrasa S., Wachowiak A., Strauss O., Wronkowski A., **Domanowski P.**, 2016, Novel GIMS technique for deposition of colored Ti/TiO₂ coatings on industrial scale, **Materials Science-Poland**, vol. 34, nr 1, s. 137-141;

5. Halarewicz J., **Domanowski P.**, Dora J., Wawrzak A., Karwowski K., Pinio P., Wiatrowski A., Posadowski W. M., 2012, Próżniowe otrzymywanie cienkich warstw na wielkogabarytowych, szklanych podłożach: Część 2 - linia przesyłowa, **Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania**, vol. 4, s. 77-82;
6. **Domanowski P.**, Wawrzak A., 2012, Automation of thin film deposition process based on magnetron sputtering. **Journal of Machine Engineering**, vol. 12, nr 2, s. 111-119;
7. **Domanowski P.**, 2012, Automation of plasma machining in a continuous operation line, **Journal of Polish CIMAC**, Selected Problems of Designing and Operating Technical Systems, vol. 7, nr 3, s. 53-58;
8. **Domanowski P.**, Bujnowski S., Marciniak T., Lutowski Z., 2015, Prototype System for Plasma Film Surface Modification, **Solid State Phenomena (Advances in Manufacturing Engineering)**, vol. 223, s. 146-152
9. **Domanowski P.**, Kozak J., 2000, Direct and inverse problems of shaping by electrochemical generating machining, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 107, s. 300-306;
10. **Domanowski P.**, Kozak J., 2001, Inverse problems of shaping by electrochemical generating machining, **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 109, s. 347-353.

Ocena właściwości optycznych, struktury i składu chemicznego kolorowych powłok TiO_2 naniesionych na nieprzezroczystą powłokę Ti metodą GIMS (Gas Injection Magnetron Sputtering) była celem badań opisanych w artykule pt.: „*Characterization of Coloured $\text{TiO}_x/\text{Ti/glass}$ systems*” (Skowroński Ł., Trzciński M., Antończak A., **Domanowski P.**, Kustra M., Wachowiak W., Naparty M., Hiller T., Bukaluk A., Wronkowska A., 2014, Applied Surface Science, vol. 322, ISSN: 0169-4332, 2014, s. 209-214) [I.C.1]. Powłoki te naniesiono na próbki wykonane ze szkła o grubości 5 mm z zastosowaniem zaprojektowanej przeze mnie linii produkcyjnej dla przedsiębiorstwa Bohamet S.A. Rozpylanie targetu Ti odbywało się w atmosferze Ar dla powłoki Ti i Ar/ O_2 w przypadku powłoki TiO_2 . Naniesione powłoki Ti i TiO_2 , poddano analizie z użyciem elipsometrii spektroskopowej, mikroskopii sił atomowych (AFM) i rentgenowskiej spektroskopii fotoelektronów w połączeniu z pomiarami kolorymetrycznymi z zastosowaniem optycznego spektroskopu. Wykonane pomiary AFM powłok Ti i TiO_2 wykazały podobieństwo topografii niebieskiej powierzchni powłoki TiO_2 do powłoki Ti. Chropowatość powierzchni powłok TiO_2 zawierała się w przedziale od 2,24-3,01 nm. W zależności od parametrów technologicznych procesu uzyskano powłoki TiO_2 o różnym kolorze w zależności od grubości powłoki (od 13 nm dla próbki złotej do 55 nm dla próbki niebieskiej) (rys. 16). Stwierdzono silną korelację grubości powłoki TiO_2 z czasem osadzania powłoki ($R^2=0.999$) oraz liniową zależność między tymi wielkościami (rys. 17).



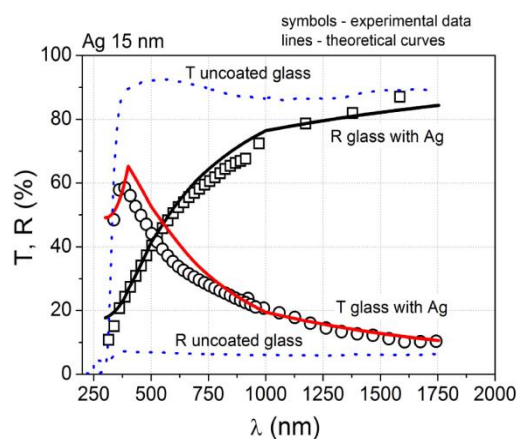
Rys. 16. Zdjęcia szklanych próbek z powłoką TiO₂ naniesionej na powłoce Ti [I.C.1]



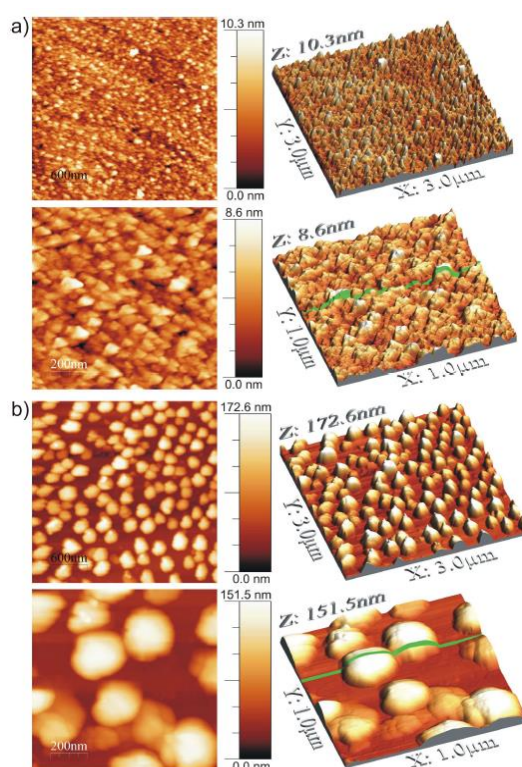
Rys. 17. Grubość powłoki TiO₂ w funkcji czasu osadzenia powłoki [I.C.1]

Przy produkcji szyb ognioodpornych na potrzeby przemysłu okrętowego oraz przeszkleń budowlanych istotne znaczenie mają badania mające na celu zwiększenie czasu odporności ogniowej tych przegród. Przegrody takie w postaci laminatów można ulepszyć poprzez naniesienie powłok pełniących funkcję lustra ciepła. Publikacja pt.: “Investigations of optical and surface properties of Ag single thin film coating as semitransparent heat reflective mirror” (Domaradzki J., Kaczmarek D., Mazur M., Wojcieszak D., Halarewicz J., Głodek S., **Domanowski P.**) Materials Science-Poland, vol. 4, nr 34, 2016, s. 747-753 [I.C.2] zawiera wyniki badań optycznych i morfologii powierzchni półprzezroczystych srebrnych cienkich powłok (15 nm) naniesionych na podłoże szklane w zależności od promieniowania cieplnego. Badaniu poddano transmisję optyczną i odbicie po ekspozycji na promieniowanie cieplne z kwarcowo-halogenowej lampy z zastosowaniem spektroskopii rentgenowskiej i mikroskopii sił atomowych.

