

Autoreferat

28 marca 2019 r.

Imię i nazwisko

Ewa Korzeniewska

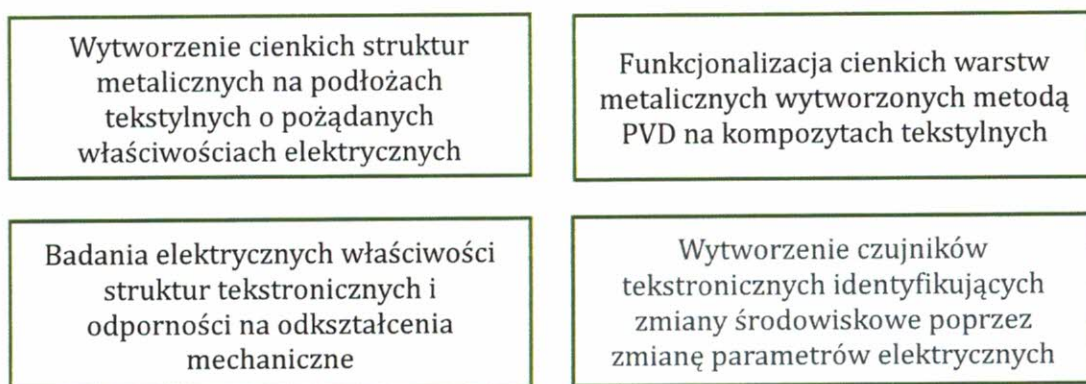
Tytuł osiągnięcia naukowego

Wytwarzanie struktur tekstronicznych o predefiniowanych właściwościach elektrycznych metodą fizycznego osadzania próżniowego.

Główny dorobek habilitacyjny związany jest z problematyką wytwarzania struktur elektroprzewodzących na podłożach tekstylnych oraz aplikacji powstałych systemów jako elementów obwodów elektrycznych. Jest to obszar wiedzy wykorzystywany w dynamicznie rozwijającej się dziedzinie jaką jest tekstronika, łączącej w sobie zagadnienia pochodzące głównie z elektrotechniki, elektroniki, metrologii ale zawierające także elementy informatyki, inżynierii materiałowej i włókiennictwa. Jednym z założeń tekstroniki jest wytwarzanie struktur zintegrowanych z przenośnymi urządzeniami i elementami elektronicznymi oraz z odzieżą i innymi tekstyliami. Tekstronika pozwala na poszerzenie tradycyjnej funkcji odzieży poprzez nadanie jej właściwości elektrycznych w postaci wrażliwości metrologicznej na czynniki zewnętrzne.

Struktury te traktowane jako urządzenia elektryczne znajdują zastosowanie w diagnostyce medycznej oraz terapii medycznej jako czujniki parametrów funkcji życiowych, w odzieży roboczej, sportowej, a także w odzieży dla dzieci i niemowląt. Wśród tekstronicznych produktów można wyróżnić elementy aktywne oraz pasywne. Aktywne reagują na czynniki zewnętrzne i do nich można zaliczyć różnego rodzaju czujniki tekstroniczne. Natomiast elementy pasywne stosowane są między innymi jako elementy grzewcze, w ochronie antystatycznej, jak również elementy obwodów elektrycznych, których zadaniem jest ekranowanie pola elektromagnetycznego.

Badanie elektrycznych właściwości struktur tekstronicznych wytworzonych metodą fizycznego osadzania próżniowego na podłożach tekstylnych zrealizowałam w aspektach zilustrowanych Rysunkiem 1.



Rysunek 1. Schematyczne przedstawienie głównego dorobku naukowego.

Mój dodatkowy dorobek habilitacyjny niezwiązany z tytułem przedstawionego osiągnięcia naukowego oparty jest na:

- badaniach wpływu impulsowego pola elektrycznego na zmianę własności winogron, jako surowca stosowanego w przemyśle winiarskim;
- badaniach wpływu oddziaływania wiązki laserowej na powierzchnię wybranych materiałów oraz właściwości hydrofobowe kauczuków.

1 Imię i nazwisko

Ewa Korzeniewska

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

1. Magister inżynier. Kierunek: *Elektrotechnika*. Specjalność: *Automatyka i metrologia elektryczna*. Wydział Elektrotechniki i Elektroniki (obecna nazwa Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki), Politechnika Łódzka, 1995.
2. Doktor nauk technicznych w dyscyplinie Elektrotechnika. Wydział Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Łódź, ul. Stefanowskiego 18/22, 25 września 2007. Tytuł rozprawy: *Model stanu krytycznego nadprzewodnika wysokotemperaturowego*, promotor prof. dr inż. Jan Leszczyński

3 Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

1. 20.02.1995 - 30.09.2007 - asystent w Zakładzie Materiałoznawstwa Instytutu Elektrotechniki Teoretycznej, Metrologii i Materiałoznawstwa na Wydziale Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Politechnika Łódzka.
2. 01.10.2007 do dziś: adiunkt w Zakładzie Inżynierii Materiałowej i Systemów Pomiarowych Instytutu Systemów Inżynierii Elektrycznej na Wydziale Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki, Politechnika Łódzka.

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.):

4.1 Tytuł osiągnięcia naukowego

Wytwarzanie struktur tekstronicznych o predefiniowanych właściwościach elektrycznych metodą fizycznego osadzania próżniowego.

4.2 Omówienie celu naukowego prac i osiągniętych wyników przedstawionych w postaci cyklu publikacji powiązanych tematycznie wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania.

