

## **Autoreferat**

przedstawiający opis dorobku i osiągnięć naukowych  
w szczególności określonych w art. 16 ust. 2 ustawy  
**w języku polskim**

**dr inż. Jarosław Bieniaś**  
Katedra Inżynierii Materiałowej  
Wydział Mechaniczny  
Politechnika Lubelska

Lublin, lipiec 2018

## Spis treści

Wyszczególnienie	Strona
1. Imię i nazwisko	3
2. Posiadane dyplomy, 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. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.)	4
4.1. Omówienie celu naukowego pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	4
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych	14
5.1. Działalność naukowa przed uzyskaniem stopnia doktora	14
5.2. Działalność naukowa po uzyskaniu stopnia doktora	17
6. Działalność dydaktyczna	29
7. Działalność organizacyjna	32
8. Osiągnięcia zgodnie z wymogami Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 roku w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego (Dz.U. Nr 196, poz. 1165)	34

### **1. Imię i nazwisko**

Jarosław Bieniaś

### **2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.**

**1999 r. - magister inżynier**, Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej.

Kierunek studiów: mechanika i budowa maszyn, kierunek dyplomowania: inżynieria materiałów konstrukcyjnych.

Praca magisterska pt. „Zastosowanie struktur warstwowych do regeneracji elementów maszyn”, promotor prof. dr hab. inż. Andrzej Weroński.

Studia wyższe ukończone z wynikiem bardzo dobrym.

**2004 r. – doktor nauk technicznych** w dyscyplinie budowa i eksploatacja maszyn. Uchwała Rady Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej z dn. 16.06.2004. Obrona rozprawy doktorskiej z wyróżnieniem.

Temat rozprawy: „Analiza wpływu fazy ceramicznej i struktury osnowy na odporność korozyjną kompozytów Al-Si zbrojonych dyspersyjnie grafitem”.

Promotor rozprawy: prof. dr hab. Barbara Surowska.

Recenzenci: prof. dr hab. inż. Jerzy Sobczak, prof. dr hab. inż. Andrzej Weroński.

### **3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.**

- 1999 - 2004 - asystent, Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej,
- 2004 - aktualnie - adiunkt, Politechnika Lubelska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Materiałowej,
- 2010 - 2013 - wykładowca, Wyższa Szkoła Ekonomii i Innowacji w Lublinie.

#### **4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego 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 (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.):**

Jako osiągnięcie naukowe, uzyskane po otrzymaniu stopnia doktora, stanowiące znaczący wkład w rozwój dyscypliny naukowej inżynieria materiałowa określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki z dnia 14 marca 2003 roku z późniejszymi zmianami wskazuję autorską monografię:

##### **„Kształtowanie stanu powierzchni rozdziału metal-kompozyt w laminatach metalowo-włóknistych z włóknami węglowymi”**

Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, ISBN: 978-83-7947-307-6, Lublin, 2018

Recenzenci wydawniczy:

- Dr hab. inż. Katarzyna Gawdzińska, Akademia Morska w Szczecinie
- Prof. dr hab. inż. Józef Kuczmaszewski, Politechnika Lubelska

#### **4.1. Omówienie celu naukowego ww. pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**

Istotny, autorski wkład do nauki przedstawionego osiągnięcia w obszarze dyscypliny inżynieria materiałowa stanowią zagadnienia dotyczące kształtowania struktury i właściwości powierzchni rozdziału metal-kompozyt w laminatach metalowo-włóknistych, które dotychczas nie zostały wystarczająco scharakteryzowane.

Znaczącym wkładem jest przedstawienie zależności pomiędzy strukturą warstwy wierzchniej metalu a adhezją na powierzchni rozdziału metal-kompozyt, a także charakterystyka powierzchni rozdziału metal-kompozyt i zjawiska zachodzące w obszarze międzyfazowym, w aspekcie otrzymania laminatów metalowo-włóknistych o odpowiednich właściwościach adhezyjnych w układzie metal-kompozyt.

Istotny aspekt poznawczy wiąże się z identyfikacją morfologii warstw wierzchnich i charakteru ich oddziaływania z kompozytem włóknistym, w zależności od sposobu modyfikacji powierzchni metalu.

Istotnym wkładem w rozwój dyscypliny inżynieria materiałowa jest również systematyczna i kompleksowa charakterystyka procesu zniszczenia laminatów metalowo-włóknistych w złożonym stanie obciążenia – obciążenia dynamicznego z niską prędkością z identyfikacją mechanizmów i form zniszczenia.

Niniejsze opracowanie określające wpływ i rolę powierzchni międzyfazowej metal-kompozyt w procesie zniszczenia laminatów metalowo-włóknistych może stanowić podstawę do dalszych prac badawczo-rozwojowych w zakresie kształtowania powierzchni rozdziału metal-kompozyt, rozwoju technologii laminatów oraz opracowania adekwatnych kryteriów ich zniszczenia, co jest istotne w procesie projektowania, wytwarzania oraz użytkowania struktur wykonanych z laminatów metalowo-włóknistych.

Wymiernym efektem zrealizowanych prac badawczych jest wytworzenie zaawansowanych i rozwojowych hybrydowych laminatów metalowo-włóknistych z zastosowaniem różnych warstw metalu i kompozytu o osnowie polimerowej, wzmocnianych włóknami węglowymi o oczekiwanych właściwościach adhezyjnych na powierzchni rozdziału metal-kompozyt, co warunkuje wysoką jakość tych materiałów.

Kompozyty o osnowie polimerowej wzmocniane włóknami ciągłymi stały się jedną z podstawowych i najbardziej perspektywicznych grup materiałów w wielu sektorach techniki, szczególnie w zastosowaniach lotniczych. Związane jest to z możliwością do osiągnięcia znaczną modyfikacją charakterystyk mechanicznych i fizycznych przez wprowadzenie ukierunkowanych włókien wzmocniających do osnowy, co czyni kompozyty niezwykle interesującymi zarówno pod względem poznawczym jak i aplikacyjnym.

Ograniczenia metali oraz klasycznych kompozytów włóknistych przyczyniły się do opracowania i rozwoju laminatów metalowo-włóknistych (*Fibre Metal Laminates*, FML) składających się z naprzemiennie ułożonych warstw metalu i kompozytu polimerowego wzmocnianego włóknami ciągłymi. Takie połączenie pozwala na uzyskanie nowej generacji materiałów hybrydowych o ulepszonych właściwościach w porównaniu do tworzących je poszczególnych komponentów (m.in. wysokiej wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej, tolerancji na uszkodzenia i odporności na obciążenia dynamiczne, wysokiej trwałości i odporności korozyjnej). Najbardziej znanymi są laminaty ARALL oraz GLARE.

Aktualnie prowadzone prace naukowo-badawcze, koncepcyjne i wdrożeniowe w zakresie FML, oprócz wszechstronnych badań właściwości GLARE, ukierunkowane są na nowe typy laminatów metalowo-włóknistych oraz techniki ich wytwarzania (II generacja laminatów metalowo-włóknistych, inteligentna automatyzacja produkcji), w których oczekiwane jest zastosowanie jako międzywarstw kompozytu polimerowego wzmocnianego włóknami węglowymi, a także zastosowanie m.in. warstw tytanowych.

Wraz z rosnącym wykorzystaniem laminatów metalowo-włóknistych w przemyśle lotniczym i innych sektorach, niezwykle istotnym aspektem naukowo-badawczym są zagadnienia związane z procesem i mechanizmami zniszczenia, których zrozumienie staje się niezbędne w projektowaniu, wytwarzaniu i eksploatacji oraz stanowi podstawę w opracowaniu adekwatnych kryteriów akceptacji.

Kształtowanie struktury i właściwości laminatów metalowo-włóknistych jest uzależnione od wielu czynników, a wśród najistotniejszych obok właściwości poszczególnych komponentów (metal i kompozytu włóknistego) są powierzchnia rozdziału metal-kompozyt oraz otrzymanie prawidłowego połączenia adhezyjnego. Pomimo stosowania różnorodnych i nowoczesnych metod przygotowania powierzchni metali, problematyka uzyskania odpowiedniego połączenia adhezyjnego pomiędzy metalem a kompozytem pod względem fizykochemicznym oraz wytrzymałościowym jest nadal obszarem intensywnych badań naukowych, a także prac rozwojowych, stanowiąc istotny aspekt poznawczy i aplikacyjny.

W monografii przedstawiono wybrane badania własne, obejmujące problematykę kształtowania struktury i właściwości powierzchni rozdziału metal-kompozyt w laminatach metalowo-włóknistych. Powierzchnia rozdziału jest najbardziej istotnym obszarem laminatu, a zarazem bardzo złożonym, który dotychczas nie został wystarczająco scharakteryzowany.

Celem badawczym pracy było przedstawienie zależności pomiędzy strukturą warstwy wierzchniej metalu a adhezją na powierzchni rozdziału metal-kompozyt, a także określenie roli powierzchni międzyfazowej w procesie zniszczenia laminatów w złożonym stanie obciążenia (obciążenia dynamicznego z niską prędkością). Wiązało się to z identyfikacją morfologii warstw wierzchnich i charakteru ich oddziaływania z kompozytem włóknistym w zależności od sposobu modyfikacji powierzchni metalu. Na podstawie analizy stanu wiedzy oraz wyników badań własnych, przedstawiono zależności, które bezpośrednio wpływają na właściwości połączenia adhezyjnego, a tym samym na kształtowanie powierzchni rozdziału metal-kompozyt w laminatach metalowo-włóknistych.

Przedmiotem badań były nowe i rozwojowe laminaty metalowo-włókniste z naprzemiennie ułożonymi warstwami metalu (stop aluminium 2024-T3 i czysty technicznie tytan cpTi grade 2) oraz kompozytu o osnowie epoksydowej wzmocnianego ciągłymi włóknami węglowymi.

W pracy wykazano, że uzyskanie odpowiednich właściwości adhezyjnych na powierzchni rozdziału metal-kompozyt uwarunkowane jest sposobem przygotowania powierzchni metalu, co oznacza, że prawidłowy dobór poszczególnych komponentów laminatu metalowo-włóknistego nie gwarantuje uzyskania materiału o wysokiej jakości.

Przygotowanie powierzchni stopu aluminium 2024-T3 przeprowadzono poprzez wytworzenie warstw tlenkowych w procesie elektrochemicznym – utleniania anodowego w kwasie chromowym i alternatywnie siarkowym, natomiast dla tytanu cpTi przez wytworzenie konwersyjnej warstwy tlenkowej w procesie chemicznym jaki stanowiła obróbka fosforanowo-fluorkowa. W wyniku zastosowanych procesów na powierzchni metali uzyskano warstwy tlenków charakteryzujące się określonymi cechami topografii i morfologii modyfikując właściwości fizyko-chemiczne oraz adhezyjne na powierzchni rozdziału metal-kompozyt.

Wyznaczenie zwilżalności oraz swobodnej energii powierzchniowej pozwoliło na ocenę zdolności adhezyjnej badanych powierzchni do utworzenia połączenia o wysokiej wytrzymałości i trwałości oraz określenie zależności pomiędzy jej morfologią i topografią. Przeprowadzone badania klasyfikują powierzchnię tych materiałów jako hydrofilową, czyli charakteryzującą się bardzo niskim kątem zwilżania oraz wysokimi wartościami swobodnej energii powierzchniowej. Struktura, właściwości fizykochemiczne, cechy warstw tlenkowych, w tym głównie charakterystyka porów odgrywają kluczową rolę we właściwościach połączenia adhezyjnego na powierzchni rozdziału metal-kompozyt.