Na rys. 18 pokazano różnice między zaprojektowanymi i zmierzonymi widmami transmisji i odbicia naniesionej powłoki. Natomiast na rys. 19 obrazy SEM powierzchni cienkich powłok Ag wykonanych metodą odparowania wiązki elektronów.



Rys. 18. Charakterystyki transmisji i odbicia 15 nm srebrnej powłoki naniesionej na podłoże szklane metodą odparowywania wiązki elektronów. Krzywe teoretyczne zostały opracowane z zastosowaniem oprogramowania Film Star Design [I.C.2]



Rys. 19. Obrazy SEM cienkich powłok Ag wykonanych metodą odparowywania wiązki elektronów: powłoki przed (a) i po wyżarzaniu (b) [I.C.2]

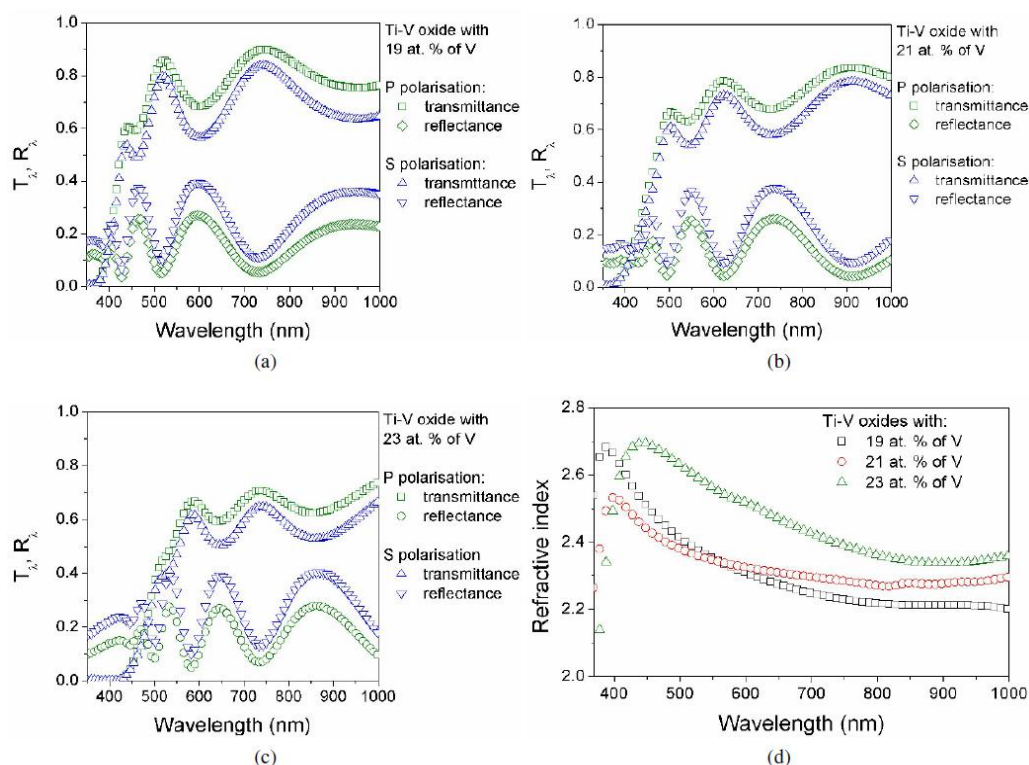
Uzyskane obrazy SEM (rys. 19) wykazały, że powierzchnie naniesionych powłok są gładkie, pozbawione pęknięć i jednorodnie pokryte cienką warstwą Ag. Stwierdzono, że pod wpływem promieniowania ciepłego ich powierzchnie pokryły się nano-cząstkami Ag losowo

rozłożonymi na podłożu szklanym. Badania wykazały, że podgrzewanie powłoki prowadzi do nieodwracalnych zmian w ich optycznych spektrach i utraty właściwości ochronnych.

Badania fizykochemicznych, trybologicznych, elektrycznych, strukturalnych i optycznych właściwości przeźroczystych tlenkowych półprzewodnikowych cienkich powłok na bazie tlenków Ti-V z dodatkiem wanadu w ilości 19, 21, 23 % zawarto w pracy pt.: „*Investigation of physicochemical and tribological properties of transparent oxide semiconducting thin films based on Ti-V oxides*” (Mazur M., Sieradzka K., Kaczmarek D., Domaradzki J., Wojcieszak D., **Domanowski P.**, Materials Science-Poland, vol. 3, nr 31, 2013, s. 434-445) [I.C.3]. Powłoki nakładano na szkło Corning 7059 stosując zmodyfikowaną metodę reaktywnego magnetronowego rozpylania. Dodatkowo przeprowadzono, przy moim znacznym udziale, testy zwilżalności i twardości naniesionych powłok w celu określenia ich przyszłej przydatności i funkcjonalności. Ocenę właściwości przeprowadzono na podstawie optycznej transmisji, widma odbicia, oporności elektrycznej, twardości powłoki i kąta styku. Właściwości te są ważne w wielu zastosowaniach cienkich powłok w tym, jako ochronne i samo-czyszczące powłoki. W artykule przedstawiono zastosowaną metodykę i technikę a także wyniki badań przedstawiające uzyskane zależności dla wymienionych wielkości. Przykładem są wyniki transmisji i widma odbicia cienkich filmów z nanokrystalicznych tlenków Ti-V z dodatkiem wanadu w ilości 19, 21, 23 % oraz charakterystyki współczynnika odbicia tlenków Ti-V, przedstawione na rys 20.

Stwierdzono, że morfologia cienkich powłok tlenków Ti-V zależy od ilości zawartego w nich wanadu i przy zawartości 19 at. % posiadają strukturę amorficzną a przy 21 i 23 at % zachodzi krystalizacja fazy V_2V_5 . Ponadto chropowatość powierzchni zwiększa się ze wzrostem zawartości wanadu natomiast transmisyjność powłoki maleje. Również transmisyjność i zwilżalność cienkich powłok zależą od zawartości wanadu. Powłoki z zawartością 19 at.% mogą być stosowane jako ochronne, hydrofobowe i przezroczyste półprzewodniki typu-p natomiast z zawartością 21 i 23 at. % przezroczyste półprzewodniki typu-n. Przeprowadzone badania mogą znaleźć zastosowanie praktyczne przy wytwarzaniu antyściernych, odpornych na zarysowania szyb okien okrętowych.