A) Podsumowanie ogólnego rozwoju naukowego oraz dokonań habilitanta

Jeszcze przed ukończeniem studiów zostałam zatrudniona w Instytucie Podstaw Elektrotechniki Teoretycznej, Metrologii i Materiałoznawstwa Politechniki Łódzkiej na stanowisku technicznym, a tuż po uzyskaniu tytułu magistra inżyniera na stanowisku asystenta. Od początku swojej pracy na uczelni moje zainteresowania dotyczyły nowych technologii, przede wszystkim w zakresie zastosowania ich w inżynierii elektrycznej. W początkowym etapie swojego rozwoju naukowego moje prace dotyczyły nadprzewodnictwa i ukierunkowane były na modelowanie nadprzewodników wysokotemperaturowych. Prace teoretyczne i praktyczne związane z tą tematyką zaowocowały powstaniem doktoratu pt: *Model stanu krytycznego nadprzewodnika wysokotemperaturowego* obronionego na Wydziale Elektrotechniki i Elektroniki w Politechnice Łódzkiej. W ramach pracy opracowałam matematyczny model stanu krytycznego nadprzewodnika wysokotemperaturowego z uwzględnieniem granularnej budowy nadprzewodników masywnych. Ponadto przeprowadziłam badania symulacyjne opracowanego modelu i porównałam je z modelami klasycznymi. Wyniki uzyskiwane w drodze symulacji komputerowej przeprowadzanej w oparciu o zaproponowany model uzasadniały rozbieżności występujące pomiędzy eksperymentalnym wyznaczeniem gęstości prądu krytycznego nadprzewodnika, a rezultatami modelowania tradycyjnego w oparciu o model Beana. Na podstawie wyników uzyskiwanych z zastosowaniem zaproponowanego modelu udowodniłam, że możliwe jest wykrycie zależności magnetycznych i elektrycznych cech nadprzewodników wysokotemperaturowych od ich makrostruktury.

Tematyka mojej aktywności badawczo-naukowej po doktoracie związana była z opracowywaniem technologii umożliwiającej wytworzenie sensorów tekstronicznych. W szczególności dotyczyła:

- Wytworzenia cienkich ciągłych struktur metalicznych na podłożach tekstylnych o pożądanych właściwościach elektrycznych z wykorzystaniem procesu fizycznego osadzania próżniowego PVD. Prowadzone przeze mnie badania dotyczyły wyselekcjonowania tradycyjnych podłoży tekstylnych oraz tekstylnych

podłoży kompozytowych, na których możliwe jest otrzymanie warstw charakteryzujących się niską wartością rezystancji powierzchniowej. Wyniki przeprowadzonych badań stanowiły podstawę dla moich dalszych prac związanych z aplikacją cienkich warstw metalicznych w tekstronice.

- Opracowania kompleksowej technologii wytwarzania cienkich warstw metalicznych na potrzeby czujników tekstronicznych.
- Opracowania metodologii badawczej oraz stanowisk badawczo-pomiarowych umożliwiających pomiary właściwości elektrycznych, termograficznych i mechanicznych ciągłych struktur metalicznych na podłożach tekstylnych.
- Badań właściwości elektrycznych wytworzonych struktur cienkowarstwowych i określenie wpływu odkształceń mechanicznych na stabilność parametrów elektrycznych badanych warstw. Ta część mojej aktywności zaowocowała zbiorem publikacji i przyczyniała się do implementacji badanych struktur dla potrzeb wytworzenia czujników tekstronicznych.
- Funkcjonalizacji wierzchniej warstwy kompozytów tekstylnych poprzez wytworzenie podstawowych elementów biernych. Wyniki badań zostały zaprezentowane na konferencjach oraz przedstawione w publikacjach naukowych.
- Wytworzenia czujników tekstronicznych. Ta część aktywności zaowocowała zbiorem publikacji oraz wytworzeniem czujnika wilgotności oraz czujnika gazu w ramach projektu TexSensors wspieranego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju 2015-2018, w którym byłam jednym z realizatorów.

B) Główne osiągnięcie

Głównym problemem związanym z wytwarzaniem cienkich warstw elektroprowadzących na potrzeby tekstroniki jest dobranie podłoży tekstylnych, na których możliwe jest wytworzenie struktur o predefiniowanych właściwościach elektrycznych.

Tradycyjne materiały tekstylne wytwarzane w postaci elementów płaskich takich jak tkaniny, dzianiny czy też włókniny, wykonane są z materiałów włóknistych w postaci struktur liniowych takich jak nici czy przędza. Elementy te są dielektrykami o bardzo dużej wartości rezystywności liniowej rzędu $10^6 \div 10^9 \Omega/\text{m}$.

Wytworzenie struktur elektroprzewodzących na wyrobach tekstylnych jest bardzo skomplikowanym procesem ze względu na ich trójwymiarową strukturę. Każdy element tekstylny jest zbiorem nici podlegających stałym odkształceniom podczas użytkowania, a każda z nici wykonana z pojedynczych włókien ma porowatą strukturę. W procesie wytwarzania warstw elektroprzewodzących z wykorzystaniem metody fizycznego osadzania z fazy gazowej (PVD) cząsteczki metalu osadzają się na powierzchni tkaniny wnikać w głąb podłoża w większym lub mniejszym stopniu ze względu na porowatość podłoża.

Jedną z metod uzyskiwania elektroprzewodzących tekstyliów jest wplatanie zmodyfikowanych nitek w strukturę tkaniny bądź dzianiny w procesie ich wytwarzania. Nitki te powstają głównie przez modyfikację polimerów nieprzewodzących prądu elektrycznego poprzez dodanie materiałów przewodzących takich jak proszek metaliczny. Stosuje się również włókna metalowe o bardzo niskiej rezystywności liniowej rzędu $0,1 \Omega / m$. Przygotowanie przewodzących przędz metalowych obejmuje skręcanie pojedynczych włókien metalowych (między innymi stali, miedzi, srebra, złota) w procesie przędzenia lub tkania [1-4]. Wykorzystanie takich włókien elektroprzewodzących jest dość ograniczone ze względu na niestabilną naturę przewodnictwa wynikającą ze wzajemnego przeplatania się nici. Wytworzenie struktur elektroprzewodzących na już istniejących wyrobach tekstylnych wymaga wykorzystania innych procesów technologicznych, takich jak fizyczne osadzanie z fazy gazowej (PVD) [5,6], osadzanie chemiczne CVD [7,8], napyłanie próżniowe z wykorzystaniem magnetronu [9,10], technologia nasycania [11], drukowanie cyfrowe z wykorzystaniem atramentów z polimerami elektroprzewodzącymi [12,13], osadzanie bezprądowe [14,15], haft z wykorzystaniem nici elektroprzewodzących [16,17], technologia zol – żel [18], czy też impulsowe osadzanie laserem [19].