Dla uzyskania połączenia o oczekiwanych właściwościach adhezyjnych na powierzchni rozdziału metal-kompozyt korzystne jest zastosowanie warstwy tlenkowej utworzonej w procesie anodowania w kwasie chromowym. Właściwości te wynikają z cech fizykochemicznych nadawanych powierzchni aluminium. Wysoka wartość energii powierzchniowej, łatwość zwilżania, nano-chropowatość, porowata struktura zapewniają możliwość tworzenia obszaru międzyfazowego i redystrybucję naprężeń na powierzchni rozdziału metal-kompozyt. Powstały na powierzchni rozdziału metal-kompozyt obszar międzyfazowy jest połączeniem oddziaływań mechanicznych oraz chemicznych. W obu przypadkach kluczowym jest charakterystyczne oddziaływanie pomiędzy warstwą tlenkową a primerem. Wytworzona warstwa tlenkowa z charakterystyczną porowatą strukturą może umożliwiać penetrację warstwy przez primer. W rezultacie sprzyja to tworzeniu się mechanicznych szepień lub zakotwiczaniu się primeru lub osnowy epoksydowej w strukturze warstwy, co poprawia właściwości połączenia adhezyjnego. Wysoki stopień penetracji jest spowodowany najprawdopodobniej siłami kapilarnymi, dobrą zwilżalnością pomiędzy primerem a tlenkiem oraz niską lepkością primeru. Osiągnięta w ten sposób zostaje bardzo wysoka wytrzymałość połączenia poprzez zmaksymalizowanie stopnia mechanicznych szepień (zakotwiczzeń primeru), która wynika w przypadku struktury porowatej, również ze znacznego wzrostu powierzchni międzyfazowej. W przypadku

aluminium z wytworzoną warstwą tlenkową w procesie anodowania w kwasie siarkowym niedostateczna penetracja warstwy tlenkowej przez primer może powodować ukształtowanie mniej korzystnej struktury międzyfazowej, co odnotowano również na powierzchni tytanu poddanego obróbce fosforanowo-fluorkowej, charakteryzującej się niewielką ilością mikro lub makrochropowatości i brakiem porowatości. Zastosowanie warstwy przejściowej primeru (z silanowymi promotorami adhezji) przyczynia się do powstania hybrydowego obszaru międzyfazowego, stanowiąc połączenie pomiędzy substratami organicznymi (osnową epoksydową) a nieorganiczną powierzchnią warstwy tlenkowej. Substancja typu primer, wnikając w pory warstwy tlenkowej, może powodować powstawanie „kompozytowego” obszaru na powierzchni rozdziału faz. Obszar ten będzie charakteryzował się pośrednimi wartościami modułu sprężystości i wytrzymałości pomiędzy primerem/osnową epoksydową a tlenkiem. Taka struktura będzie korzystna biorąc pod uwagę wytrzymałość połączenia oraz ciągliwość. Można zatem wnioskować, że warstwa tlenkowa stanowi wzmocnienie dla warstwy granicznej. Ponadto, obecność cząsteczek inhibitora korozji w primerze może prowadzić do powstania dodatkowej strefy kompozytowej na powierzchni rozdziału metal-kompozyt, tj. kompozytu o osnowie epoksydowej wzmocnianego dyspersyjnie cząsteczkami inhibitora korozji (chromianu strontu). W ocenie autora może to także sprzyjać osiągnięciu wysokiej wytrzymałości połączenia w obszarze powierzchni rozdziału metal-kompozyt. Potwierdzają to analizy fraktograficzne powierzchni metalu po wykonanych badaniach odporności na rozwarstwienie, wskazujące na obecność primeru/osnowy epoksydowej z cząsteczkami inhibitora korozji na granicy rozdziału z warstwami tlenkowymi. Wysoka adhezja połączenia na powierzchni rozdziału metal-kompozyt determinowana jest również poprzez naturę chemiczną zarówno primeru jak i tlenku. Warstwa tlenków zawierająca dużą gęstość grup hydroksylowych (większa zwilżalność) stanowi powierzchnię o zdolności tworzenia wiązań chemicznych – stabilnych wiązań kowalencyjnych z organicznymi grupami funkcyjnymi. Korzystnym jest zatem uzyskanie powierzchni, która będzie charakteryzowała się wysokimi wartościami składowej polarności co ma miejsce dla otrzymanych warstw tlenkowych w wyniku procesu anodowania w kwasie siarkowym oraz w kwasie chromowym. Większa ilość aktywnych chemicznie miejsc na powierzchni powoduje poprawę właściwości adhezyjnych poprzez wzrost ilości wiązań kowalencyjnych powstających w obszarze międzyfazowym zwiększając prawdopodobieństwo trwałości połączenia. W tym przypadku do wyjaśnienia adhezji może posłużyć teoria adsorpcyjna.

Mając na uwadze fakt, że jednym z głównych czynników wpływających na optymalne połączenie adhezyjne jest odpowiednia nanometryczna struktura i morfologia powierzchni



warstwy tlenkowej (ze zdolnością przenikania primeru przez warstwę) można stwierdzić, że procesy adhezji na powierzchni rozdziału metal-kompozyt zachodzą głównie w nanoskali.

W pracy wykazano, że istnieje korelacja pomiędzy topografią i morfologią warstwy wierzchniej modyfikowanej procesem anodowania w kwasie chromowym i siarkowym oraz obróbkę fosforanowo-fluorkową a odpornością na rozwarstwienia na powierzchni rozdziału metal-kompozyt. Potwierdzają to wyniki odporności na rozwarstwienia w warunkach I i II sposobu pękania, które wykazały najwyższą odporność na rozwarstwienie powierzchni rozdziału metal-kompozyt z warstwą tlenkową otrzymaną w wyniku procesu anodowania w kwasie chromowym. W tym przypadku zniszczenie na powierzchni rozdziału metal-kompozyt następuje jako dekohezja w warstwie kompozytu włóknistego, co świadczy o dobrych właściwościach adhezyjnych na powierzchni rozdziału metal-kompozyt i związane jest z przedstawionymi powyżej korzystnymi cechami fizykochemicznymi i morfologicznymi otrzymanej warstwy tlenkowej. Ponadto, w obszarze międzyfazowym następuje równoczesne oddziaływanie mechaniczne poprzez szepianie oraz połączenie chemiczne w wyniku tworzenia się wiązań pierwotnych o charakterze kowalencyjnym. Niższą odpornością na rozwarstwienie na powierzchni rozdziału metal-kompozyt charakteryzowały się warstwy tlenkowe otrzymane w wyniku procesu anodowania w kwasie siarkowym, a najniższą po obróbce fosforanowo-fluorkowej. W przypadku procesu anodowania w kwasie siarkowym i po obróbce fosforanowo-fluorkowej, wytworzona warstwa tlenkowa nie wykazała właściwej morfologii, co uniemożliwiło utworzenie korzystnego obszaru międzyfazowego. Charakter zniszczenia w obu przypadkach jest mieszany: deadhezja z dekohezją (z przewagą deadhezji). O takiej charakterystyce decydują topografia i morfologia powierzchni warstwy tlenkowej, które nie sprzyjają wypełnianiu porów w wyniku anodowania w kwasie siarkowym, a po obróbce fosforanowo-fluorkowej otrzymywana jest powierzchnia charakteryzująca się nieznaczającą makro i mikrochropowatością. Można zatem stwierdzić, że w obu przypadkach na powierzchni rozdziału metal-kompozyt następuje jedynie połączenie chemiczne poprzez wytworzenie wiązań pierwotnych o charakterze kowalencyjnym. Stwierdzona wyższa odporność na rozwarstwienie na powierzchni rozdziału metal-kompozyt dla warstwy tlenkowej otrzymanej w wyniku anodowania w kwasie siarkowym w porównaniu do obróbki fosforanowo-fluorkowej może być spowodowana występującymi różnicami w oddziaływaniu pomiędzy primerem a tlenkami na granicy faz i utworzeniem silniejszych i/lub większej ilości wiązań chemicznych natury kowalencyjnej w obszarze międzyfazowym. Ten fakt można przypisać znacząco wyższej wartości składowej polarnej swobodnej energii powierzchniowej,

a tym samym większej ilości potencjalnych miejsc powstawania chemicznych wiązań kowalencyjnych dla warstwy anodowej w kwasie siarkowym.

W kształtowaniu laminatów metalowo-włóknistych, a w szczególności połączenia adhezyjnego na powierzchni rozdziału metal-kompozyt istotnym jest zastosowanie odpowiedniej techniki wytwarzania laminatów. Zastosowana metoda autoklawowa do wytwarzania doświadczalnych laminatów metalowo-włóknistych zgodnie z przedstawioną metodyką, przy zachowaniu odpowiednich parametrów wytwarzania (ciśnienie), pozwala na uzyskanie wysokojakościowych laminatów metalowo-włóknistych, charakteryzujących się jednorodną strukturą (zarówno w międzywarstwach kompozytowych jak i na powierzchni rozdziału metal-kompozyt), bez obecności nieciągłości w postaci porowatości i rozwarstwień. W procesie autoklawowym ciśnienie zewnętrzne oraz temperatura mogą przyczyniać się w znaczący sposób do zmniejszenia lepkości i kąta zwilżania, co może mieć pozytywny wpływ na wnikanie substratu (primeru, osnowy epoksydowej) w nierówności podłoża oraz porowatości warstwy tlenkowej. Jedną z najbardziej istotnych zalet kształtowania laminatów metalowo-włóknistych metodą autoklawową jest jednoczesna (w jednym procesie) integracja kompozytu włóknistego (utwardzenie prepregu), który stanowi międzywarstwę oraz połączenia adhezyjnego na powierzchni rozdziału metal-kompozyt.

Rolę powierzchni rozdziału metal-kompozyt charakteryzowano poprzez analizę procesu zniszczenia laminatów metalowo-włóknistych poddanych obciążeniom dynamicznym z niską prędkością (*low-velocity impact*). Analizowano laminaty o wysokiej odporności na rozwarstwienie w układzie metal-kompozyt (laminat aluminium-kompozyt z włóknami węglowymi z warstwą tlenkową otrzymaną w procesie anodowania w kwasie chromowym) oraz laminaty o niskiej odporności na rozwarstwienie (laminat tytan-kompozyt z włóknami węglowymi, gdzie jako przygotowanie powierzchni zastosowano obróbkę fosforanowo-fluorkową). Zniszczenie w wyniku obciążenia dynamicznego siłą skupioną (impaktu) spowodowane jest stosunkowo niską wytrzymałością laminatów poza płaszczyznę warstwy (*out-of plane*) z wysokimi naprężeniami ścinającymi w strukturze laminatu, a także stanem naprężeń związanym ze zginaniem (ugięciem) oraz odkształceniem plastycznym laminatu. W konsekwencji dominującymi formami zniszczenia są pęknięcia włókien i osnowy oraz rozwarstwienia.