W pracy zatytułowanej „*Novel GIMS technique for deposition of colored Ti/TiO₂ coatings on industrial scale*” (Zdunek K., Skowroński Ł., Chodun R., Nowakowska-Langier K., Grabowski A., Wachowiak W., Okrasa S., Wachowiak A., Strauss O., Wronkowski A., **Domanowski P.**, Materials Science-Poland, vol. 34, nr 1, 2016, s. 137-141) [I.C.4], zaprezentowano badania efektywności i przydatności nowej metody nakładania powłok GIMS (Gas Injection Magnetron Sputtering) w zastosowaniu do rozpylania czystego metalicznego Ti, przezroczystej powłoki TiO₂ i kolorowej dwuwarstwowej powłoki Ti/TiO₂ na wielkogabarytowe płyty szklane w warunkach przemysłowych.



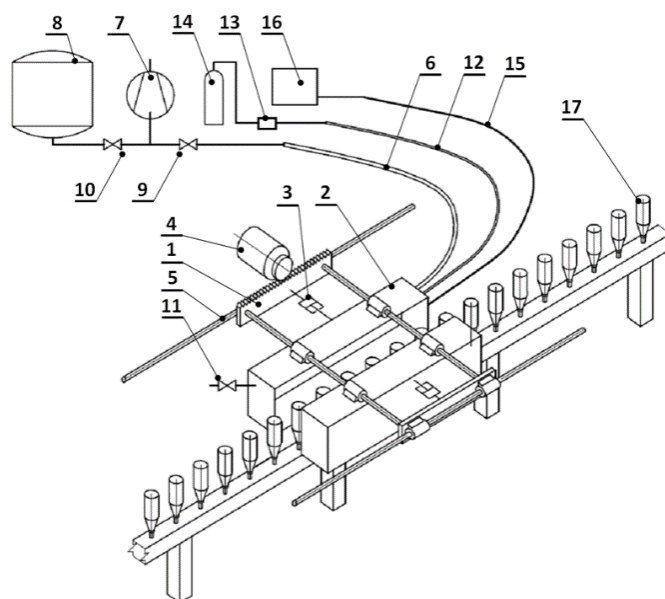
Rys. 20. Widma odbicia i transmisji cienkich filmów tlenków Ti-V z dodatkiem 19 (a), 21 (b) i 23 (c) % V oraz charakterystyka współczynnika odbicia (d) [I.C.3]

W procesie nakładania powłok zastosowano zestaw liniowych magnetronów o długości 2400 mm z pulsacyjnym wtryskiem gazu. Istotnym kryterium oceny metody była optyczna jednolitość powłoki ze względu na różnice grubości powłoki na powierzchni próbki. Powłoki badano z zastosowaniem spektroskopii elipsometrycznej i konfokalnej mikroskopii optycznej. Pomiary naniesionych powłok w atmosferze okresowo wtryskiwanych gazów Ar i Ar+O₂ wykazały, że grubość i optyczna jednorodność 15 nm powłoki naniesionej za pomocą metody GIMS na powierzchnię szklaną o szerokości 2000 x 3000mm² w warunkach produkcyjnych nie przekracza 20 nm. Potwierdziło to pełną przydatność tej metody w zastosowaniu do nanoszenia kolorowych powłok Ti/TiO₂ na duże powierzchnie szklane w warunkach produkcyjnych, między innymi dla potrzeb oszkleń architektonicznych.

Zaprojektowaną i wdrożoną w firmie Bohamet S.A. linię do przemysłowego osadzania cienkich warstw na wielkogabarytowe tafle szklane o wymiarach 2250×3210 mm² i grubościach od 4 do 25 mm przedstawiono artykule pt.: „*Próżniowe otrzymywanie cienkich warstw na wielkogabarytowych, szklanych podłożach: Część 2 - linia przesyłowa*” (Halarewicz J., **Domanowski P.**, Dora J., Wawrzak A., Karwowski K., Pinio P., Wiatrowski A., Posadowski W. M., Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania, vol. 4, 2012, s. 77-82) [I.C.5] oraz w publikacji pt.: „*Automation of thin film deposition process based on magnetron sputtering*” (**Domanowski P.**, Wawrzak A., Journal of Machine Engineering, vol. 12, nr 2, 2012, s. 111-119) [I.C.6]. Przeznaczeniem linii jest nanoszenie cienkich warstw i wielowarstw (optycznych, dekoracyjnych i in.) metodą magnetronowego rozpylania w atmosferze argonu i gazów

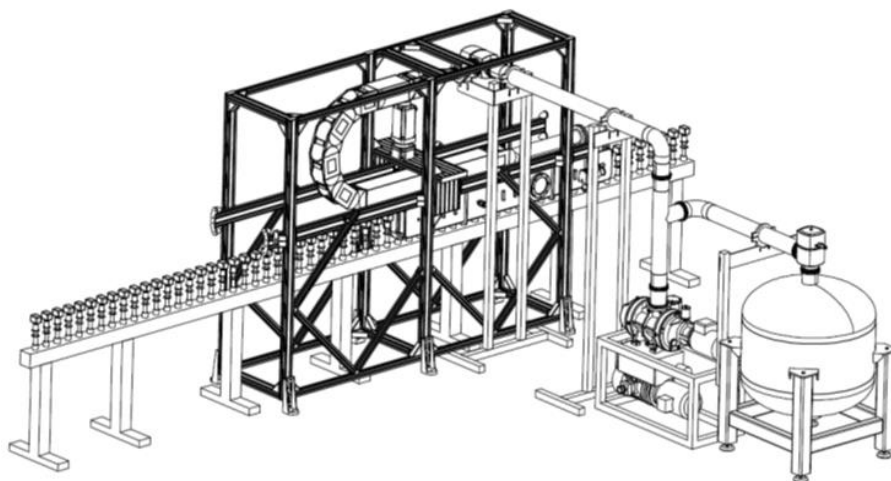
reaktywnych na przeszklenia okien okrętowych. Urządzenie do osadzania cienkich warstw zostało zaprojektowane w wersji *off-line*, przy czym z założeniem możliwości rozbudowy linii w wersji *in-line*. Uwzględnienie wymienionych wymagań determinowało założenia konstrukcyjne związane z projektowaniem komór stanowiska próżniowego, parametrów układów pompowych i magnetronowego systemu rozpylającego. Prace konstrukcyjno-badawcze podzielono na następujące etapy: opracowanie konstrukcji mechanicznej i wykonanie prototypu linii, opracowanie i wykonanie sterowania oraz układów kontroli cyklu pompowania i procesu technologicznego, opracowanie i wykonanie elektrycznego zasilania systemu magnetronowego rozpylania, opracowanie dokumentacji konstrukcyjnej i wykonanie planarnych magnetronów prostokątnych. Szczegółowy opis linii przedstawiłem w punkcie 4.3.1 autoreferatu (wskazane oryginalne opracowanie projektowe).