Z analizy dostępnej literatury wynika, że dotychczas metodę fizycznego osadzania metalu z fazy gazowej (PVD) wykorzystuje się do osadzania warstw metalicznych na tekstyliach bez wymogu zachowania jej jednorodności i ciągłości na wybranej powierzchni [9,20]. W wyniku przeprowadzonej analizy postawiono zadanie badawcze jakim jest wytworzenie na podłożach tekstylnych struktur cienkowarstwowych o pożądanym, predefiniowanym właściwościach elektrycznych, odpornych na odkształcenia mechaniczne w wyższym stopniu aniżeli prezentowane w dostępnej literaturze [21].

Celem prowadzonych przeze mnie badań nad wytwarzaniem struktur elektroprzewodzących z zastosowaniem wspomnianej technologii było zarówno znalezienie odpowiedniego podłoża, określenie optymalnych parametrów technologicznych umożliwiających wytworzenie ciągłych struktur, które mogą stanowić elementy obwodów elektrycznych jak i wytworzenie struktur elektroprzewodzących o znacznej odporności na czynniki mechaniczne. Warunki optymalne procesu są zależne od wielu czynników związanych zarówno z podłożem tekstylnym, jak i specyfiką procesu próżniowego, w trakcie którego wytwarzane były cienkie warstwy metaliczne. Ze względu na strukturę podłoża i niską adhezję metalu możliwości wytworzenia takich struktur na tkaninach lub dzianinach są bardzo ograniczone.

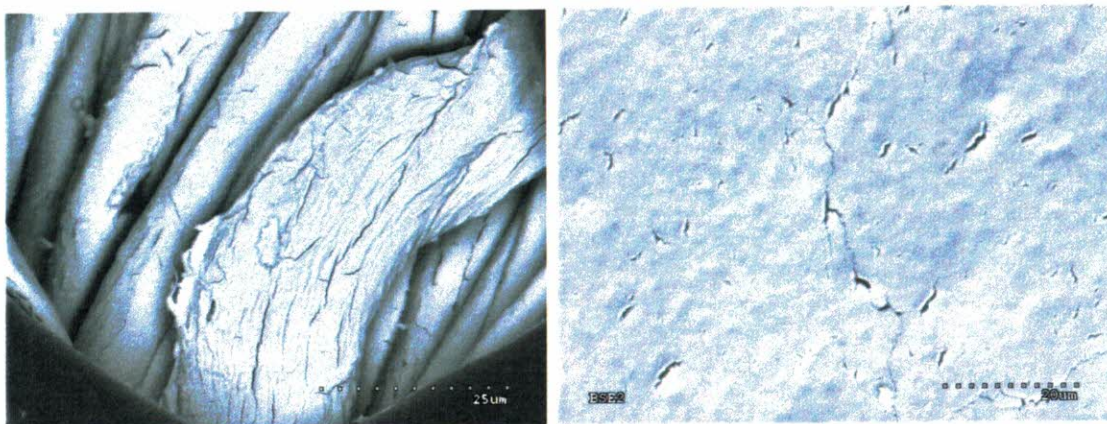
4.2.B.1 *Technologia wytwarzania struktur tekstronicznych*

W ramach prowadzonych badań rozpoczęłam prace mające na celu znalezienie odpowiedniego podłoża dla wytwarzania cienkich struktur elektroprzewodzących w obszarze kompozytów tekstylnych jako alternatywy dla tkanin i dzianin, gdyż struktury wytworzone na tradycyjnych wyrobach tekstylnych nie wykazywały pożądanych cech. Spośród wielu wyrobów kompozytowych dostępnych na rynku, po przeprowadzeniu badań wstępnych wyselekcjonowałam trzy rodzaje produktów, na których możliwe było wytworzenie ciągłych cienkich warstw o pożądanych właściwościach elektrycznych. Wybranymi kompozytami były:

- Goretex jednowarstwowy (tkanina nylonowa z pokryciem teflonowym),
- Membrana przepuszczająca parę wodną (tkanina poliestrowa pokryta teflonem, na którym dodatkowo naniesione są nanowłókna)
- Cordura (tkanina nylonowa laminowana warstwą poliuretanową).

Wytworzone warstwy poddawałam ocenie jakościowej poprzez obserwacje mikroskopowe z wykorzystaniem mikroskopu skaningowego SEM Hitachi S-4200 oraz badanie rezystancji wytworzonych struktur. Przykładowe obrazy pozyskane z mikroskopu skaningowego zostały przedstawione na Rysunku 2. Szersze wyniki prowadzonych przeze mnie badań z obszaru badań podstawowych zostały opublikowane w artykule [EK-1]. Z analizy obrazów SEM badanych struktur, wynika, że uzyskanie ciągłej struktury elektroprzewodzącej, na tradycyjnych podłożach tekstylnych wymagałoby naniesienia warstwy metalu o takiej grubości, która spowodowałaby znaczne ograniczenie elastyczności podłoża, a nawet jej utratę.

Należy stwierdzić, iż uzyskanie połączeń pomiędzy nitkami pokrytymi metalem jest procesem o charakterze stochastycznym i niepewnym. Odmienne cechy mają warstwy naniesione na podłoża kompozytowe. Chociaż struktura warstwy metalicznej wykazuje liczne mikropęknięcia na granicach konglomeratów ziaren w warstwie naniesionego metalu, rezystancja powierzchniowa jest rzędu pojedynczych $\Omega/\square$.



Rysunek 2. Przykładowe zdjęcia z mikroskopu skaningowego warstwy srebrnej naniesionej metodą PVD
na a) bawełniane podłoże tekstylne (powiększenie 500x) o masie powierzchniowej 185 g/m²;
b) podłoże kompozytowe

Aby uzyskać warstwy o stabilnych parametrach elektrycznych pracowałam nad właściwym doбором parametrów technologicznych procesu PVD. Ze względu na charakter podłoża oraz założenie otrzymania ciągłej warstwy metalicznej o pożądanych właściwościach elektrycznych, parametry procesu wymagały wielokrotnej modyfikacji. Przeprowadzenie wielu prób technologicznych i analiza właściwości wytworzonych warstw pozwoliły określić właściwe warunki procesu naparowywania próżniowego dla wyselekcjonowanych materiałów kompozytowych:

- czas nanoszenia warstwy metalicznej 5 minut;
- odległość źródła par metali od powierzchni podłoża 6 cm;
- wartość próżni wstępnej $5 \cdot 10^{-5}$ mbar.