Charakterystycznym typem zniszczenia badanych laminatów poddanych obciążeniom dynamicznym są pęknięcia na powierzchni rozdziału włókno wzmacniająca-osnowa spowodowane obecnością naprężeń ścinających. Przy wyższych energiach uderzenia pęknięcia te tworzą istotne rozszczepienia w warstwach kompozytowych. Powstałe pęknięcia

osnowy (rozszczerpienia) w badanych laminatach metalowo-włóknistych są bezpośrednio związane z rozwarstwieniami (najbardziej charakterystyczna i główna forma zniszczenia badanych laminatów) oraz z właściwościami adhezyjnymi na powierzchni rozdziału metal-kompozyt. W strukturze laminatu obserwuje się interakcje pomiędzy intralaminarnymi i interlaminarnymi pęknięciami, gdzie charakterystyczne rozszczerpienia na powierzchni rozdziału włókno-osnowa mogą stanowić miejsca do inicjacji rozwarstwień pomiędzy warstwami kompozytowymi o różnym ukierunkowaniu kątowym włókien wzmacniających, a także rozwarstwień na powierzchni rozdziału metal-kompozyt. Pęknięcia osnowy, w przeciwieństwie do rozwarstwień, nie wymagają znacznej energii oraz nie powodują wyraźnego spadku sztywności (charakterystyczne spadki siły na charakterystyce  $F-t$ ). Można zatem stwierdzić, że jedną z najważniejszych kwestii jest wytrzymałość i trwałość połączenia włókno-osnowa, która także wpływa na charakterystykę zniszczenia na powierzchni rozdziału metal-kompozyt. Powierzchnia rozdziału włókno wzmacniająca-osnowa o niskiej wytrzymałości połączenia prowadzi do uprzywilejowanego przebiegu zniszczenia na powierzchni rozdziału włókno-osnowa, w wyniku obniżenia wytrzymałości na zginanie i ścinanie, co powoduje wzrost rozwarstwienia i rozszczerpienia warstw kompozytowych, a także odkształcenia (ugięcia) laminatu.

Doświadczalne laminaty metalowo-włókniste stanowią połączenie materiału o cechach plastycznych (metal) oraz kompozytu o osnowie polimerowej wzmacnianego włóknami węglowymi o wysokiej sztywności i niskim odkształceniu w procesie zniszczenia. Dla tego typu materiału odnotowano znaczące rozwarstwienia pomiędzy warstwami o różnym ułożeniu kątowym włókien wzmacniających oraz liczne rozszczerpienia w warstwach kompozytowych. Ponadto zastosowanie włókien węglowych charakteryzujących się znaczną kruchością powoduje, że w wyniku oddziaływania obciążeń dynamicznych mechanizm absorpcji energii w kompozycie następuje również poprzez zniszczenie włókien wzmacniających. W badanych laminatach ma to odzwierciedlenie w pękaniu na wskroś warstw kompozytu włóknistego przy wyższych energiach zastosowanego obciążenia dynamicznego. Jak opisano powyżej, najbardziej istotną formę zniszczenia w badanych doświadczalnych laminatach metalowo-włóknistych poddanych obciążeniom dynamicznym stanowią rozwarstwienia. Wielkość rozwarstwień na poszczególnych powierzchniach rozdziału metal-kompozyt wynika z charakterystyki zniszczenia laminatów tj. odkształcenia plastycznego, stanu naprężeń w laminacie podczas obciążenia dynamicznego oraz właściwości adhezyjnych na powierzchni rozdziału metal-kompozyt. Istotnymi z punktu widzenia celu i zakresu badań są rozwarstwienia powstające na powierzchni rozdziału

między kompozytem a górną i dolną warstwą metalu. Wraz ze wzrostem energii obciążenia dynamicznego wzrasta wielkość rozwarstwienia na powierzchni rozdziału metal-kompozyt dla obu grup badanych laminatów. Występują one pomiędzy poszczególnymi warstwami kompozytu włóknistego o różnym ukierunkowaniu włókien wzmacniających, a także na powierzchni rozdziału metal-kompozyt.

Analiza charakterystyki zniszczenia laminatów metalowo-włóknistych na powierzchni rozdziału metal-kompozyt wskazuje na występowanie różnic w zależności od rodzaju badanych laminatów oraz sposobu przygotowania powierzchni metalu, a tym samym właściwości adhezyjnych w układzie metal-kompozyt. W przypadku laminatów metalowo-włóknistych z warstwą tlenkową otrzymaną w wyniku anodowania w kwasie chromowym, charakteryzujących się dobrą adhezją, na powierzchni rozdziału metal-kompozyt utworzony zostaje obszar międzyfazowy, który odznacza się korzystnymi właściwościami o pośrednich wartościach modułów pomiędzy metalem a kompozytem włóknistym. Utworzona strefa międzyfazowa wpływa na zwiększenie wytrzymałości połączenia adhezyjnego i zapobiega rozwarstwieniom na powierzchni rozdziału metal-kompozyt (najwyższa odporność na rozwarstwienie w warunkach I i II sposobu pęknięcia).

Opisany obszar międzyfazowy pełni kluczową rolę podczas obciążeń dynamicznych. Następuje w nim transfer (przekazywanie) i redystrybucja naprężeń do objętości kompozytu włóknistego przez powierzchnię rozdziału metal-kompozyt o korzystnych właściwościach adhezyjnych. Potwierdzeniem tej tezy jest fakt, że zniszczenie na powierzchni rozdziału metal-kompozyt ma charakter dekohezji w warstwie kompozytowej. Ponadto, odnotowane charakterystyczne zmiany w morfologii warstwy tlenkowej (pęknięcie warstwy) w wyniku oddziaływania wgłębniaka i naprężeń ścinających świadczą o istotnej roli warstwy tlenkowej w przekazywaniu obciążeń na powierzchni rozdziału metal-kompozyt oraz jej udziale w częściowej absorpcji energii obciążenia dynamicznego. Dla laminatów metalowo-włóknistych typu tytan-kompozyt epoksydowo-węglowy, które odznaczają się niższą odpornością na rozwarstwienia w warunkach I i II sposobu pęknięcia na powierzchni rozdziału metal-kompozyt, w wyniku obciążeń dynamicznych i oddziaływania naprężeń ścinających, odnotowuje się powstawanie pęknięć oraz rozwarstwień bezpośrednio na granicy rozdziału powierzchnia metalu-osnowa kompozytu. Mechanizm zniszczenia na powierzchni rozdziału metal-kompozyt ma charakter mieszany adhezyjno-kohezyjny. Niewystarczająca adhezja na powierzchni rozdziału metal-kompozyt może wpływać na obniżenie wytrzymałości połączenia powodując, że ukształtowana powierzchnia rozdziału nie jest zdolna do przeniesienia obciążeń w strefę objętości kompozytu włóknistego, a w szczególności na

komponent, jaki stanowi faza wzmacniająca. W takich warunkach obecność naprężeń ścinających inicjuje powstawanie rozwarstwień oraz pęknięć bezpośrednio na powierzchni rozdziału. Prowadzi to do obniżenia odporności na rozwarstwienie, szczególnie w warunkach II sposobu pęknięcia (odnotowane najniższe wartości) i powstawanie rozwarstwień o największej szerokości na górnej powierzchni rozdziału metal-kompozyt. W przypadku laminatów metalowo-włóknistych, w których warstwy metalu stanowi tytan, właściwości materiału mają decydujący wpływ na dynamiczną reakcję struktury laminatu. W efekcie prowadzi to do otrzymania laminatów charakteryzujących się bardzo dobrą odpowiedzią na obciążenia dynamiczne o mniejszym obszarze zniszczenia i wysokim stopniu absorpcji energii uderzenia, co skutkuje zniszczeniem struktury laminatu, w tym rozwarstwień na ukształtowanej powierzchni rozdziału metal-kompozyt. Należy jednak zwrócić uwagę na fakt, że zniszczenie struktury laminatu, w szczególności na powierzchni rozdziału metal-kompozyt, może znacząco wpływać na jego integralność i stabilność. Dlatego też istotna jest ocena właściwości resztkowych (wytrzymałości) tych laminatów po poddaniu obciążeniom dynamicznym o niskiej prędkości. Badania takie są aktualnie prowadzone przez autora. Zdaniem autora, jedną z najbardziej kluczowych kwestii jest uzyskanie wysokiej integralności strukturalnej na powierzchni rozdziału metal-kompozyt, która pełni niezwykle ważną rolę m.in. w procesie transferu obciążeń, odporności korozyjnej oraz wytrzymałości zmęczeniowej. W związku z tym, optymalnym rozwiązaniem wydaje się dążenie do otrzymania połączenia o korzystnych z punktu widzenia celów właściwościach adhezyjnych i wysokiej odporności na rozwarstwienia na powierzchni rozdziału metal-kompozyt, co sprzyja transferowi obciążeń do struktury kompozytowej. Kolejnym zagadnieniem powinna być próba uzyskania efektywnej drogi zwiększenia zdolności absorpcji energii obciążenia dynamicznego laminatów metalowo-włóknistych przez kontrolowane powstawanie i rozwój rozwarstwień na powierzchni rozdziału poszczególnych warstw kompozytowych, które może być realizowane poprzez zastosowanie ultracienkich warstw preimpregnatu z osnową o podwyższonej plastyczności. Badania w tym zakresie są również prowadzone przez autora. Podsumowując, przeprowadzone badania odporności na obciążenia dynamiczne doświadczalnych laminatów metalowo-włóknistych potwierdzają, że przygotowanie powierzchni metalu, a tym samym kształtowanie powierzchni rozdziału metal-kompozyt ma bardzo istotny wpływ na charakterystykę zniszczenia laminatów.

Prace studialne, analizy własne, a także przeprowadzone badania warstwy wierzchniej oraz procesów zniszczenia znacząco wzbogacają istniejący stan wiedzy w zakresie zaawansowanych materiałów jakimi są laminaty metalowo-włókniste z włóknami węglowymi

dostarczając cennych informacji dla zrozumienia procesów zniszczenia, w tym identyfikacji mechanizmów za nie odpowiedzialnych. Przedstawiona problematyka może być istotna w projektowaniu materiałów kompozytowych, z uwzględnieniem odporności na obciążenia dynamiczne, a także w opracowaniu i rozwoju adekwatnych modeli do przewidywania procesu zniszczenia.

## **5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych**

### **5.1. Działalność naukowa przed uzyskaniem stopnia doktora**

W 1994 roku ukończyłem I Liceum Ogólnokształcące im. K. Brodzińskiego w Tarnowie. W tym samym roku podjąłem studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej na kierunku studiów mechanika i budowa maszyn. Studia wyższe ukończyłem z wynikiem bardzo dobrym w 1999 roku uzyskując tytuł zawodowy magistra inżyniera na kierunku dyplomowania inżynieria materiałów konstrukcyjnych. Przedłożyłem pracę magisterską pt. „Zastosowanie struktur warstwowych do regeneracji elementów maszyn”, której promotorem był prof. dr hab. inż. Andrzej Weroński.

Bezpośrednio po ukończeniu studiów wyższych w 1999 roku zostałem zatrudniony na stanowisku asystenta w Katedrze Inżynierii Materiałowej na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej. Moim opiekunem naukowym została prof. dr hab. Barbara Surowska. Zainspirowany przez opiekuna naukowego oraz w wyniku nawiązania współpracy naukowo-badawczej z prof. dr hab. inż. Jerzym Sobczakiem z Instytutu Odlewnictwa w Krakowie podjąłem prace w obszarze problematyki materiałów kompozytowych w szczególności kompozytów metalowych. W tym okresie spektrum moich prac naukowych stanowiły badania nad kształtowaniem struktury i właściwości kompozytów o osnowie aluminium zbrojonych cząsteczkami ceramicznymi (SiC, grafitu, fly-ash'u) w aspekcie ich podatności na korozję [zał. 3 pkt. IIA poz. 34, pkt. IIE pub. poz. 49,63,65,70,75,79,81,82, mat. konf. poz. 17,19].