W publikacji pt.: *“Automation of plasma machining in a continuous operation line”* (Domanowski P., *Journal of Polish CIMAC. Selected Problems of Designing and Operating Technical Systems*, vol. 7, nr 3, 2012, s. 53-58) [I.C.7] przedstawiono niskociśnieniową technologię plazmową zastosowaną, w opracowanej przeze mnie i wdrożonej, zautomatyzowanej linii technologicznej do czyszczenia szklanych butelek przed nałożeniem powłoki dekoracyjnej. Niezadawalające efekty czyszczenia butelek w jednym z przedsiębiorstw, za pomocą koronowego czyszczenia plazmowego z udziałem indywidualnie ustawianych palników gazowych, stwarzały potrzebę opracowania i wdrożenia nowej technologii na zautomatyzowanej linii do dekorowania butelek. Zastosowanie nowatorskiej niskociśnieniowej technologii plazmowej wymagało zaprojektowania i wdrożenia urządzenia z przeznaczeniem do zastosowania na istniejącej linii produkcyjnej. Niskociśnieniowa plazma stosowana jest między innymi do czyszczenia zabrudzonych elementów konstrukcyjnych, aktywacji plazmowej, wytrawiania powierzchni oraz powlekania elementów i nadania materiałom pożądanej tekstury powierzchni. Plazmowej modyfikacji mogą być poddane różne materiały. Między innymi materiały organiczne, w celu nadania ich powierzchniom właściwości hydrofobowych lub hydrofilowych, a także zwiększenia odporności na obciążenia mechaniczne, łącznie z nadaniem określonych cech strukturalnych i dobrej przyczepności. Praktyczna weryfikacja niskociśnieniowej technologii plazmowej wymagała opracowania i zbudowania specjalnego stanowiska badawczego składającego się z układu mechanicznego oraz ruchomej komory próżniowej, która w sekwencyjny sposób zamykała partię czyszczonych elementów, a następnie po obróbce plazmowej wracała do położenia początkowego w celu pobrania kolejnej partii elementów poddawanych czyszczeniu (rys. 21).



Rys. 21. Schemat linii do czyszczenia plazmowego opakowań o ruchu ciągłym [I.C.7]

Stanowisko do czyszczenia opakowań składa się ze stojaka z prowadnicami, na których usytuowany jest suport (1) z komorą próżniową (2). Suport (1), napędzany serwośilnikiem (4), przemieszcza się wraz z komorą próżniową wzdłuż prowadnic stojaka (5). Na wrzecionach zamontowanych na linii przenośnikowej, ze stałą podziałką 100 mm, zamocowane są czyszczone elementy (butelki). Komora próżniowa podzielona została na dwie części, które zamykane są za pomocą siłowników pneumatycznych (3). Na czole dwóch części komory znajduje się uszczelka silikonowa, w której wycięte zostały otwory dla wrzecion mocujących czyszczone przedmioty. Ze względu na trwałość uszczelki silikonowej podczas zamykania komory, wrzeciona centrowane są przy pomocy pryzm zamocowanych elastycznie do obu części komór. Wymiary komory próżniowej wynoszą 1900 x 160 x 160 mm. Linia przenośnikowa porusza się ze stałą prędkością 4 m/min. Próżnia wytwarzana jest przez zespół pompowy składający się z obrotowej pompy wstępnej SV200 oraz pompy Root'a WA501 firmy Pfeifer Vacuum. Pompy umożliwiają osiągnięcie próżni na poziomie 10^{-3} mbar. Ze względu na potrzebę szybkiego odpompowania komór zastosowano dodatkowo zbiornik balastowy 8 o pojemności 0,5 m³. Układ pompowy podłączony został do komory próżniowej za pomocą elastycznego węża (12). Do komory próżniowej przewidziano również doprowadzanie gazu technologicznego w postaci czystego argonu lub mieszaniny argonu i tlenu w stosunku 9:1. Sterowanie układu pompowego za pomocą zaworów próżniowych (9), (10) i (11) oraz mechanicznego układu napędowego realizuje sterownik PLC. Do zasilania układu wytwarzania plazmy zastosowano zasilacz Dora Power System 16. Postać konstrukcyjną obrabiarki wraz z systemem pompowym pokazano na rys. 22. Stanowisko to chronione jest patentem PL 228354 B1 [II.C.2.2].



Rys. 22. Postać stanowiska do modyfikacji plazmowej powierzchni na linii o ruchu ciągłym [I.C.7]

Ocena przydatności zastosowanej technologii i rozwiązania konstrukcyjnego wykazała możliwość aplikacji urządzenia na liniach produkcyjnych w przemyśle opakowań szklanych i z tworzyw termoplastycznych, przemyśle spożywczym oraz farmaceutycznym.

Urządzenie technologiczne do czyszczenia jarzeniowego elementów na linii o ruchu ciągłym, wdrożono w firmie Dekorglass S.A. w Działdowie w 2013 roku (załącznik 8.4).

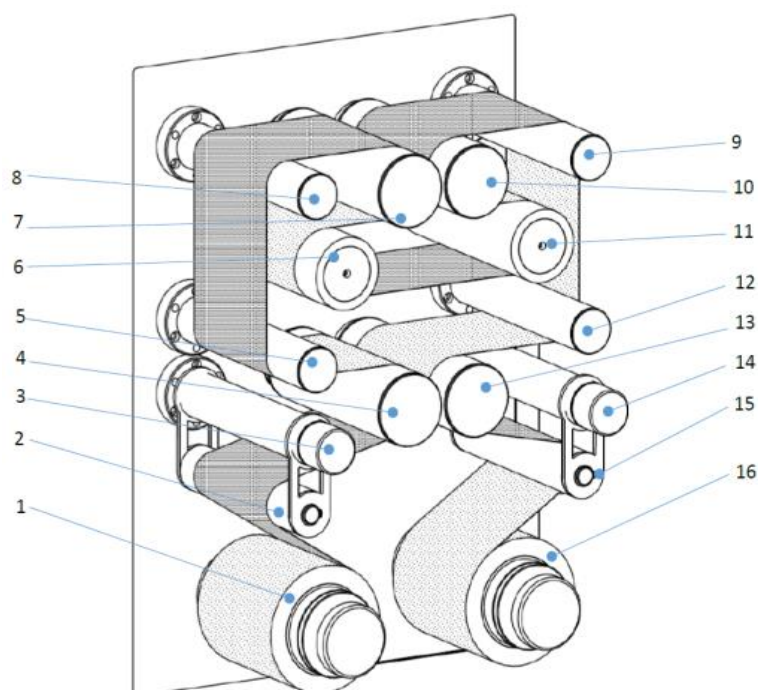
W publikacji pt.: *“Prototype System for Plasma Film Surface Modification. Solid State Phenomena”* (Domanowski P., Bujnowski S., Marciniak T., Lutowski Z.), **Advances in Manufacturing Engineering**, vol. 223, 2015, s. 146-152) [I.C.8] zaprezentowano prototypowe urządzenie mojego autorstwa do modyfikacji powierzchni folii, w celu zmiany jej właściwości, z zastosowaniem technologii polimeryzacji plazmowej. Urządzenie wyposażono w reaktor plazmowy z elektrodami barierowymi umieszczonymi wewnątrz komory próżniowej (rys. 23), którego schemat przedstawiono na rys. 24.