Niedotrzymanie warunków optymalnych procesu prowadzi do zdefektowania podłoża, przegrzania wytwarzanych struktur, uzyskania struktur o dużej wartości rezystancji powierzchniowej, a nawet charakteryzujących się brakiem ciągłości na

pożądaney długości i szerokości, a w przypadku zbyt grubych struktur do zbyt małej elastyczności wytworzonych warstw, bądź słabej adhezji naniesionego metalu do podłoża, co skutkuje między innymi łuszczeniem się materiału.

Należy podkreślić, że jedynie struktury metaliczne o odpowiednich parametrach mogą stanowić podstawę do wytworzenia sensorów tekstronicznych.

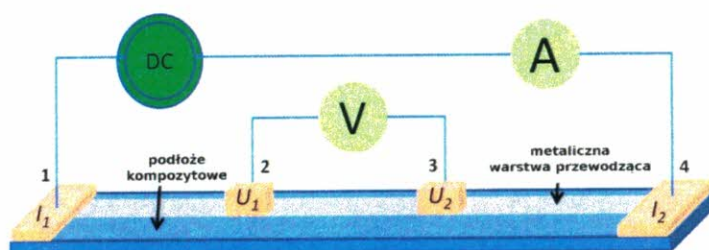
W ramach prac związanych z optymalizacją procesu nanoszenia warstw cienkich metodą fizycznego osadzania próżniowego, opracowałam system dozowania gazu, a następnie wykonałam prace dostosowujące istniejące urządzenie do jego wykorzystania. W obecnej chwili system ten jest integralną częścią próżniowego systemu Pfeiffer Vacuum, stosowanego w opisywanym procesie, będącego na wyposażeniu Instytutu Systemów Inżynierii Elektrycznej Politechniki Łódzkiej. Zastosowanie tego systemu pozwala na zwiększenie potencjału badawczego i rozszerzenie zakresu wykonywanych badań.

Grubości nanoszonych warstw zależne są od rodzaju nanoszonego metalu i w optymalnych warunkach procesu wynoszą: dla srebra 205 nm, dla złota - 200 nm, dla miedzi - 250 nm.

Po wielu badaniach przeprowadzonych z zastosowaniem miedzi, jako metalu naniesionego na tekstylia, ze względu na zmiany rezystancji powierzchniowej wytworzonych struktur cienkowarstwowych w funkcji czasu, w dalszych pracach zaprzestałam jej wykorzystania.

4.2.B.2 Właściwości elektryczne wytworzonych struktur tekstronicznych

Ze względu na zastosowania struktur tekstronicznych jednym z ważniejszych parametrów charakteryzujących wytworzone warstwy jest ich rezystancja. Poprawny jej pomiar warunkuje rzetelność danych wejściowych wprowadzanych i ustawianych jako parametry wzorcowe w urządzeniach przetwarzających dane. W ramach prowadzonych badań przeanalizowałam metody pomiaru rezystancji wytworzonych warstw ze względu na różnorodność kształtów nanoszonych struktur. Jako najbardziej odpowiednia do pomiaru rezystancji struktur prostych, o liniowym kształcie, okazała się czteroelektrodowa metoda techniczna (Rysunek 3).



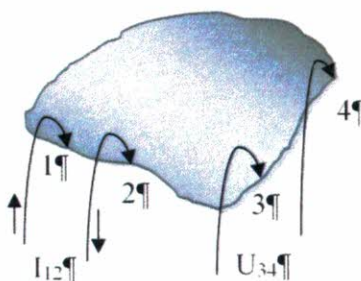
Rysunek 3. Schemat metody czterosondowej obwodu pomiarowego stosowanego do pomiaru rezystancji struktur wytworzonych metodą PVD
gdzie: 1,4 - elektrody prądowe, 2,3 - elektrody napięciowe

Do pomiaru struktur o nieregularnym kształcie należy wybierać czteroelektrodową metodę Van der Pauwa (VdP), wykorzystywaną przede wszystkim w badaniach elektrotechnicznych e-tekstyliów (Rysunek 4). Szczegóły prowadzonych badań opisane zostały w publikacji [EK-2].

Rezystancję w układzie czteroelektrodowym badanych struktur można wyznaczyć ze wzoru:

$$R = \frac{1}{2} \left(\left| \frac{U_{2-3}}{I_{1-4}} \right| + \left| \frac{U_{2-3}}{I_{4-1}} \right| \right)$$

gdzie R – mierzona rezystancja, U – mierzona wartość spadku napięcia pomiędzy elektrodami 2 i 3, I – natężenie prądu pomiędzy elektrodami 1 i 4.



Rysunek 4. Pomiar rezystancji metodą Van der Pauwa stosowany do pomiaru rezystancji struktury o dowolnym kształcie.

Wartość rezystancji warstwy elektroprowadzącej wyznaczonej według metody Van der Pauwa jest wyliczana ze wzoru:

$$e^{-\pi R_A / R} + e^{-\pi R_B / R} = 1$$

gdzie $R_A = \frac{U_{43}}{I_{12}}$ oraz $R_B = \frac{U_{23}}{I_{14}}$, I_{12} - wartość natężenia prądu wymuszonego pomiędzy punktami 1 i 2, U_{34} - spadek napięcia mierzony pomiędzy punktami 3 i 4

Wartości rezystancji powierzchniowej warstw uzyskanych na wyselekcjonowanych podłożach przedstawione są w tabeli 1.

Tabela 1: Rezystancja powierzchniowa warstw przewodzących wytworzonych na wyselekcjonowanych materiałach tekstylnych

L.p.	Podłoże kompozytowe	Rodzaj metalu	Rezystancja powierzchniowa [$\Omega/\square$]
1	Cordura	Au	0,21
2		Ag	0,14
3		Cu	0,52
4	Membrana	Au	0,22
5		Ag	0,16
6		Cu	3,2
7	Goretex	Au	0,67
8		Ag	0,31
9		Cu	4

Pomimo zadawalającej wartości rezystancji powierzchniowej uzyskanej na kompozycie Goretex jednowarstwowy, ze względu na zbyt dużą jego elastyczność i zmieniającą się przy odkształceniu rezystancję, zaprzestałam badań z wykorzystaniem tego materiału.