Głównym celem naukowym badań było przeprowadzenie analizy wpływu cząsteczek ceramicznych-grafitu (fazy zbrojącej) i struktury osnowy na zachowanie korozyjne kompozytów o osnowie podeutektycznych, okołoeutektycznych, nadeutektycznych stopów aluminium-krzem. Zakres prowadzonych badań obejmował: analizę mikrostrukturalną materiałów kompozytowych oraz stopów osnowy, badania podatności materiałów doświadczalnych na korozję wżerową, badania korozji zmęczeniowej w wyniku

oddziaływania naprężeń i środowiska korozyjnego oraz określenie wpływu obróbki cieplnej na podatność korozyjną badanych materiałów. Należy wyeksponować wykonane kompleksowe badania korozji elektrochemicznej oraz wnikliwą analizę strukturalną i fazową materiałów doświadczalnych. Analiza wyników i wnioski wskazały, że poza cząsteczkami ceramicznymi istotny wpływ na zachowanie korozyjne materiałów kompozytowych ma struktura osnowy. Określono związki pomiędzy strukturą, techniką wytwarzania a podatnością na korozję materiałów kompozytowych o osnowie stopów Al-Si zbrojonych dyspersyjnie grafitem. Badania własne potwierdziły tezę, że wydzielenia faz międzymetalicznych, związanych z osnową oraz wprowadzenie cząsteczek fazy zbrojącej powodują wzrost podatności na korozję wżerową kompozytów o osnowie stopów aluminium-krzem.

W ramach prowadzonych badań naukowych realizowałem projekty badawcze finansowane przez MNiSW. W latach 2000-2001 projekt badawczy dla młodych naukowców 7 T08D 012 19 pt. „Określenie cech strukturalnych mających wpływ na podatność korozyjną materiałów kompozytowych o osnowie aluminium” jako kierownik projektu. Natomiast w latach 2002-2004 realizowałem promotorski projekt badawczy 4 T08D 029 22 związany z rozprawą doktorską dotyczący „Analizy wpływu fazy ceramicznej i struktury osnowy na odporność korozyjną kompozytów Al-Si zbrojonych dyspersyjnie grafitem”.

Moja praca naukowo-badawcza obejmowała również badania w zakresie biomateriałów stosowanych w stomatologii (zespół kierowany przez prof. Barbarę Surowską), które związane były z uzyskaniem trwałego połączenia w obszarze granicznym pomiędzy porcelaną dentystyczną a powierzchnią metalowych odlewów protetycznych. Celem badań było ukształtowanie warstwy wierzchniej na podłożach metalowych biomateriałów (tytanie i stopie Ti6Al4VELI, stopie kobaltu) przez wytworzenie kompozytowego układu wielowarstwowego złożonego z wewnętrznej warstwy ceramicznej ( $\text{SiO}_2$  lub  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ ) wykonanej metodą zol-żel i warstwy zewnętrznej z porcelany stomatologicznej. Aspekt poznawczy wiązał się z analizą morfologii warstwy pośredniej i charakteru jej oddziaływania z metalicznym podłożem, opisem reakcji zachodzących na granicy fazowej podczas obróbki cieplnej metal-warstwa pośrednia-porcelana, określeniem odporności na korozję warstw ceramicznych nałożonych na podłoża metalowe oraz odpornością na zużycie ściernie. Głównym efektem aplikacyjnym przeprowadzonych badań było opracowanie składu chemicznego, sposobu nakładania warstw pośrednich i rodzaju obróbki cieplnej pozwalających na uzyskanie trwałego układu kompozytowego metal-

warstwa pośrednia-porcelana do zastosowań w protetyce stomatologicznej. Najważniejszym osiągnięciem naukowym było wykazanie, że połączenie metalu z porcelaną poprzez pośrednią warstwę ceramiczną ma charakter połączenia dyfuzyjnego i chemicznego. Wytwarzanie warstw przejściowych SiO<sub>2</sub> i SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> metodami zol-żel na tytanie i stopie Ti6Al4V pozwala uzyskać nową generację biomateriałów o ściśle określonej mikrostrukturze, składzie chemicznym i fazowym, topografii powierzchni, odporności na zużycie i procesy korozji stanowiąc nowoczesną technologię z zakresu inżynierii materiałowej. Wyniki przeprowadzonych badań mają wysoką wartość naukową oraz wartość praktyczną stanowiąc istotny wkład w rozwój inżynierii warstwy wierzchniej biomateriałów [zał. 3 pkt. IIA poz. 32,33, pkt. IIE pub. poz. 35,51,64,67-69,71-74,76,77, mat. konf. poz. 15,16]. Badania naukowe prowadzone były w ramach projektu badawczego nr 4 T08A 045 23 pt: „Rozwinięcie podstaw naukowych wytwarzania trwałego złącza metal – porcelana dla zastosowań w protetyce stomatologicznej” pod kierownictwem prof. Barbary Surowskiej. Projekt realizowany był w latach 2002-2005 i finansowany przez KBN. Zespół badawczy stanowili wykonawcy z trzech krajowych uczelni: Politechniki Lubelskiej, Akademii Górniczo-Hutniczej oraz Collegium Medicum Uniwersytetu Jagiellońskiego.

W okresie II-IV 2001 roku odbyłem staż naukowy w Zakładzie Stopów Metali Nieżelaznych Instytutu Odlewnictwa w Krakowie pod opieką prof. dr hab. inż. Jerzego Sobczaka. Podczas stażu zapoznałem się z metodami wytwarzania materiałów kompozytowych o osnowie stopów aluminium i magnezu technikami odlewniczymi (squeeze casting, infiltracja ciśnieniowa, odlewanie grawitacyjne), ich właściwościami i zjawiskami w nich zachodzącymi oraz potencjalnymi obszarami zastosowań.

Odbyłem ponadto staż zawodowy (IV-VI 2001r.) w Państwowych Zakładach Lotniczych w Świdniku. Celem stażu było zapoznanie się z właściwościami oraz technikami wytwarzania materiałów kompozytowych o osnowie polimerowej wzmocnianych włóknami, metodami kształtowania konstrukcji lotniczych oraz procesami obróbki cieplnej stopów metali lekkich.

W czerwcu 2004 przed Radą Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej obroniłem z wyróżnieniem pracę doktorską pt. „Analiza wpływu fazy ceramicznej i struktury osnowy na odporność korozyjną kompozytów Al-Si zbrojonych dyspersyjnie grafitem”, której promotorem była prof. dr hab. Barbara Surowska.



Uczestniczyłem czynnie w krajowych i międzynarodowych konferencjach naukowych prezentując własne oryginalne wyniki prac naukowo-badawczych: „Problemy metaloznawstwa w technice XXI wieku – Kielce 2000, „27<sup>th</sup> International Scientific Conference on Internal Combustion Engines KONES 2001” – Jastrzębia Góra, „XVIth Physical Metallurgy and Materials Science Conference on Advanced Materials & Technologies AMT’2001” – Jurata, „Kompozyty 2003-Teoria i praktyka” – Ustroń -Jaszowiec, „European Metallographic Conference and Exhibition EUROMET 2000” – Saarbrücken Germany” i „European Congress and Exhibition on Advanced Materials and Processes EUROMAT 2003” – Lozanna Szwajcaria .

Przed uzyskaniem stopnia doktora byłem współautorem 18 publikacji naukowych o zasięgu krajowym oraz międzynarodowym ściśle związanych z podjętą tematyką badań (Applied Surface Science, Journal of Optoelectronics and Advanced Materials, Practicall Metallography, Journal of Kones, Inżynieria Materiałowa, Kompozyty, Inżynieria Biomateriałów, Eksploatacja i Niezawodność).

## **5.2. Działalność naukowa po uzyskaniu stopnia doktora**

Po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych 1 grudnia 2004 roku zostałem mianowany na stanowisko adiunkta w Katedrze Inżynierii Materiałowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej. Aktywnie uczestniczę w działalności naukowo-badawczej, dydaktycznej i organizacyjnej na rzecz Wydziału i Uczelni.

Moja działalność naukowo-badawcza w dalszym ciągu koncentrowała się w obszarze materiałów kompozytowych. Ponadto kontynuowałem działalność naukową w zakresie materiałów do zastosowań w medycynie.

Podjęta tematyka badań w zakresie biomateriałów wynikała z przeprowadzonych badań własnych oraz współpracowników na podstawie których stwierdzono, że postęp w podwyższaniu właściwości mechanicznych i biologicznych można osiągnąć przez zastosowanie układów wielowarstwowych, wytwarzanych na powierzchni metalu nie tylko przez utlenianie anodowe ale również metodami jarzeniowymi, metodą zol-żel lub elektroforezy. Podstawowym celem badań było ukształtowanie warstwy wierzchniej na podłożach metalowych biomateriałów tytanowych przez wytworzenie układu wielowarstwowego złożonego: z wewnętrznej warstwy ceramicznej wykonanej metodą zol-żel (krzemionkowo-tytanowej) lub warstwy wykonanej techniką azotowania jarzeniowego oraz warstwy zewnętrznej hydroksyapatytu wytworzonej metodą elektroforezy (do zastosowań na implanty kostne i stawowe). Wiązało się to opracowaniem podstaw

technologii wytwarzania układów warstwowych, identyfikacją struktury i morfologii warstw pośrednich oraz charakteru ich oddziaływania z metalicznym podłożem, opisem reakcji zachodzących na granicy fazowej metal – warstwa pośrednia, określeniem właściwości mechanicznych wytworzonych układów metodą hybrydową (na zużycie przez tarcie) oraz reakcji *in vitro* warstwy pośredniej i HA podczas badań procesów korozji. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że układy hybrydowe z wytworzonymi warstwami bioceramicznymi  $TiN+Ti_2N+\alpha Ti(N)$ ,  $SiO_2-TiO_2$  i HA na materiale bazowym charakteryzują się wysoką odpornością korozyjną oraz korzystnym zespołem właściwości użytkowych stawianym implantom medycznym. Badania trwałości warstw wykazały, że układ hybrydowy  $TiN+Ti_2N+\alpha Ti(N)-(SiO_2-TiO_2)$  stanowi korzystne rozwiązanie z punktu widzenia zastosowania jako warstwa pośrednia pod hydroksyapatyt (wysoka twardość i trwałość w SBF przy udowodnionej dobrej kompatybilności z HA) [zał. 3 pkt. IIE poz. pub. 44,47,48,57,58,61,62]. Badania *in vitro* oraz badania biomimetyczne wskazują, że zastosowane  $SiO_2-TiO_2$  jako warstwy zwiększającej stabilność połączenia pomiędzy tytanem a warstwą hydroksyapatytu ograniczają ryzyko adhezji bakterii (*S. epidermidis*) i powstawania biofilmu bakteryjnego [zał. 3 pkt. IIA poz. 30, pkt. IIE pub. poz. 52,55]. Kompozyty takie są zatem wysoce obiecujące jako nowe udoskonalone układy do tworzenia implantów ortopedycznych o znaczących właściwościach hamujących wzrost bakterii. Badania realizowano w ramach projektu badawczego 3 T08C 054 30 pt: „Kształtowanie ceramicznych warstw kompozytowych na stopach tytanu metodą hybrydową do zastosowań medycznych” finansowanego przez MNiSW w latach 2006-2009 (kierownik projektu prof. Barbara Surowska). W projekcie udział brały zespoły naukowe z Akademii Górniczo-Hutniczej, Politechniki Warszawskiej, a także Zakładu Biochemii i Biotechnologii Wydziału Farmaceutycznego Uniwersytetu Medycznego w Lublinie.