Poddana modyfikacji folia odwijana jest z rolki 1 i po zmianie kierunku na rolce 2 opasuje elektrodę barierową 3. W dalszym biegu folia kierowana jest do elektrody 7 i rolek napędowych 6 i 11. Następnie folia kierowana jest do elektrod 10 i 13. Układ elektrod barierowych zapewnia oddziaływanie plazmy na obie strony przewijanej folii. Elektrody barierowe zamocowano w tulejach mimośrodowych umożliwiających precyzyjne ustalenie odległości pomiędzy elektrodami. Folia po modyfikacji plazmowej nawijana jest na szpulę znajdującą się na bębnie 16. Przedstawiony układ przewijania folii umożliwia pracę w obu kierunkach. Ponadto możliwa jest szybka weryfikacja i selekcja parametrów technologicznych w celu zapewnienia pożądanych warunków procesu modyfikacji właściwości folii.

Urządzenie do plazmowej polimeryzacji warstw hydrofilowych na membranach poliolefinowych, wdrożono w firmie Zamel w Pszczynie (załącznik 8.5) a następnie w Centralnym Laboratorium Akumulatorów i Ogniw w Poznaniu, w 2014 roku.



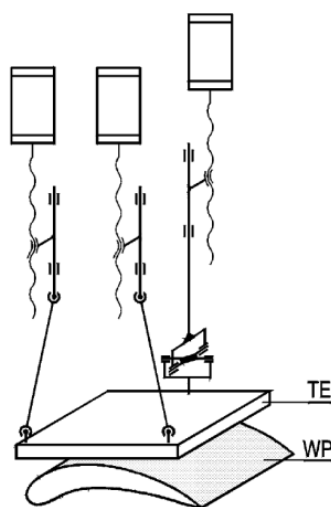
Rys. 23. Urządzenie do polimeryzacji warstw hydrofilowych na membranach poliolefinowych [I.C.8]



Rys. 24. Układ do plazmowej modyfikacji folii elektrodami z wyładowaniami barierowymi:
 1, 16 – bęben z folią; 3, 14 – dźwignia napinająca; 4, 6, 10, 13 - elektrody barierowe; 2, 5, 8,
 9, 12, 15 - rolki przewijające służące do zmiany kierunku przewijanej folii;
 6, 11- rolki napędowe [I.C.8]

Jako współautor uczestniczyłem w badaniach i opracowaniu innych publikacji związanych z badaniami procesu nanoszenia cienkich powłok metodą rozpylania magnetronowego [II.A.1-2, II.B.3.1-2, II.E.8, II.E.12-14, II.F.10]. Wyniki badań właściwości napyłanych powłok w zależności od rodzaju materiału targetu i podłoża publikowałem na konferencjach naukowych [II.L2.8-14, II.L2.16-22].

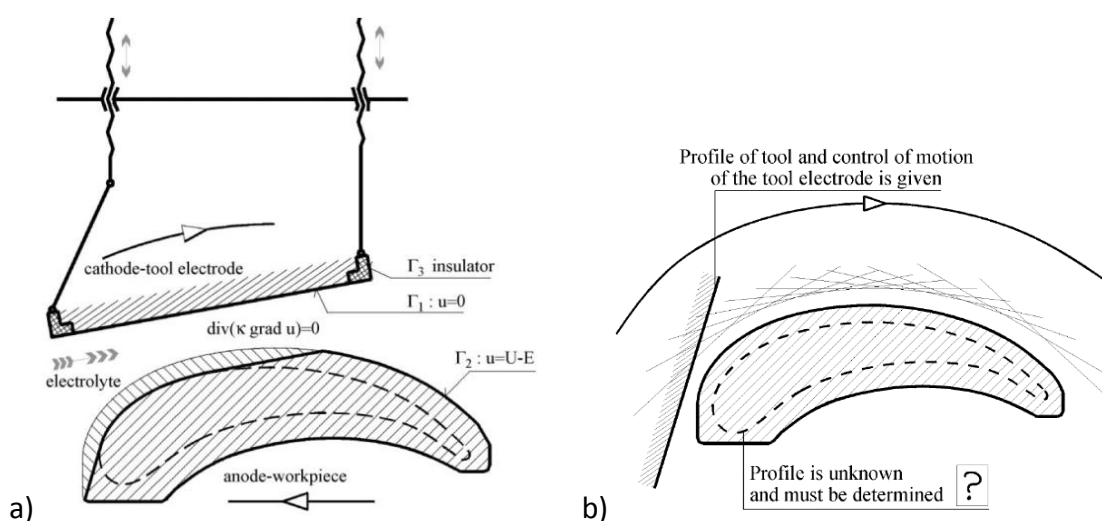
Osiągnięcia z zakresu projektowania urządzeń technologicznych oraz prowadzenia badań eksperymentalnych dotyczących obróbki elektrochemicznej przedstawiłem w pracach opublikowanych w czasopiśmie *Journal of Materials Processing Technology*. Prace te spotkały się dużym zainteresowaniem środowiska naukowego, o czym świadczyć może znaczna liczba cytowań (razem 54 cytowania wg WoS). Z pośród tych publikacji na wyróżnienie zasługuje publikacja zatytułowana „*Direct and inverse problems of shaping by electrochemical generating machining*” (Domanowski P., Kozak J., *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 107, 2000, s. 300-306) [I.C.9], w której przedstawiłem, wraz ze współautorem, matematyczny model będący podstawą do opracowania komputerowego programu do symulacji quasi-obwiedniowego procesu kształtowania elektrochemicznego powierzchni (ECM-CNC) z zastosowaniem uniwersalnej elektrody na obrabiarce sterowanej numerycznie (rys. 25).