Przykładowe zestawienie wartości rezystywności i wynikającej z niej konduktywności uzyskanych warstw metalicznych wyliczonych na podstawie uzyskanych wartości rezystancji na podłożu Cordura (tab. 1) oraz wartości tabelaryczne dla materiałów litych zostały przedstawione w tabeli 2.

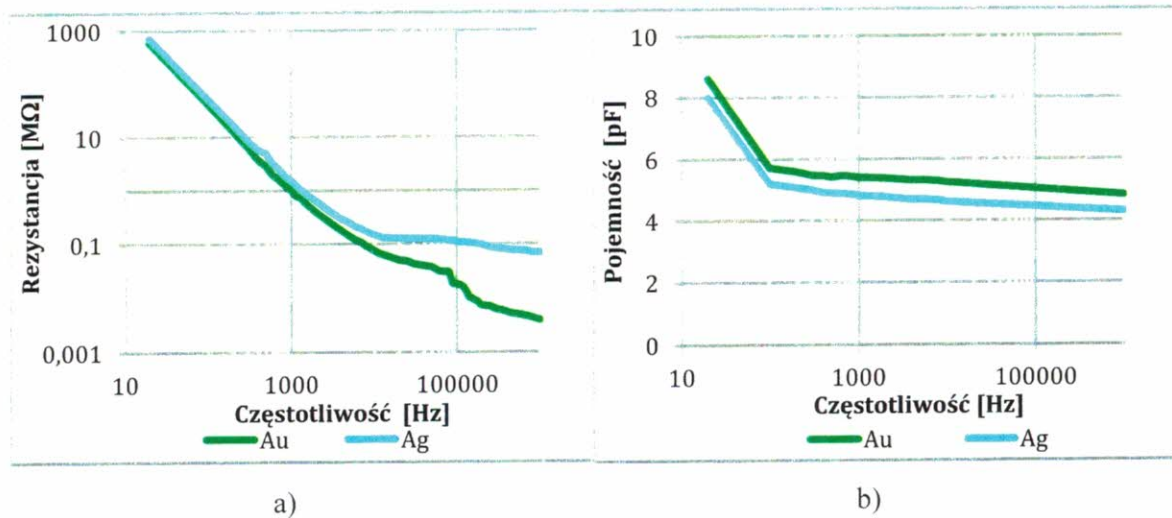
Tabela 2. Wartości rezystywności i konduktywności warstw cienkich wytworzonych na tekstylnym podłożu kompozytowym Cordura oraz wartości tabelaryczne dla materiałów litych

	Cu	Au	Ag
ρ [Ωm]	13×10^{-8}	$4,2 \times 10^{-8}$	$2,87 \times 10^{-8}$
$\rho_{\text{tabelaryczna}}$ [Ωm]	$1,78 \times 10^{-8}$	$2,44 \times 10^{-8}$	$1,59 \times 10^{-8}$
γ [S/m]	$7,7 \times 10^6$	23×10^6	34×10^6
$\gamma_{\text{tabelaryczna}}$ [S/m]	$58,6 \times 10^6$	48×10^6	$61,39 \times 10^6$

Uwzględniając fakt, że mamy do czynienia z warstwami cienkimi o grubości rzędu kilkuset nanometrów z licznymi defektami struktury, można wnioskować, że otrzymane wyniki potwierdzają dobre właściwości elektryczne wytworzonych warstw elektroprzewodzących.

Analiza właściwości struktur tekstronicznych dotyczy również ich parametrów pasożytniczych, które istotne są przy projektowaniu systemów elektronicznych, w tym elastycznej elektroniki. Zakłada się, że każdemu milimetrowi połączenia przewodowego i ścieżki na płycie drukowanej towarzyszy pasożytnicza indukcyjność wynosząca 1 nH, a każda ściśle izolowana warstwa metalowa jest pasożytniczą pojemnością. Istnienie pasożytniczych pojemności i indukcyjności w pobliższym obszarze powoduje niepotrzebny rezonans. Ze względu na możliwości aplikacyjne cienkich warstw elektroprzewodzących ważna jest znajomość również tych parametrów. W związku z tym na kompozytowym podłożu tekstylnym - Cordura wytworzyłam elektrody typu IDEs (interdigitated electrodes) stosowane jako elementy sensoryczne, a następnie wykonałam badania ich parametrów pasożytniczych.

Wybrane wyniki badań zaprezentowane są na Rysunku 5. Metodyka oraz szczegóły prowadzonych przeze mnie badań znajdują się w artykule [EK-3].

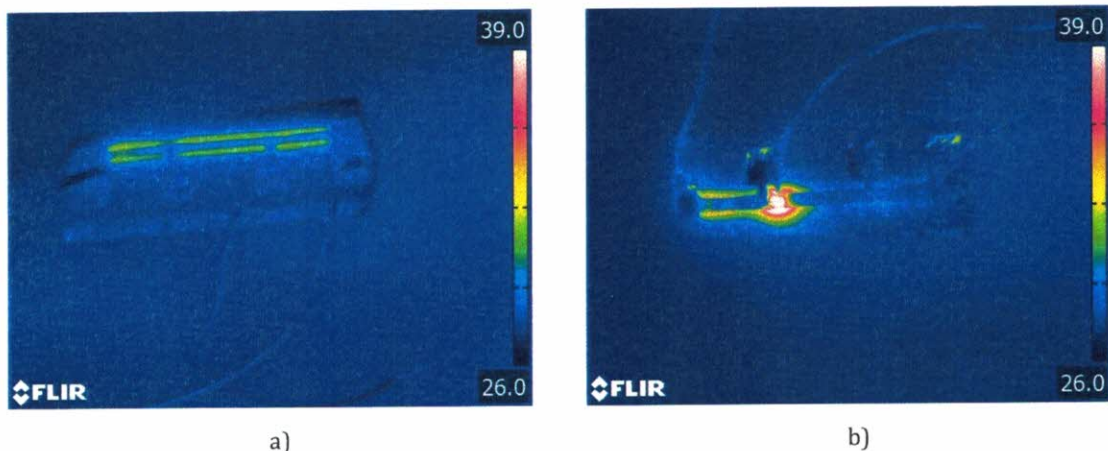


Rysunek 5. Zależność rezystancji (a) i pojemności (b) pasożytniczej od częstotliwości dla wytworzonych struktur IDEs.