Kolejny etap mojej pracy naukowo-badawczej w zakresie biomateriałów i kompozytów stanowiły badania, których celem było opracowanie laboratoryjnej metody badań oraz analiza charakterystyki procesu degradacji czynnościowej wypełnień kompozytowych w zębach leczonych zachowawczo, a także określenie kryteriów ilościowych zużycia krytycznego układu wypełnienie kompozytowe – system wiążący – tkanka twarda zęba.

Podjęcie tematu badań podyktowane było istnieniem poważnych problemów klinicznych w wyniku uszkodzenia wypełnienia kompozytowego, w szczególności na powierzchni rozdziału tkanka zęba – wypełnienie (szczelina brzeżna), prowadzących do ograniczenia

funkcji użytkowych, a w końcowym efekcie do degradacji układu wypełnienie - zęb. Prace naukowo-badawcze obejmowały badania wybranych właściwości fizykochemicznych, mechanicznych materiału wypełnień oraz układu wypełnienie kompozytowe - zęb, a także analizę mikrostruktury, morfologii oraz topografii układu [zał. 3 pkt. IIA poz. 29,31, pkt IIE pub. poz. 38,50,53,56,59]. Przeprowadzono również analizy z wykorzystaniem technik numerycznych, w tym analizy stopnia wyężenia twardych tkanek zębów pod kątem oceny ryzyka niepowodzenia leczenia stomatologicznego w wyniku uszkodzenia wykonanego wypełnienia oraz rozkłady temperatur w poszczególnych elementach składowych struktury zęba [zał. 3 pkt. IIA poz. 28, pkt IIE pub. poz. 36]. Istotnymi badaniami była analiza zmęczeniowa układu wypełnienie kompozytowe/zęb w wyniku oddziaływań mechanicznych i oddziaływań cieplnych. Na podstawie przeprowadzonych badań stwierdzono, że szczelność brzeżna oraz trwałość powierzchni rozdziału wypełnienia zależne są od wielu czynników, m.in. od składu materiału wypełnienia i jego właściwości oraz od właściwości systemu wiążącego, od oddziaływań między materiałami, od właściwości tkanek zęba i od środowiska jamy ustnej. Badania potwierdziły przydatność prototypowego symulatora żucia, uwzględniającego złożony stan naprężeń, wpływ środowiska oraz stan obciążeń cieplnych do przyspieszonego badania trwałości stomatologicznych wypełnień kompozytowych. Przeprowadzone badania mogą stanowić istotny wkład do rozwoju stomatologii zachowawczej w zakresie nowych możliwości charakterystyki zaawansowanych wypełnień kompozytowych, diagnostyki stanu wypełnienia i oceny jego trwałości oraz doskonalenia procedur stomatologicznych. Badania realizowano w ramach projektu badawczego N N518 326035 w latach 2008-2011 pt: „Ocena i prognozowanie degradacji czynnościowej kompozytowych wypełnień stomatologicznych z wykorzystaniem symulatora żucia” którego byłem kierownikiem. Badania prowadzono wspólnie z zespołem naukowców z Katedry i Zakładu Stomatologii Zachowawczej I Wydziału Lekarskiego z Oddziałem Stomatologicznym Uniwersytetu Medycznego w Lublinie.

Główny obszar moich zainteresowań i prac naukowych od około 2006 roku stanowią materiały kompozytowe wzmocnione włóknami ciągłymi, w tym szczególnie laminaty metalowo-włókniste. Prace badawczo-rozwojowe realizuję w oparciu o badania własne oraz projekty badawcze finansowane przez MNiSW, NCBR, NCN oraz finansowane ze środków Unii Europejskiej. Realizowana przeze mnie tematyka badawcza wynika również z wieloletniej współpracy z przedsiębiorstwami sektora przemysłu lotniczego: PZL Świdnik

i PZL Mielec oraz zapotrzebowania na nowoczesne materiały i technologie materiałowe [zał. 3 pkt. IIJ].

Należy podkreślić, że źródłem istotnych inicjatyw, prac naukowo-badawczych, a także rozwojowych był projekt kluczowy POIG.01.01.02-00-015/08-00 – Nowoczesne technologie materiałowe stosowane w przemyśle lotniczym (2007–2015), w tym zadanie badawcze ZB9 – Metaliczne materiały kompozytowe w aplikacjach lotniczych (w tym materiały typu Glare). Projekt był realizowany przez Centrum Zaawansowanych Technologii „Aeronet – Dolina Lotnicza, działającego na podstawie umowy podpisanej w dniu 22 stycznia 2004r. jako konsorcjum składające się z 11 jednostek naukowych oraz reprezentującego przemysł Stowarzyszenia Grupy Producentów Przemysłu Lotniczego "Dolina Lotnicza" (SGPPL). Strategicznym celem projektu było ukierunkowanie realizowanych w kraju prac badawczych w branży lotniczej na dziedziny, które mają lub będą miały decydujący wpływ na poprawę pozycji konkurencyjnej polskiej gospodarki, budowę gospodarki opartej na wiedzy. W ramach projektu realizowanych było 15 głównych zadań badawczych, nakierowanych na najbardziej zaawansowane i dynamicznie rozwijające się dziedziny współczesnych procesów inżynierii materiałowej, inżynierii powierzchni oraz nowoczesnych technik wytwarzania w przemyśle lotniczym.

Współrealizacja powyższego projektu pozwoliła na stworzenie w Katedrze Inżynierii Materiałowej Politechniki Lubelskiej Laboratorium Wytwarzania Struktur Kompozytowych metodą autoklawową, którego byłem głównym współtwórcą. Było to pierwsze w kraju tego typu laboratorium na uczelni technicznej. Przyczyniło się to również do utworzenia grupy badawczej (w której jestem liderem) składającej się z doświadczonych pracowników oraz młodej kadry, która podjęła prace naukowo-badawcze w obszarze materiałów kompozytowych. Realizacja poszczególnych zadań badawczych oraz zakup i budowa specjalistycznych stanowisk do wytwarzania i badań materiałów kompozytowych pozwoliła na bardzo znaczny rozwój naukowy zespołu oraz wzmożenie prac naukowo-badawczych w zakresie wysokozaawansowanych materiałów kompozytowych w tym laminatów metalowo-włóknistych. Odzwierciedleniem tego faktu są liczne publikacje naukowe w renomowanych czasopismach międzynarodowych [zał. 3 pkt. IIA] oraz realizacja 3 prac doktorskich w tematyce laminatów metalowo-włóknistych (kolejna na ukończeniu). W ramach projektu kluczowego opracowano ponadto szereg zgłoszeń patentowych oraz rozwiązań innowacyjnych, gotowych do komercjalizacji, w zakresie laminatów metalowo-włóknistych oraz technologii ich wytwarzania [zał. 3 pkt. IIC].

W obszarze klasycznych materiałów kompozytowych wzmocnionych włóknami prowadziłem badania nad kształtowaniem struktury oraz technologii wytwarzania cienkościennych elementów kompozytowych o osnowie epoksydowej wzmocnionych włóknami szklanymi. Prace naukowo-badawcze realizowałem we współpracy z zespołem prof. dr hab. inż. Tomasza Kubiaka (Katedra Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji, Wydział Mechaniczny Politechnika Łódzka) w ramach projektu badawczego UMO-2011/03/B/ST8/06447 pt: „Badania doświadczalne i numeryczne nieliniowej stateczności cienkościennych konstrukcji kompozytowych” finansowanego przez NCN w latach 2012-2015. Badania dotyczyły kształtowania optymalnej struktury cienkościennych profili kompozytowych (profilu ceowych oraz profili zamkniętych) poddanych zginaniu oraz ścisaniu. Istotnym aspektem badawczym była charakterystyka procesu i mechanizmów zniszczenia profili w zależności od sposobu obciążenia i kształtowania kompozytu (sekwencja warstw), którą prowadzono w oparciu o analizy mikrostrukturalne, analizy z wykorzystaniem skaningowej mikroskopii elektronowej oraz badania nieniszczące (defektoskopia ultradźwiękowa, mikrotomografia komputerowa). Zrealizowane badania pozwoliły na ocenę właściwości materiałów kompozytowych, charakterystyki zniszczenia i docelowo opracowanie adekwatnych modeli numerycznych [zał. 3 pkt. IIA poz. 4,9,13,21].

W ramach działalności badawczej kontynuuję również badania w zakresie kompozytów do zastosowań medycznych, szczególnie w dziedzinie ortopedii. Prace naukowo-badawcze dotyczą głównie kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknami węglowymi i realizowane są przy współpracy z firmą Medgal Sp. z o.o. (umowa ramowa o współpracy pomiędzy PL a Medgal z dnia 04.05.2015), której celem jest m.in. realizacja wspólnych przedsięwzięć o charakterze projektowym, badawczym, wdrożeniowym, edukacyjnym, w zakresie materiałów kompozytowych i technologii kompozytowych. W ramach współpracy prowadzono badania obejmujące wykonywanie eksperymentalnych elementów kompozytowych o osnowie polimerowej wzmocnionych włóknami węglowymi wraz z oceną parametrów technologicznych procesu ich wytwarzania, analizy mikrostrukturalne oraz badania nieniszczące z wykorzystaniem defektoskopii ultradźwiękowej i mikrotomografii komputerowej. Docelowo w ramach prowadzonych prac naukowo-badawczych opracowałem na potrzeby firmy Medgal kryteria i procedury kwalifikacji wyrobów wstępnych wytwarzanych z kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknami węglowymi do zastosowań na elementy instrumentarium medycznego/ortopedycznego. Jest to ściśle związane z opracowaniem procesu

technologicznego wytwarzania wysokojakościowych materiałów kompozytowych dla medycyny, wolnych od wad, zapewniających osiągnięcie odpowiednich właściwości użytkowych, jednorodności struktury materiału i odporności środowiskowej. Prace badawcze realizowane były w ramach umów dwustronnych. Ponadto w ramach prowadzonej współpracy badawczo-rozwojowej byłem współautorem opracowania koncepcji i uruchomienia stanowiska technologicznego (stanowisko autoklawu wraz z oprzyrządowaniem) do wytwarzania materiałów kompozytowych metodą autoklawową do zastosowań medycznych. Ponadto opracowałem procedury procesów wytwarzania wyrobów wstępnych na elementy instrumentarium z kompozytów polimerowych wzmocnionych włóknami węglowymi (procedury zostały wdrożone w firmie Medgal) [zał. 3 pkt. IIB poz. 2,4 pkt. IIIM poz. 1,2]. Współpraca naukowo-badawcza z firmą Medgal w zakresie technologii kompozytowych jest w dalszym ciągu kontynuowana.