Rys. 25. Schemat uniwersalnej elektrody

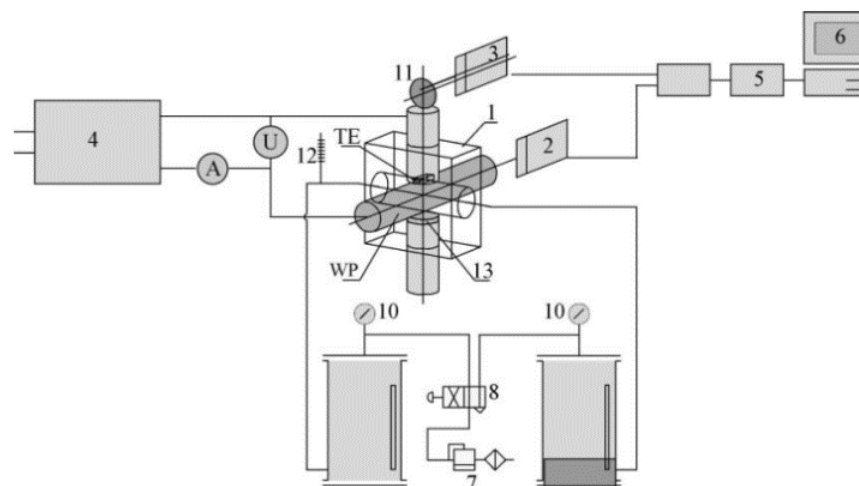
Ważnym zadaniem w komputerowej symulacji procesu było określenie ewolucji obrabianej powierzchni w czasie dochodzenia do jej finalnego kształtu w określonych warunkach obróbki. Wymagało to uwzględnienia początkowego kształtu elektrody łącznie z równaniami parametrycznymi opisującymi jej trajektorię i kinematykę ruchu, właściwości elektrolitu i warunków przepływu a także właściwości materiału obrabianego i parametrów elektrycznych procesu. Opracowane oprogramowanie okazało się bardzo użytecznym narzędziem wspomagającym proces optymalizacji i programowania ruchu narzędzia-katody względem obrabianej powierzchni.

Rozwinięciem tej metody było opracowanie nowatorskiej metody kształtowania elektrochemicznego złożonych powierzchni zewnętrznych i wewnętrznych elektrodą uniwersalną (płaską lub walcową), pod nazwą electrochemical generating machining (ECGM). Główną zaletą tej metody, w porównaniu do klasycznej obróbki elektrochemicznej, było wyeliminowanie konieczności wykonania kosztownej elektrody o złożonym zarysie odpowiadającym zarysowi obrobionej powierzchni. Ponadto, obrobiona powierzchnia charakteryzowała się większą dokładnością kształtu i jakością powierzchni a także zmniejszone zostało oddziaływanie generowanego w trakcie trwania procesu ciepła i gazów na właściwości elektrolitu w szczelinie międzyelektrodowej. Zastosowanie praktyczne metody ECGM do kształtowania złożonych powierzchni elektrodą uniwersalną wymagało rozwiązania problemu odwrotnego kształtowania, polegającego na określeniu trajektorii ruchów elektrody względem obrabianego przedmiotu w celu uzyskania powierzchni obrobionej o wymaganym kształcie. Problem jest podobny do klasycznej obróbki ECM, w której ważnym zadaniem jest określenie kształtu elektrody dla określonego kształtu obrobionej powierzchni. Określenie trajektorii ruchu elektrody wymagało opracowania i rozwiązania równań dla obwiedniowego ruchu płaskiej powierzchni elektrody z uwzględnieniem wymaganych parametrów jakościowych zarysu obrobionej powierzchni (rys 26).



Rys. 26. Schemat generowania obrobionej powierzchni (a)
i symulacji procesu ECGM (b) [II.C.9]

Badania eksperymentalne procesu ECGM przeprowadzone na opracowanym w tym celu stanowisku badawczym (rys. 27) potwierdziły przydatność metody ECGM do kształtowania złożonych powierzchni o zróżnicowanych cechach geometrycznych z zastosowaniem uniwersalnej elektrody z płaską powierzchnią roboczą. Iteracyjne podejście do rozwiązania problemu odwrotnego kształtowania powierzchni umożliwiło określenie parametrów ruchu elektrody zapewniających uzyskanie wymaganego kształtu obrobionej powierzchni.

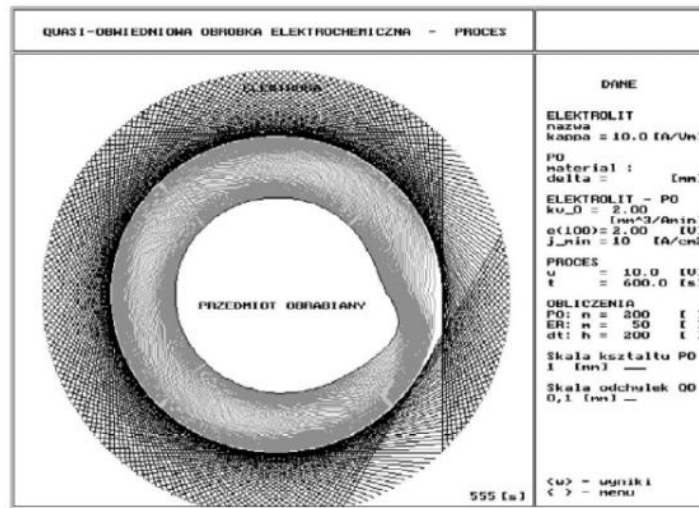


Rys. 27. Schemat stanowiska badawczego [I.C.9]

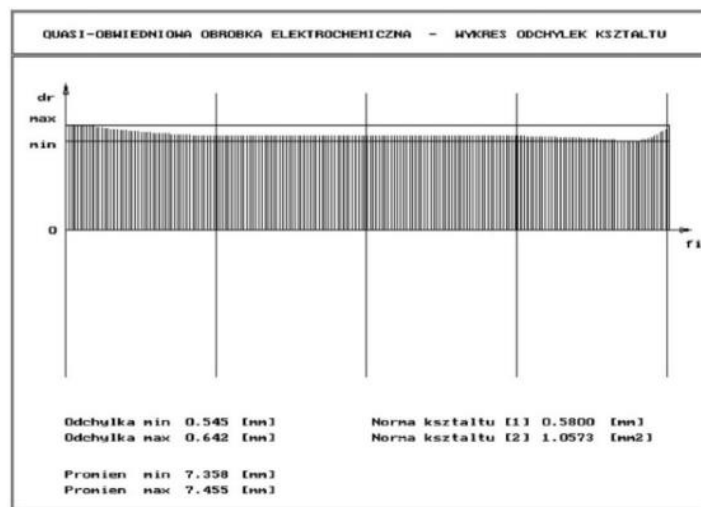
Rozwinięcie modelu matematycznego problemu odwrotnego kształtowania metodą ECGM oraz wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych i weryfikacyjnych przedstawiono w publikacji pt.: „*Inverse problems of shaping by electrochemical generating machining*” (Domanowski P. Kozak J., **Journal of Materials Processing Technology**, vol. 109, 2001, s. 347-353) [I.C.10]. Opracowany model matematyczny uwzględniał zmieniający się kształt obrabianej powierzchni, chwilową geometrię szczeliny międzyelektrodowej, właściwości elektrolitu i elektryczne parametry procesu warunkujące rozkład prędkości roztrawiania materiału. Stwierdzono, że model matematyczny zadawalająco opisuje warunki rzeczywiste procesu, co potwierdziły badania eksperymentalne. Natomiast zmodyfikowane symulacyjne oprogramowanie komputerowe, poza określeniem trajektorii ruchu elektrody odpowiednio do wymaganego kształtu, umożliwiało przeprowadzenie korekcji trajektorii ruchu elektrody w celu zapewnienia wymaganej dokładności kształtu i jakości powierzchni (rys. 28). Omawiana publikacja zawiera szczegółowe wyniki komputerowej analizy symulacyjnej procesu oraz badań eksperymentalnych metody ECGM w zastosowaniu do obróbki powierzchni o złożonych kształtach elektrodą uniwersalną z płaską lub walcową powierzchnią roboczą. Ze względu na możliwość kształtowania różnorodnych geometrycznie powierzchni elektrodą uniwersalną, metoda ta może być stosowana w elastycznych systemach produkcyjnych (ESP).