Z przeprowadzonych badań wynika, że wytworzone struktury, przy przyjętym zakresie częstotliwości, mają charakter pojemnościowy. Z punktu widzenia budowy modelu w obszarze elektrotechniki jest to ważna informacja, albowiem pozwala pominąć indukcyjność w wyznaczaniu impedancji struktur.

4.2.B.3 Badanie termograficzne wytworzonych struktur tekstronicznych

Jakość naniesionych warstw zweryfikowałam, wykorzystując nie tylko analizę zdjęć pozyskanych z mikroskopu skaningowego, ale również termografię. Zastosowanie tej techniki jako nieingerencyjnej metody pomiarowej jest wskazane, zwłaszcza przy badaniu warstw o grubości rzędu kilkuset nanometrów. Jest to metoda konkurencyjna pod względem ekonomicznym do badań skaningowych. Poddając analizie termogramy można wyciągnąć wnioski na temat jakości nie tylko całej badanej powierzchni wytworzonej warstwy, ale również w całej jej objętości. Wykorzystując mikroskop skaningowy, ze względu na ograniczenia techniczne, analizie podaje się niewielki obszar. Przykładowy termogram pozyskany z kamery termowizyjnej FLIR T650sc w trakcie badań został przedstawiony na Rysunku 6. Szczegółowy opis badań znajduje się w publikacji [EK-4].



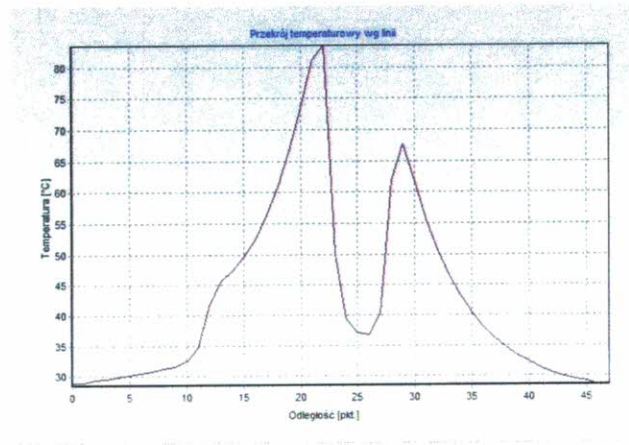
Rysunek 6. Zdjęcie termograficzne struktury srebrnej wykonanej na elastycznym tekstylnym podłożu kompozytowym Cordura

a) struktura jednorodna, b) struktura z defektem powierzchniowym

Zdjęcie zaprezentowane na Rysunku 6a pokazuje równomiernie nagrzewającą się warstwę srebra. Wskazuje to na jednorodność wytworzonych struktur metalicznych. Natomiast z analizy zdjęcia zaprezentowanego na Rysunku 6b wynika, że niejednorodności struktury powodują powstanie lokalnych obszarów o zwiększonej wartości rezystywności, których istnienie może prowadzić do uszkodzenia wytworzonych struktur. Defekty struktury występujące zarówno na powierzchni jak i w całej jej objętości wpływają na rezystancję lokalną, zwiększając ją, a co za tym idzie na emisję wydzielanego z niej ciepła. Analiza rozkładu temperatur na termogramie pozwala na wyciągnięcie wniosków dotyczących jakości wytworzonych ścieżek elektroprzewodzących.

Poprawne przeprowadzenie obliczeń dotyczące bilansu cieplnego oraz analiza pola temperaturowego, zarówno danego systemu elektronicznego, jak i wokół ścieżki elektroprzewodzącej pozwala na odpowiedni dobór optymalnych warunków pracy wytworzonych systemów. Badania termograficzne pozwalają ocenić poprawność przyjętych rozwiązań konstrukcyjnych. Wysoka temperatura powoduje zmiany właściwości elektrofizycznych układów poprzez zmniejszanie obciążalności prądowej materiałów przewodzących oraz stopniowe pogarszanie się właściwości materiałów izolacyjnych. Wykorzystując analizę pola temperaturowego wokół elementów tektonicznych bądź elementów składowych elektroniki elastycznej można znaleźć newralgiczne punkty układów elektronicznych stanowiące punkty lub obszary podatne na uszkodzenia lub potencjalnie wprowadzające zaburzenia w pracę układu.

W metodzie analizy termogramów zastosowano autorskie oprogramowanie Image ThermaBase EU. Przykładowy rozkład temperatur w poprzek ścieżki elektroprzewodzącej o szerokości 5 mm został zaprezentowany na Rysunku 7. Szersza analiza pola temperaturowego wokół wytworzonego elementu została przedstawiona w artykule [EK-5].



Rysunek 7. Wykres rozkładu temperatur struktury cienkowarstwowej w poprzek ścieżki elektroprzewodzącej wytworzonej na podłożu kompozytowym Cordura.

Każdy elektroprzewodzący element metaliczny będący częścią składową systemu tektonicznego musi zostać zabezpieczony przed wpływem warunków środowiskowych. W trakcie prowadzonych badań, ze względu na potencjalne zastosowania elektroprzewodzących struktur cienkowarstwowych, wytworzone elementy zostały zabezpieczone warstwami ochronnymi wykonanymi metodą natryskową z wykorzystaniem transparentnego silikonu lub lakieru akrylowego powszechnie stosowanego przy zabezpieczaniu obwodów elektrycznych na płytkach PCB. W obu przypadkach warunki nanoszenia warstw były jednakowe. Następnie badane struktury zostały podłączone do źródła prądowego i po ustalonym czasie 10 minut mierzona była temperatura wykonanych struktur z zastosowaniem kamery termowizyjnej. Zaobserwowałam również znaczne różnice w nagrzewaniu się elementów w zależności od zastosowanego materiału na warstwę wierzchnią. Próbkę z naniesioną warstwą wierzchnią z lakieru wykazywały tendencję do największej kumulacji ciepła. Najlepsze chłodzenie miała próbka bez zastosowania warstwy ochronnej. Jednakże ze względu na możliwość mechanicznego uszkodzenia cienkiej warstwy wskazane jest wykorzystywanie powłoki ochronnej. Analiza rozkładu temperatur oraz maksymalnych wartości pozwala zarówno na dobranie optymalnych

parametrów zasilania obwodów w przypadku np. zastosowań medycznych jak i technologii zabezpieczania samych struktur elektroprzewodzących. Opis prowadzonych przeze mnie badań zaprezentowałam w publikacji [EK-6]. Przedstawione badania stanowią istotny wkład w rozwój analizy obwodów elektrycznych w strukturach tekstronicznych.