W obszarze laminatów metalowo-włóknistych podjąłem współpracę naukową z Katedrą Wytrzymałości Materiałów i Konstrukcji (Politechnika Łódzka, Wydział Mechaniczny) dotyczącą badań eksperymentalnych nad zachowaniem kompozytowych konstrukcji cienkościennych o ścianach płaskich poddanych obciążeniom statycznym (osiowemu ścisnaniu oraz czystemu zginaniu) [zał. 3 pkt. IIA poz. 6,18, pkt. IIE pub. poz. 4]. Obejmowały one badania stanów krytycznych, podkrytycznych i fazę zniszczenia profili cienkościennych wykonanych z laminatów FML typu: aluminium – kompozyt epoksydowo szklany. Badania realizowano w ramach projektu badawczego pt. „Analiza porównawcza stateczności profili cienkościennych z materiałów hybrydowych typu FML” finansowanego przez NCN (UMO-2012/07/B/ST8/04093) w latach 2013-2016 koordynowanego przez Politechnikę Łódzką (kierownik projektu dr hab. inż. Radosław Mania). Istotnym aspektem badań było opracowanie technologii kształtowania laminatów FML o skomplikowanych kształtach i różnych sekwencjach warstw kompozytowych typu ceownik, profil Z oraz profil typu omega. Istotne było również kształtowanie prawidłowej struktury laminatów, dobór sposobów przygotowania powierzchni metalu dla uzyskania odpowiedniego połączenia metal-kompozyt oraz charakterystyka złożonych mechanizmów zniszczenia laminatów FML. Przeprowadzone badania posłużyły do weryfikacji i modyfikacji istniejących technik modelowych i opracowania modeli numerycznych, co jest szczególnie ważne ze względu na stosowanie tych materiałów w konstrukcjach o wysokim poziomie bezpieczeństwa.

Znaczącymi pracami badawczymi, również o charakterze technologicznym oraz aplikacyjnym jest realizacja badań w ramach projektu "Block Structures - mechanical joining innovations to replace conventional fasteners in aerostructures" (PZL Mielec, program INNOLOT I, 2013-2018), współfinansowany przez NCBR (koordynator prof. dr hab. inż. Tomasz Sadowski, Politechnika Lubelska). Celem prowadzonych prac badawczo-rozwojowych jest opracowanie innowacyjnych w porównaniu do istniejących konwencjonalnych rozwiązań (klejenie, nitowanie) połączeń rozłącznych i nierozłącznych w różnych konfiguracjach materiałowych do zastosowań w skomplikowanych strukturach lotniczych - półskorupowych częściach o cienkich ściankach bez utraty funkcjonalności i wydajności, za pomocą jednoetapowego podejścia montażowego nazywanego Block Structures. Prace naukowo-badawcze obejmowały szereg aspektów m.in. (1) wybór i optymalizację rozwiązań materiałowych z uwzględnieniem parametrów technologicznych wynikających z procesu wytwarzania, (2) opracowanie innowacyjnych koncepcji geometrycznych i optymalizację łączonych elementów oraz kolejnych operacji technologicznych, tak by spełniały wymogi wytrzymałości oraz bezpieczeństwa konstrukcji lotniczych, (3) analizy numeryczne opracowanych doświadczalnych „struktur blokowych” z uwzględnieniem degradacji połączeń (do zniszczenia) i doświadczalną weryfikacją wyników, (4) opracowanie procesu wytwarzania oraz wykonanie eksperymentalnych paneli kompozytowych. Prowadzone przeze mnie badania dotyczyły głównie połączeń materiałowych typu metal-kompozyt (aluminium, kompozyt polimerowy wzmocniony włóknami szklanymi i węglowymi) oraz połączeń z wykorzystaniem laminatów metalowo-włóknistych. Rezultatem prac badawczo-rozwojowych jest opracowanie optymalnych kryteriów i wytycznych definiowania parametrów technicznych, w tym parametrów systemowych opisujących geometrię połączeń i właściwości fizyko-mechanicznych łączonych materiałów do projektowania połączeń typu „struktury blokowe” oraz opracowanie technologii ich wytwarzania. Docelowym efektem było wytworzenie demonstratorów technologii - kompozytowego panelu podłogi samolotu M-28 z zaprojektowanymi innowacyjnymi połączeniami rozłącznymi [zał. 3 pkt. IIF poz. 9-26].

W ramach prowadzonych badań własnych prowadzę również badania w zakresie połączeń adhezyjnych do zastosowań w odpowiedzialnych lotniczych konstrukcjach kompozytowych. Badania realizowane są w ramach umowy UU-17-18-00019-1 (2017-2019) pomiędzy Politechniką Lubelską a PZL Mielec w ramach projektu „Badania i rozwój nowych, innowacyjnych metod projektowania i wytwarzania kompozytowych lotniczych

struktur pierwszorzędowych” (Programu Sektorowy „INNOLOT II - innowacyjne lotnictwo). Prace badawczo-rozwojowe dotyczą opracowania technologii klejenia pierwszorzędowych lotniczych struktur kompozytowych z uwzględnieniem połączeń co-curing, co-bonding i secondary bonding w technologii pozaautoklawowej. Obejmują one opracowanie połączeń dla różnorodnych kombinacji materiałowych: metal-metal, metal-kompozyt oraz kompozyt-kompozyt. Prace naukowo-badawcze związane są głównie z opracowaniem metodyki procesu klejenia pozaautoklawowego oraz analizą powierzchni metalu i kompozytu dla różnych sposobów przygotowania powierzchni (obróbki mechaniczne, chemiczne i elektrochemiczne). Ponadto w ramach prac naukowo-badawczych opracowywano metodykę oraz przeprowadzono badania jakości połączeń klejowych (badania nieniszczące: defektoskopia ultradźwiękowa, termografia, mikrotomografia komputerowa). Istotnym aspektem prac są badania wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej połączeń w zależności od warunków temperatury i oddziaływań warunków środowiskowych.

Wiodącym obszarem moich prac naukowo-badawczych są laminaty metalowo-włókniste, w tym powierzchnia rozdziału metal-kompozyt.

W zakresie kształtowania laminatów metalowo-włóknistych prowadzę wspólnie z współpracownikami (pod kierunkiem prof. Barbary Surowskiej) szerokie i intensywne badania. Obejmują one wytwarzanie FML techniką autoklawową, metody przygotowania powierzchni metalu, badania właściwości wytrzymałościowych statycznych i zmęczeniowych, w tym odporności na obciążenia dynamiczne. Ponadto prowadzę prace w zakresie badań nieniszczących, wpływu czynników środowiskowych m.in. wilgotności, podwyższonych i obniżonych temperatur oraz odporności korozyjnej. Jednym z moich głównych obszarów badawczych jest również charakterystyka procesów zniszczenia.

Jedną z najbardziej charakterystycznych cech FML jest ich wysoka wytrzymałość zmęczeniowa. W zakresie wytrzymałości zmęczeniowej prowadzone przeze mnie i współpracowników badania dotyczą w szczególności laminatów typu aluminium-kompozyt epoksydowo-węglowy, których celem jest wyznaczenie charakterystyk wytrzymałości zmęczeniowej, zidentyfikowanie i analiza mechanizmów zniszczenia oraz określenie możliwości prognozowania wytrzymałości zmęczeniowej laminatów. Na podstawie przeprowadzonych badań opracowano algorytm (metodologię prognozowania) oraz modele fenomenologiczno-numeryczne przewidywania charakterystyk wytrzymałości statycznej



i wytrzymałości zmęczeniowej S-N (naprężenie-liczba cykli) laminatu metalowo-włóknistego bazując na wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej jego komponentów (włączając naprężenia cieplne laminatu) [zał. 3 pkt. IIA poz. 3,5,12]. Może to mieć istotne znaczenie w procesie projektowania złożonych materiałów i kształtowaniu wytrzymałości zmęczeniowej laminatów metalowo-włóknistych przyczyniając się do zwiększenia poziomu bezpieczeństwa statków powietrznych.

Prowadzę również badania naukowe mające na celu określenie wpływu warunków środowiskowych (oddziaływania wilgoci), oddziaływania obniżonej i podwyższonej temperatury na właściwości wytrzymałościowe i strukturę laminatów metalowo-włóknistych oraz badania odporności korozyjnej. Przeprowadzone badania potwierdzają, że absorpcja wilgoci w przypadku FML jest ograniczona w porównaniu z klasycznymi kompozytami polimerowymi, ze względu na barierę jaką stanowią metalowe warstwy zewnętrzne. Jednakże, długotrwałe oddziaływanie czynników środowiskowych (podwyższonej temperatury oraz wilgoci) może wpływać na obniżenie właściwości wytrzymałościowych laminatów, przy czym dla laminatów metalowo-włóknistych jest ona relatywnie niższa [zał. 3 pkt. IIA poz. 1, pkt. IIE rozdz. mon. poz.1, pub. poz. 27].

Pomimo wysokiej odporności korozyjnej zewnętrznych warstw metalowych FML i działania warstw kompozytowych jako bariery dla procesów korozji, wprowadzenie włókien węglowych może prowadzić do zwiększenia wrażliwości na korozję (oddziaływanie galwaniczne na powierzchni rozdziału metal-kompozyt) [zał. 3 pkt. IIE rozdz. mon. poz. 1, mat. konf. poz. 9]. Skłoniło to mnie do prowadzenia wraz ze współpracownikami intensywnych badań nad kształtowaniem powierzchni rozdziału metal-kompozyt w FML z włóknami węglowymi w aspekcie odporności korozyjnej. Badania mają na celu opracowanie międzywarstwy (o cechach izolatora) dla podwyższenia odporności korozyjnej oraz zniwelowania degradacji laminatów metalowo-włóknistych w warunkach wilgotnego środowiska o zmiennej temperaturze. W oparciu o wstępne wyniki badań eksperymentalnych postawione hipotezy badawcze zakładają możliwość uzyskania bariery potencjału na granicy aluminium-kompozyt wzmocniony włóknem węglowym blokującej proces korozji galwanicznej poprzez wprowadzenie warstwy kompozytowej o wzmocnieniu szklanym lub warstwy polimerowej pośredniej o cechach izolatora. Prowadzone aktualnie badania pozwolą na określenie wzajemnego oddziaływania poszczególnych komponentów oraz charakterystyki zaawansowanych, innowacyjnych materiałów jakimi są FML. Może to pozwolić na powiązanie aspektów inżynierii powierzchni z kinetyką procesu korozji, efektami

w strukturze materiału oraz zmianą tych właściwości, które są mierzalnym wskaźnikiem intensywności procesu degradacji materiału złożonego. Badania prowadzone są w ramach projektu badawczego finansowanego przez NCN (UMO 2014/15/B/ST8/03447; 2015-2018) pt. „Opracowanie warstwy pośredniej w laminacie metalowo-włóknistym w aspekcie odporności na korozję galwaniczną”, którego kierownikiem jest prof. dr hab. Barbara Surowska.

W obszarze laminatów metalowo-włóknistych prowadzę badania związane z technologią wytwarzania FML metodą autoklawową [zał. 3 pkt. IIA poz. 6,21, pkt. IIB poz. 1,3, pkt. IIE rozdz. mon. poz. 4, pub. poz. 4,21,32,43]. Prace badawczo-rozwojowe mają na celu kształtowanie laminatów charakteryzujących się najwyższą jakością oraz odpowiednimi właściwościami w aspekcie ich potencjalnych nowych zastosowań. Prace ukierunkowane są na wykorzystanie różnorodnych kombinacji warstw metalowych oraz międzywarstw kompozytowych, sposobów przygotowania powierzchni, doboru optymalnych parametrów procesu wytwarzania. Celem prowadzonych badań z punktu widzenia struktury laminatu jest dążenie do uzyskania laminatu o bardzo wysokiej jakości pod względem stopnia porowatości oraz odpowiedniej adhezji na powierzchni rozdziału metal-kompozyt. Prowadzone badania były podstawą do opracowania rozwiązań aplikacyjnych laminatów metalowo-włóknistych we wspomnianych powyżej projektach badawczych.