Wyniki badań eksperymentalnych obróbki elektrochemicznej ECM i ECGM oraz analiz teoretycznych z zakresu modelowania i sterowania procesem a także opracowanie konstrukcyjne wieloosiowej obrabiarki do obróbki ECM prezentowałem na konferencjach krajowych i międzynarodowych [II.F.1-3, II.L.1.1-2].

Napęd uniwersalnej elektrody do quasiobiwiedniowej obróbki elektrochemicznej uzyskał ochronę wzoru użytkowego [II.C.2.3].



(a)



(b)

Rys. 28. Komputerowa symulacja procesu ECGM [I.C.10]

5 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych, dydaktycznych i organizacyjnych

5.1 Pozostałe prace naukowo-badawcze po uzyskaniu stopnia doktora nauk

Po uzyskaniu stopnia doktora kontynuowałem badania związane z technologią obróbki elektrochemicznej oraz prowadziłem prace badawczo-rozwojowe w zakresie naświetlania obwodów drukowanych oraz automatyzacji produkcji.

Wyniki prac badawczych związanych z wytworzeniem prototypów naświetlarek do obwodów drukowanych realizowanych w ramach współpracy z firmami Radove GmbH, Radove Sp. z o. o. oraz OLEC Corp. [II.B.2.1-4], opublikowałem jako współautor w publikacjach [II.E.10, II.F.6-9, II.F.11]. Sposób naświetlania bez użycia filmu stanowi przedmiot patentu międzynarodowego [II.C.1.1] i został zastosowany w naświetlarce cyfrowej prezentowanej m.in. na targach IPC APEX EXPO® Conference & Exhibition 2013 w San Diego, USA. Źródło światła UV-LED [II.F.7, II.L.2.3] stosowane w naświetlarkach, było przedmiotem międzynarodowego zgłoszenia patentowego. Przeprowadziłem modelowanie i badania jednorodności naświetlania tym źródłem. Ponadto zajmowałem się badaniami technologii naświetlania elastycznych obwodów drukowanych.

Inny obszar mojej aktywności naukowo-badawczej dotyczy technologii i urządzeń przemysłowych stosowanych przy produkcji okien okrętowych. Do największych osiągnięć w tym zakresie zaliczam opracowanie technologii wytwarzania oraz urządzenia technologicznego szyb grzewczych oraz metod obróbki mechanicznej ram okien okrętowych [II.E.3, II.E.5-6, II.L.2.6].

5.2 Pozostałe oryginalne osiągnięcia projektowe, konstrukcyjne i technologiczne

Obszar technologii próżniowych

- Urządzenie laboratoryjne do obróbki plazmowej materiału biologicznego, wdrożono na Wydziale Rolniczym Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, (opracowanie koncepcji i projekt mechaniczny) 2016.
- Kontroler dozowania gazów w modzie impulsowym, wdrożono w 2017r. na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Inżynierii Materiałowej oraz Narodowym Centrum Badań Jądrowych w Świerku (założenia koncepcyjne do sterowania).
- Linia produkcyjna do nanoszenia cienkich powłok na bazie renu na materiale sypkim, w trakcie realizacji, (opracowanie koncepcji metody, budowy mechanicznej urządzenia technologicznego oraz założeń do sterowania procesem), przewidywany termin wdrożenia w KGHM- 2018 r (*załącznik 8.6*).

Obszar naświetlania obwodów drukowanych

- Część mechaniczna naświetlarek do elastycznych obwodów drukowanych AX, Olec Corp., Irvine, USA, 2001.
- LED-owe źródło skolimowanego promieniowania UV, (projekt, badania teoretyczne i eksperymentalne), Radove GmbH, Berlin, 2009.
- Część mechaniczna naświetlarki obwodów drukowanych PICO ze skolimowanym źródłem światła, Radove Sp. z o. o., Bydgoszcz, 2009-2014.
- Cyfrowa naświetlarka obwodów drukowanych, (współautor koncepcji działania i projekt części mechanicznej), Radove GmbH, Berlin, 2007.

Obszar automatyzacji produkcji

- Tokarka do regeneracji bieżni łożysk pieców rurowych w cementowniach, (współautor opracowania metody, projekt mechaniczny, badania eksploatacyjne), ZMP Zachwieja, Świtalski, Bydgoszcz, 2004.
- Napęd rzeźby mobilnej mistrza Twardowskiego na Starym Rynku w Bydgoszczy, 2006.
- Technologia i urządzenie technologiczne do wytwarzania szyb elektrogrzewczych do okien okrętowych, Bohamet S.A., Białe Błota, 2007.
- Wiertarka do ram okien okrętowych, (współautorstwo w opracowaniu koncepcji sterowania i projekt mechaniczny), Bohamet S.A., Białe Błota, 2008.
- Frezarka do zgrzein ram okien okrętowych, (opracowanie metody i projekt mechaniczny), Bohamet S.A., Białe Błota, 2008.
- Automat do gięcia i przecinania rurek aluminiowych do zbiorników paliwa w samochodach Fiat, (opracowanie technologii i projekt mechaniczny), Zakład Produkcji Form, Narzędzi Specjalnych i Przetwórstwa Tworzyw Sztucznych „Graform”, Bydgoszcz, 2009.
- Maszyna wytrzymałościowa do badania paneli szklanych na zginanie, (projekt części mechanicznej, badania i próby eksploatacyjne), Bohamet S.A., Białe Błota, 2009.
- Stanowisko do badania szczelności zasuw i hydrantów wodociągowych, (współautorstwo opracowania metody pomiarowej i projekt mechaniczny), Bohamet-Armatura, Białe Błota, 2009.

5.3 Działalność dydaktyczna

Działalnością dydaktyczną zajmuję się od początku zatrudnienia na Wydziale Mechanicznym Akademii Techniczno-Rolniczej w Bydgoszczy (obecnie Wydział Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego). Prowadzone przeze mnie zajęcia dydaktyczne związane są z blokami tematycznymi: projektowanie maszyn technologicznych i techniki wytwarzania. Przed uzyskaniem stopnia doktora prowadziłem głównie zajęcia laboratoryjne i projektowe z jednoczesnym zaangażowaniem w opracowanie materiałów dydaktycznych. W roku 1997 odbyłem 10 miesięczny zagraniczny staż naukowy w Fachhochschule Würzburg-Schweinfurt – Niemcy.