4.2.B.4 Odporność struktur tekstronicznych na czynniki mechaniczne

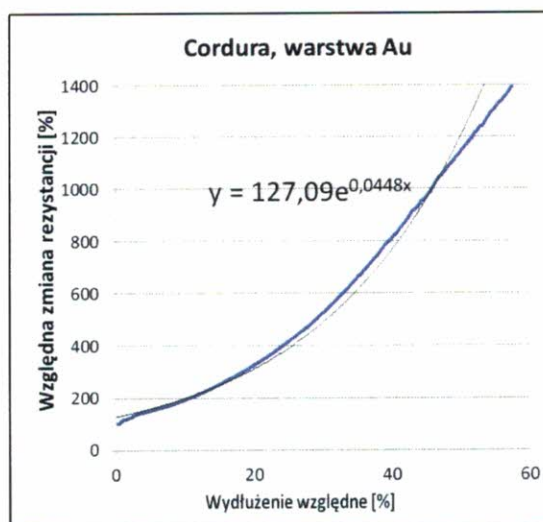
Od każdej struktury tekstronicznej wymaga się, aby była odporna na czynniki mechaniczne. W wielu przypadkach elementy tekstroniczne wytworzone są w sposób i na podłożach niezapewniających wystarczającej wytrzymałości. Podstawowymi czynnikami mechanicznymi wpływającymi na zmiany w rezystancji warstw elektroprzewodzących jest rozciąganie, zginanie oraz ścieranie. W ramach prowadzonych badań właściwości struktur tekstronicznych oceniłam ich odporność na te właśnie czynniki.

Ze względu na warunki pracy struktur elektroprzewodzących zaimplementowanych w budowę sensorów tekstronicznych, przeprowadziłam badania ich trwałości w trakcie obciążeń mechanicznych. Sprawdziłam odporność na ścieranie, rozciąganie oraz zginanie jako na najbardziej typowe czynniki narażeniowe w trakcie użytkowania struktur tekstronicznych. Opracowana przeze mnie koncepcja badań wytrzymałościowych zakładała zastosowanie różnorodnej aparatury. Przeprowadzenie eksperymentów było możliwe dzięki nawiązaniu współpracy z innymi jednostkami naukowymi w kraju (Wojskowy Instytut Medyczny w Warszawie, Politechnika Warszawska, Politechnika Lubelska, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Chełmie).

Nietrwałość powłoki metalicznej niezabezpieczonej w procesie ścierania uniemożliwia utrzymanie stabilnych parametrów elektrycznych wytworzonych struktur. Znajomość wartości współczynników tarcia dla warstw metalicznych pozwala na zrozumienie zachowania się struktur w przypadku działania obciążeń ścierających. W ramach badań zostały wyznaczone średnie współczynniki tarcia dla warstw metalicznych wykonanych ze srebra i miedzi. Badania tribologiczne prowadzone były z użyciem tribotestera THT 1000 Anton Parr. Badania prowadzone były zgodnie z wytycznymi zapisanymi w normie ASTM G133.

Do badań wykorzystane zostało skojarzenie trące typu ball-on-disc. Próbki z naniesionymi cienkimi warstwami metalu na podłożu kompozytowym Cordura wycinano i naklejano na dyski stalowe o średnicy 50 mm i wysokości 10 mm. Podczas testów tribologicznych zastosowano obciążenie 1 N. Badania prowadzone były z prędkością poślizgu węzła tarcia 0,3 m/s na promieniu 11 mm. Pomiary prowadzono bez udziału środka smarnego. Wyznaczyłam współczynniki tarcia i wynoszą one odpowiednio 0,49 dla srebra oraz 0,67 dla miedzi. W zastosowaniach aplikacyjnych, gdzie cienka warstwa metaliczna podlega intensywnemu ścieraniu, należy stosować warstwy zabezpieczające struktury elektroprzewodzące. Warstwy ochronne nie tylko utrudnią proces niszczenia materiału podłoża, ale również wydłużą resurs całej struktury tekstronicznej. Wyniki badań zostały przedstawione w publikacji [EK-7].

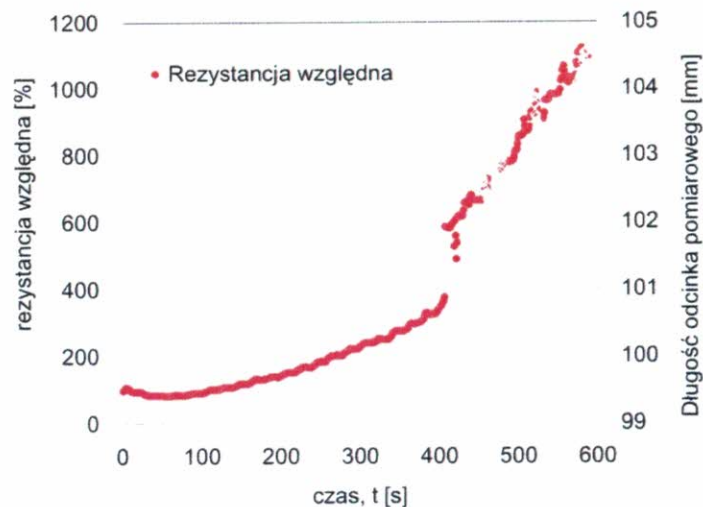
Badane struktury poddawane były również obciążeniom rozciągającym. W tym celu próbki umieszczałam w izolowanych szczękach maszyny wytrzymałościowej Zwick typ 8487. Próbka umieszczona była pomiędzy izolacyjnymi szczękami głowic rozciągających, a następnie rozciągana z prędkością 1mm/minutę. Sterowanie urządzeniem, jak i rejestracja wyników pomiaru wydłużenia oraz przyłożonej siły odbywało się z zastosowaniem oprogramowania TestExpert v.12.0. Rezystancja mierzona była w trakcie rozciągania z zastosowaniem multimetru cyfrowego Sanwa PC5000A. Częstotliwość pomiarów wynosiła 5 Hz. Następnie zebrane dane skorelowałam z danymi z maszyny wytrzymałościowej. Uzyskane wyniki dla przykładowej warstwy wykonanej ze złota na kompozycie Cordura przedstawiono na Rysunku 8.