Kolejnymi bardzo istotnymi prowadzonymi przeze mnie pracami naukowo-badawczymi są badania dotyczące odporności na obciążenia dynamiczne klasycznych laminatów i laminatów metalowo-włóknistych oraz zagadnienia związane z procesem zniszczenia [m.in. zał. 3 pkt. IIA poz. 2,10,14,15,16,17,19,20,24, pkt. IIE rozdz. mon. poz. 3]. W tym zakresie prowadzę badania związane z analizą charakterystyk odpowiedzi laminatów z różnymi konfiguracjami warstw metalowych i międzywarstw kompozytowych na obciążenia dynamiczne przy obciążeniach o niskiej energii i niskiej prędkości (*low-velocity impact*), co pozwala na optymalizację laminatów metalowo-włóknistych pod kątem zwiększenia ich odporności na obciążenia dynamiczne. Prowadzone badania dostarczyły cennych informacji na temat mechanizmów zniszczenia struktury kompozytowej, który jest bardzo złożony, a krytyczną formę zniszczenia stanowią rozwarstwienia, w tym rozwarstwienia na powierzchni rozdziału metal-kompozyt. Zapoczątkowało to moje badania w zakresie kształtowania powierzchni rozdziału metal-kompozyt w laminatach metalowo-włóknistych, co znalazło odzwierciedlenie w autorskiej monografii.

W zakresie badań odporności na obciążenia dynamiczne na szczególną uwagę zasługują analizy zniszczenia laminatów metalowo-włóknistych na bazie aluminium i włókien węglowych w zakresie niskich energii uderzenia 1,5J-5J oraz badania eksperymentalne z wykorzystaniem oryginalnego stanowiska z systemem szybkich kamer [zał. 3 pkt. IIA poz. 10,19]. Pozwoliło to na dokonanie korelacji charakterystyki siła-czas ( $F-t$ ) ze zmianami zachodzącymi w laminacie metalowo-włóknistym w procesie obciążenia dynamicznego z niską prędkością. Wyznaczono reprezentatywne punkty i zakresy determinujące zmiany w strukturze laminatu pod kątem zniszczenia i charakterystycznych form jego degradacji. Pozwoliło to na jednoznaczną identyfikację oraz interpretację poszczególnych etapów inicjacji i propagacji zniszczenia laminatów. Zaproponowano również jednoznaczne kryterium które określa odporność na obciążenia dynamiczne laminatów metalowo-włóknistych.

W ramach badań własnych wraz ze współpracownikami prowadzę prace w zakresie zastosowania technik numerycznych w modelowaniu między innymi procesów zniszczenia klasycznych materiałów kompozytowych oraz laminatów metalowo-włóknistych w szczególności odporności na obciążenia dynamiczne z niską prędkością, odporności na rozwarstwienia w warunkach I i II sposobu pęknięcia oraz wytrzymałości statycznej i zmęczeniowej [zał. 3 pkt. IIA poz. 3,11,12,14,27,28 pkt. IIE pub. poz. 9, 41,42]. Prace mają na celu opracowanie adekwatnych modeli numerycznych przy zastosowaniu różnorodnych technik modelowania, uwzględniających między innymi oddziaływanie na powierzchni rozdziału pomiędzy poszczególnymi warstwami kompozytu, a także pomiędzy metalem a kompozytem.

Istotnym zagadnieniem w prowadzonych przeze mnie badaniach jest opracowanie skutecznych metod badania jakości laminatów metalowo-włóknistych z wykorzystaniem technik nieniszczących, w szczególności metod ultradźwiękowych [zał. 3 pkt. IIA poz. 2,6,10,16,19,26, pkt. IIB poz. 5, pkt. IIE rozdz. mon. poz. 3]. Na podstawie dotychczas prowadzonych badań stwierdzono, że najkorzystniejszą metodą badawczą dla FML jest technika ultradźwiękowa. W literaturze podkreślany jest niezwykle istotny problem trudności w prawidłowej identyfikacji i oszacowaniu obszaru zniszczenia laminatów metalowo-włóknistych przy zastosowaniu technik ultradźwiękowych, która wynika z hybrydowej budowy tych materiałów. Jedną z najbardziej rozwojowych nieniszczących metod badań dla laminatów metalowo-włóknistych może okazać się ultradźwiękowa wieloprzetwornikowa

technika przejścia (*Through Transmission Phased Array*, TTPA) w immersji wodnej. Metoda TTPA jest aktualnie intensywnie rozwijana w Katedrze Inżynierii Materiałowej Politechniki Lubelskiej, gdzie zostało zaprojektowane i wytworzone własne oryginalne (wspólnie z dr inż. P. Jakubczakiem), w pełni zautomatyzowane prototypowe stanowisko do tej metody stanowiące unikalny system w zakresie badań nieniszczących laminatów hybrydowych techniką wieloprzetwornikową.

Potwierdzeniem wysokiego poziomu prowadzonych przeze mnie i współpracowników badań w obszarze laminatów metalowo-włóknistych było zaproszenie przedstawicieli zespołu Katedry Inżynierii Materiałowej, jako zespołu rozpoznawalnego w zakresie badań w obszarze laminatów metalowo-włóknistych, do Delft University of Technology (Holandia) i uczestnictwo w FML Outlook w 2017 roku [zał. 3 pkt. IIIB poz. 1,2,3]. W efekcie została podjęta współpraca naukowa w zakresie badań nad II generacją laminatów metalowo-włóknistych obejmująca badania nieniszczące (wykorzystanie stanowiska TTPA) doświadczalnych laminatów metalowo-włóknistych w procesie automatycznego wytwarzania. Planowana jest również intensywna współpraca naukowa w zakresie innych tematów badawczych dotyczących laminatów metalowo-włóknistych.

W ramach swojej pracy naukowo-badawczej uczestniczyłem czynnie w 37 zagranicznych i krajowych konferencjach naukowych, prezentując własne wyniki badań [zał. 3 pkt. IIL, pkt. IIIB].

Jestem współautorem 8 zgłoszeń patentowych z zakresu tematyki związanej z laminatami metalowo-włóknistymi oraz współautorem licznych opracowań stanowiących dokumentację prac badawczych oraz wykonanych ekspertyz [zał. 3 pkt. IIC, pkt. IIF].

W ramach swojej pracy naukowo-badawczej uczestniczyłem w realizacji 16 projektów badawczych finansowanych przez MNiSW, NCN, NCBR a także projektu „Centre of excellence for modern composites applied in aerospace and surface transport” w ramach 7<sup>th</sup> Framework Programme of European Union [zał. 3 pkt. IIJ].

Za prowadzoną działalność naukową otrzymałem 6-krotnie nagrodę JM Rektora Politechniki Lubelskiej w latach 2005-2016 [zał. 3 pkt. IIK].

Odbyłem 3 staże naukowe w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych i akademickich (Instytut Odlewnictwa w Krakowie; Technical University Dresden, Germany; Aalborg University, Denmark), ściśle związane z tematyką realizowanych przeze mnie prac naukowo-badawczych [zał. 3 pkt. IIIL].

W ramach swojej działalności naukowej byłem 2-krotnie opiekunem naukowym prac doktorskich, w charakterze promotora pomocniczego, w tematyce badań dotyczącej laminatów metalowo-włóknistych [zał. 3 pkt. IIIK].

Aktywnie uczestniczę w procesie recenzowania publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych. Dotychczas zrecenzowałem łącznie 30 publikacji dla 15 czasopism międzynarodowych, m.in.: Composite Structures (JCR, IF 3,858), Composites Part B: Engineering (JCR, IF 4,727) Composites Part A: Applied Science and Manufacturing (JCR, IF 4,075), Journal of Composite Materials (JCR, IF 1,494), International Journal of Fatigue (JCR, IF 2,899) Meccanica (JCR, IF 2,196), Materials Letters (JCR, IF 2,572) Applied Surface Science (JCR, IF 3,387) [zał. 3 pkt. IIIP].

Mój dotychczasowy dorobek naukowy obejmuje łącznie 143 prac, z czego 125 po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych. 124 publikacje, w tym 105 po doktoracie, zostało opublikowanych w recenzowanych czasopismach zagranicznych i krajowych, z czego 40 w czasopismach indeksowanych w bazie Web of Science.

Dla 34 publikacji z listy JCR sumaryczny IF wynosi 64,979. Łączna liczba cytowań według bazy Web of Science wynosi 318, bez autocytowań: 227. Mój indeks Hirscha według WoS wynosi 11.

Łączna liczba punktów MNiSW, zgodna z rokiem opublikowania, wynosi 1680.

## **6. Działalność dydaktyczna**

Równolegle do działalności naukowej prowadzę działalność dydaktyczną adresowaną głównie do słuchaczy studiujących w trybie stacjonarnym zarówno dla I (inżynierskie) jak i II (magisterskie) stopnia kształcenia.

W pierwszych latach pracy na stanowisku asystenta realizowałem zajęcia laboratoryjne na kierunkach mechanika i budowa maszyn, zarządzanie i marketing, wychowanie techniczne, edukacja techniczno-informatyczna z przedmiotów takich jak: inżynieria materiałowa, inżynieria materiałów konstrukcyjnych, odlewnictwo, nauka o materiałach, technologia i urządzenia obróbki cieplno-chemicznej, spajalnictwo i metalurgia, materiał a środowisko, inżynieria materiałowa II, nowoczesne materiały konstrukcyjne [zał.3 pkt. IIII poz. 5].

Jestem współtwórcą opracowania założeń, siatek godzin oraz uruchomienia kierunku studiów inżynieria materiałowa I i II stopnia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej (uruchomienie studiów I stopnia 2005/2006, II stopnia 2009/2010).

Ponadto, jestem członkiem minimum kadrowego na kierunku studiów inżynieria materiałowa - I i II stopień kształcenia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej (od 2005) oraz członkiem Rady Programowej kierunku studiów inżynieria materiałowa (od 2013) [zał. 3 pkt. IIII poz. 2,3].

W 2012 roku byłem członkiem zespołu opracowującego Krajowe Ramy Kwalifikacji na kierunku studiów inżynieria materiałowa (Wydział Mechaniczny, Politechnika Lubelska).

W swojej działalności dydaktycznej po uzyskaniu stopnia doktora nauk technicznych (na stanowisku adiunkta) prowadziłem lub prowadzę wykłady autorskie głównie na kierunku inżynieria materiałowa, z przedmiotów takich jak: materiały kompozytowe, technologia wytwarzania struktur lotniczych, kompozyty funkcjonalne, inżynieria kompozytów, metody badań i fraktografia struktur kompozytowych, nieniszczące metody badań materiałów kompozytowych, fraktografia struktur kompozytowych oraz wykłady na kierunku mechanika i budowa maszyn, a także zarządzanie i inżynieria produkcji z przedmiotów: inżynieria materiałowa, inżynieria materiałów kompozytowych, materiał a środowisko [zał. 3 pkt. IIII poz. 6].

Prowadzone przeze mnie zajęcia laboratoryjne obejmowały lub obejmują powyższe przedmioty oraz dodatkowo: inżynierię materiałową II, nowoczesne materiały konstrukcyjne, biomateriały, inżynierię biomateriałów.

Ponadto systematycznie prowadzę seminaria dyplomowe na kierunku studiów inżynieria materiałowa na I i II stopniu kształcenia.