Po uzyskaniu stopnia doktora, będąc na stanowisku adiunkta prowadziłem wykłady z następujących przedmiotów: Obrabiarki, Kinematyka i dynamika obrabiarek, Uchwyty i przyrządy obróbkowe, Podstawy konstrukcji maszyn technologicznych, Technologia budowy maszyn, Technologia montażu, Inżynieria powierzchni, Zagadnienia technologii i organizacji remontów, CAD, Rysunek techniczny. Równolegle prowadziłem zajęcia laboratoryjne i projektowe z przedmiotów: Obrabiarki (L), Technologia montażu (P), Zagadnienia technologii i organizacji remontów (Ć), CAD (L), Uchwyty i przyrządy obróbkowe (P), Podstawy konstrukcji maszyn technologicznych (Ć, P), Technologia budowy maszyn (P), Praca przejściowa (P), Hydraulika i pneumatyka (L), Rysunek techniczny (Ć, P). Prezentowane przeze mnie treści wymienionych zajęć dydaktycznych są na bieżąco uaktualniane i dostosowywane do bieżących potrzeb i wymagań programowych, a opracowane materiały dydaktyczne i prezentacje multimedialne stanowią mój autorski wkład do dydaktyki. W celu uzupełnienia informacji prezentowanych podczas zajęć, organizowałem wycieczki dydaktyczne do zakładów stosujących najnowsze rozwiązania konstrukcyjne obrabiarek i technologie produkcji.

W okresie zatrudnienia na stanowisku adiunkta, byłem promotorem ok. 50 prac dyplomowych inżynierskich i magisterskich, zarówno na studiach stacjonarnych i niestacjonarnych na specjalności Mechanika i Budowa Maszyn. Byłem także recenzentem około 50 prac dyplomowych, biorąc udział w komisjach egzaminacyjnych. Uczestniczyłem w organizacji i byłem opiekunem praktyk zawodowych w zakładach przemysłu maszynowego.

Moja działalność dydaktyczna obejmuje również aktywny udział w zespołach opracowujących programy i plany dydaktyczne dla przedmiotów prowadzonych na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Wydziale Zarządzania. Jestem autorem lub współautorem programów nauczania dla przedmiotów: Obrabiarki, Uchwyty i przyrządy obróbkowe, Uchwyty – konstruowanie, Regeneracja narzędzi, Eksploatacja maszyn i narzędzi, Technologia montażu, Zagadnienia technologii i organizacji remontów maszyn, Grafika inżynierska.

Od 2018 roku jestem promotorem pomocniczym mgr inż. Tomasza Szynki. Realizuje on, na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, pracę doktorską pt. „Analiza pozycjonowania osi freza o zarysie kołowym w operacji frezowania powierzchni kształtowych”.

5.4 Działalność organizacyjna

Od początku pracy na Uczelni byłem zaangażowany w pracach badawczych i organizacyjnych realizowanych w Jednostce Innowacyjnej, Katedrze Obrabiarek i Robotów, a obecnie w Zakładzie Inżynierii Produkcji, uczestnicząc w organizacji procesu dydaktycznego i rozbudowie stanowisk laboratoryjnych. Moja działalność organizacyjna obejmuje także czynny udział w pracy wielu podmiotów statutowych Uczelni i Wydziału:

- członek Rady Wydziału 2000-2004,
- członek komisji ds. oceny nauczycieli dydaktycznych 2000-2004,
- członek komisji rekrutacyjnej 2000-2004.

Brałem czynny udział w pracach Komitetów Naukowych i Organizacyjnych konferencji naukowo-technicznych krajowych i międzynarodowych jako:

- członek komitetu naukowego: I Konferencja Naukowo-Przemysłowa „Powłoki Wielofunkcyjne”, Świeradów Zdrój, 2012,
- członek komitetu naukowego: II Konferencja Naukowo-Przemysłowa „Powłoki ochronne”, Świeradów Zdrój, 2013,
- sekretarz organizacyjny międzynarodowej konferencji naukowej „Electromachining 2015”, Bydgoszcz-Rydzyna, 2015,
- sekretarz organizacyjny międzynarodowej konferencji naukowej „Electromachining 2018”, Bydgoszcz, 2018.

Zdobyte doświadczenie zawodowe staram się wykorzystać w działalności poza uczelnią w organizacjach naukowych i technicznych:

- Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Mechaników Polskich, od 1990.
- Polskiego Towarzystwa Próżniowego, od 2010.
- Głównego Towarzystwa Naukowo-Technicznego Obrabiarki i Narzędzia, jako sekretarz Zarządu, od 2015.
- Nadwiślańskiego Zrzeszenia Pracodawców „Lewiatan”.

Jestem członkiem komitetu sterującego konsorcjum: Politechnika Łódzka, Politechnika Warszawska, CUPRUM, Bohamet S.A. - realizującego projekt „Osadzanie powłok ochronnych i dekoracyjnych na bazie renu i jego związków” ReNewTech na podstawie umowy nr: CuBR/II/2/NCBR/2015 współfinansowanego poprzez NCBiR i KGHM (załącznik 8.6).

Ponadto uzyskałem niżej wymienione certyfikaty:

- Certyfikat „Ochrona prawa własności intelektualnej i przemysłowej”, 2009.
- Certyfikat PN-EN ISO 9001: 2009 w zakresie: konstruowania, wytwarzania i regeneracji narzędzi skrawających, 2016.

5.5 Uzyskane nagrody, wyróżnienia i odznaczenia

Za swoją działalność naukowo-dydaktyczną i badawczo-rozwojową uzyskałem następujące nagrody i wyróżnienia:

- Laureat nagrody II stopnia Konkursu o Bydgoską „Łuczniczkę” w kategorii prac dyplomowych, 1988.
- Nagroda zespołowa II stopnia NOT „Za wybitne osiągnięcia w dziedzinie techniki w roku 1991.
- Wyróżnienie rozprawy doktorskiej, 1998.
- Nagroda JM Rektora ATR - zespołowa, 1999.

- Zespołowe wyróżnienie VI edycji Konkursu o Nagrodę Marszałka Województwa Kujawsko-Pomorskiego za rok 2005 w dziedzinie gospodarka województwa, 2006.
- Nagroda Rektora UTP, II stopnia, 2014.
- Medal 65-lecia Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego, 2016.
- **Zespołowa nagroda naukowa Politechniki Warszawskiej za szczególne osiągnięcia uwieńczone transferem prac naukowych i technicznych na potrzeby gospodarki, 2016.**

Piotr Dąbrowski