W latach 2010-2013 moja działalność dydaktyczna związana była również z prowadzeniem procesu dydaktycznego na Wydziale Transportu i Informatyki Wyższej Szkoły Ekonomii i Innowacji w Lublinie i obejmowała prowadzenie wykładów z przedmiotów na I stopniu kształcenia: nauka o materiałach (mechanika i budowa maszyn, transport), ergonomia i BHP (mechanika i budowa maszyn, transport, informatyka) oraz prowadzeniem ćwiczeń/laboratoriów z przedmiotów: nauka o materiałach (mechanika i budowa maszyn, transport), korozja i ochrona przed korozją i technologie wytwarzania (mechanika i budowa maszyn) [zał. 3 pkt. IIII poz. 7].

Od 2010 roku systematycznie prowadzę proces dydaktyczny w języku angielskim dla studentów programu Erasmus (wykłady, laboratoria) na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej w zakresie przedmiotu composite materials. Prowadziłem również

zajęcia laboratoryjne z przedmiotów corrosion oraz biomaterials. W roku akademickim 2015/2016 prowadziłem ponadto wykłady oraz zajęcia laboratoryjne w języku angielskim z przedmiotu composites engineering na II stopniu kształcenia na kierunku studiów mechanika i budowa maszyn [zał. 3 pkt. IIII poz. 8,9].

W ramach prowadzonych zajęć dydaktycznych opracowałem przedmiotowe programy kształcenia - treści programowe w języku polskim i angielskim, programy ćwiczeń laboratoryjnych oraz materiały dydaktyczne, które stanowią mój autorski wkład do procesu dydaktycznego prowadzonego na wydziale [zał.3 pkt. IIII poz. 13].

Ponadto brałem udział w opracowaniu koncepcji i uruchomieniu stanowisk wykorzystywanych do realizacji zajęć dydaktycznych, m.in.: laboratorium wytwarzania struktur kompozytowych, stanowiska do badań nieniszczących (defektoskopia ultradźwiękowa, termografia, mikrotomografia komputerowa), stanowiska do badań wytrzymałościowych statycznych i zmęczeniowych.

W latach 2008 – 2015 byłem uczestnikiem 3 projektów o charakterze edukacyjnym w ramach Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki: „Podniesienie atrakcyjności usług edukacyjnych poprzez uruchomienie i rozwój kształcenia na kierunku inżynieria materiałowa, „Inżynier z gwarancją jakości – dostosowanie oferty Politechniki Lubelskiej do wymagań europejskiego rynku pracy” oraz „Studiuj z pasją - zamawianie kształcenia na kierunku inżynieria materiałowa na Politechnice Lubelskiej”, w ramach których opracowałem przedmiotowe programy kształcenia - treści programowe, prowadziłem zajęcia wykładowe i laboratoryjne (studia stacjonarne i podyplomowe) głównie w zakresie materiałów kompozytowych, opracowałem pomoce dydaktyczne (rozdział w skrypcie, filmy dydaktyczne) oraz przeprowadziłem autorskie szkolenia specjalistyczno-techniczne na kierunku zamawianym Inżynieria Materiałowa (kompozyty dla lotnictwa, badania nieniszczące materiałów) [zał. 3 pkt. IIII poz. 10,11,12].

Moja działalność dydaktyczna obejmowała również członkostwo w komisji egzaminującej-dyplomującej (studia II stopnia) oraz członkostwo w zespole prowadzącym egzaminy wstępne na międzywydziałowy kierunek studiów „zarządzanie i inżynieria produkcji (Wydział Mechaniczny PL).

W roku akademickim 2001/2002 byłem opiekunem grupy studenckiej na kierunku studiów mechanika i budowa maszyn oraz opiekunem naukowym zespołu studentów kierunku inżynieria materiałowa w konkursie „Airbus Fly Your Ideas - innowacyjne pomysły na rozwój branży lotniczej przy redukcji negatywnego wpływu na środowisko naturalne” (zakwalifikowanie zespołu do II etapu – finałowego, 2011) [zał. 3 pkt. IIII poz. 15,18].

W latach 2005 – 2018 brałem czynny udział w działaniach marketingowych związanych z rekrutacją na kierunek inżynieria materiałowa (opracowanie materiałów reklamowych, dni otwarte PL, Lubelski Festiwal Nauki, prowadzenie spotkań, prezentacji oraz wykładów dla potencjalnych studentów - uczniów szkół średnich województwa lubelskiego) [zał.3 pkt. III I poz. 19].

W ramach opieki nad studentami w latach 2010-2018 byłem promotorem 33 prac inżynierskich oraz 24 prac magisterskich w latach 2007-2018. Wszystkie prace realizowane były na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej. Ponadto w latach 2010-2012 byłem promotorem 23 prac inżynierskich na Wydziale Transportu i Informatyki Wyższej Szkoły Ekonomii i Innowacji w Lublinie [zał. 3 pkt. IIIJ].

Za osiągnięcia w działalności dydaktycznej otrzymałem 3-krotnie Nagrodę Zespołową JM Rektora Politechniki Lubelskiej (2004-2007) [zał. 3 pkt. IIID poz. 2,3,4].

## **7. Działalność organizacyjna**

Równolegle do działalności naukowej oraz dydaktycznej prowadzę działalność organizacyjną.

W 2009 roku byłem sekretarzem komitetu organizacyjnego X Międzynarodowej Konferencji Naukowej „Tytan i jego stopy” (14-16 września 2009, Kazimierz Dolny), której organizatorem była Katedra Inżynierii Materiałowej (Wydział Mechaniczny Politechnika Lubelska) [zał. 3 pkt. IIIC].

Jestem członkiem 4 międzynarodowych i krajowych towarzystw naukowych oraz stowarzyszeń [zał. 3 pkt. IIIH]:

1. Polskie Towarzystwo Materiałoznawcze,
2. European Society for Composite Materials,
3. Polskie Towarzystwo Materiałów Kompozytowych,
4. Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Mechaników Polskich.

W 2008 roku byłem członkiem Komitetu Organizacyjnego Obchodów Rocznicowych 55-lecia Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej.

W latach 2012-2016 byłem członkiem wydziałowej komisji ds. finansów na Wydziale Mechanicznym Politechniki Lubelskiej.

W latach 2012-2013 byłem recenzentem projektów badawczych Narodowego Centrum Nauki w konkursach Preludium i Sonata [zał. 3 pkt. IIIO].



Byłem również elektorem z wyboru na kadencję 2012-2016 Wyboru Dziekana Wydziału Mechanicznego Politechniki Lubelskiej

Czynnie uczestniczę w pracach Centrum Zaawansowanych Technologii "AERONET - Dolina Lotnicza" jako członek grupy roboczej „Współczesne procesy inżynierii materiałowej i inżynierii powierzchni” [zał.3 pkt. III E, pkt. III Q poz. 1,2].

Ponadto byłem również współautorem opracowania i wykonawcą projektu dotyczącego modernizacji pomieszczeń dydaktyczno-laboratoryjnych Katedry Inżynierii Materiałowej (program „MILAB” - Modernizacja Infrastruktury Laboratoriów Badawczych) finansowanego przez Fundację na rzecz Nauki Polskiej (2003) oraz członkiem zespołu (z ramienia Katedry Inżynierii Materiałowej) realizującego projekt Centralne Laboratorium Wdrożeń Politechniki Lubelskiej (Program Operacyjny Rozwój Polski Wschodniej, 2013-2015) [zał. 3 pkt. III Q poz. 6,7,8].

Za działalność organizacyjną zostałem wyróżniony dyplomem JM Rektora Politechniki Lubelskiej w roku akademickim 2010/2011 [zał. 3 pkt. III D].

W ramach prowadzonej działalności organizacyjnej uczestniczyłem również w realizacji projektu celowego nr 3284/C.RSI-6/2003 pt: „Regionalna strategia innowacji dla województwa lubelskiego” współfinansowanego przez Urząd Marszałkowski w Lublinie oraz KBN (realizacja projektu w latach 2003-2004, główny wykonawca projektu Politechnika Lubelska). W projekcie byłem członkiem Grupy Zarządzającej, a celem realizacji projektu było wykonanie niezbędnych czynności zmierzających do opracowania strategii innowacji województwa lubelskiego [zał. 3 pkt. III Q poz. 9].

W 2005 roku przeprowadziłem prelekcję pt: ”Najlepsze praktyki w Unii Europejskiej oraz Polsce w zakresie wspierania innowacji i budowania Regionalnej Strategii Innowacyjności” oraz przeprowadziłem blok interaktywny nt: „Badania podaży i popytu na innowacje w regionie” w czasie konferencji „Najlepsze praktyki wspierania innowacji w regionie i Regionalna Strategia Innowacyjności” zorganizowanej w ramach realizacji projektu „Rozwój współpracy instytucjonalnej w zakresie wspierania przedsiębiorczości i innowacji na obszarach przygranicznych Polski, Białorusi i Ukrainy, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej (program Phare, Euroregion Bug) dla Europejskiego Centrum Integracji i Współpracy Samorządowej „Dom Europy” w Lublinie [zał. 3 pkt. III Q poz.10].

**8. Moje osiągnięcia zgodnie z wymogami Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 1 września 2011 roku w sprawie kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego (Dz.U. Nr 196, poz. 1165), zestawiono w poniższej tabeli:**

Publikacje naukowe w czasopismach znajdujące się w bazie Journal Citation Reports (JCR)	TAK	34
Zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne i technologiczne	TAK	5
Udzielone patenty, zgłoszenia patentowe międzynarodowe i krajowe	TAK	8
Monografie, publikacje naukowe w czasopismach międzynarodowych lub krajowych	TAK	90
Materiały konferencyjne	TAK	19
Opracowania zbiorowe, katalogi zbiorów, dokumentacja prac badawczych, ekspertyz, utworów i dzieł artystycznych	TAK	52
Sumaryczny impact factor według listy Journal Citation Report (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania	64,979	
Liczba cytowań publikacji według bazy Web of Science (WoS)	318	
Indeks Hirscha według bazy Web of Science (WoS)	11	
Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach	TAK	16
Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową lub artystyczną	TAK	6
Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach	TAK	14
Udział w programach europejskich lub krajowych	TAK	4
Udział w międzynarodowych lub krajowych konferencjach naukowych lub udział w komitetach organizacyjnych tych konferencji	TAK	37
Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż wymienione wyżej	TAK	4
Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	TAK	1
Kierowanie projektami realizowanymi we współpracy z naukowcami z innych ośrodków polskich i zagranicznych oraz we współpracy z przedsiębiorcami	TAK	1
Udział w komitetach redakcyjnych i radach naukowych czasopism	NIE	-
Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych	TAK	4
Osiągnięcia dydaktyczne i w zakresie popularyzacji nauki lub sztuki	TAK	
Opieka naukowa nad studentami i lekarzami w toku specjalizacji	TAK	80

Opieka naukowa nad doktorantami w charakterze opiekuna naukowego lub promotora pomocniczego	TAK	2
Staże w zagranicznych i krajowych ośrodkach naukowych, akademickich i przemysłowych	TAK	4
Wykonanie ekspertyzy lub innego opracowania na zamówienie	TAK	14
Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	NIE	-
Recenzowanie projektów międzynarodowych lub krajowych	TAK	11
Recenzowanie publikacji w czasopismach międzynarodowych i krajowych	TAK	30

Szczegółowy wykaz dorobku habilitacyjnego został umieszczony w załączniku 3 do wniosku o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego.

*Geneta Breuier*