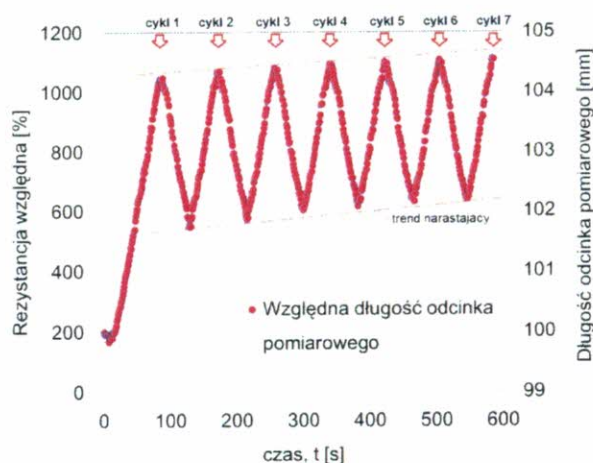
Rysunek 8. Zależność względnej zmiany rezystancji od wydłużenia względnego

Wyniki badań potwierdzają bardzo dużą odporność struktur tekstronicznych na naprężenia rozciągające. W przypadku warstw wykonanych ze złota na podłożu Cordura można zaobserwować dobre właściwości elektroprzewodzące, aż do naprężeń rozciągających powodujących wydłużenie względne próbki do 60%. Wytworzone warstwy srebrne wykazywały ciągłe przewodnictwo elektryczne, aż do wydłużenia względnego powyżej 20%. Z przeprowadzonych badań wynika duża odporność warstw metalicznych wykonanych metodą PVD na podłożu kompozytowym - Cordura na naprężenia rozciągające. Szersze opracowanie wyników badań zaprezentowałam w publikacji [EK-8].

Kolejnym etapem prowadzonych badań było określenie odporności wytworzonych struktur tekstronicznych na cykliczne naprężenia rozciągające. W tym celu próbki umieszczono w maszynie wytrzymałościowej Cometech QC-508m2 umożliwiającej realizację prób statycznego rozciągania i ściskania. Cykl pomiarowy obejmował 7-krotne rozciąganie za pomocą narastającej siły rozciągającej w przedziale od 5N do 50N z prędkością 5mm/min, a następnie zmniejszenie siły do poziomu napięcia wstępnego 5N. Cykl ten powtarzano rejestrując wartości odkształcenia za pomocą mobilnego optycznego systemu pomiarowego 3D systemu PONTOS. Przykładowe wyniki zaprezentowano na Rysunku 9.



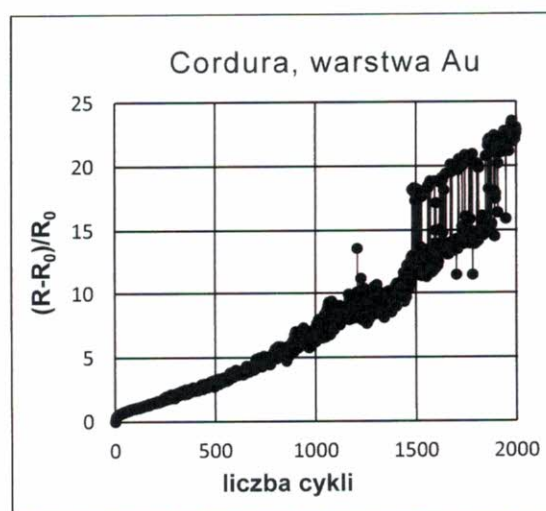
Rysunek 9. Rezystancja względna mierzona na odcinku pomiarowym w funkcji czasu



Rysunek 10. Względna długość odcinka pomiarowego w funkcji czasu na tle mierzonej rezystancji względnej

Z analizy przeprowadzonych badań wynika, że przy 3-krotnym cyklicznym rozciąganiu warstw o 5% struktura nie traci swoich właściwości elektroprzewodzących. Znaczny wzrost rezystancji pojawia się po piątym wydłużaniu warstwy (Rys. 10). Z tego względu ograniczenie do 7 cykli pomiarowych było wystarczające celem określenia odporności struktur tekstronicznych na cykliczne naprężenia rozciągające. Wyniki prowadzonych w tym obszarze badań zostały zaprezentowane w publikacji [EK-9].

Kolejnym czynnikiem wpływającym na przydatność warstw metalicznych do stosowania ich jako elementy obwodów elektrycznych ze strukturami tekstronicznymi jest poddawanie ich cyklicznemu procesowi zginania.



Rysunek 11. Zależność rezystancji względnej struktury tekstronicznej od liczby cykli zginających

Wyniki badań odporności warstw na cykliczne zginanie pokazano na Rysunku 11. Na wykresie przedstawiono zależność względnej zmiany rezystancji warstwy metalicznej wykonanej ze złota w funkcji liczby cykli zginania. W trakcie każdego cyklu zginania badane warstwy zginane były o 90° . Rezystancja struktury zwiększała się kilkukrotnie po kilkuset, a nawet po kilku tysiącach cykli. Lepszą odporność na zginanie wykazywały warstwy wytworzone ze złota. Szersze omówienie wyników badań znajduje się w artykule [EK-8].

4.2.B.5 Wykorzystanie optycznej tomografii koherentnej do badań podłoża kompozytowego

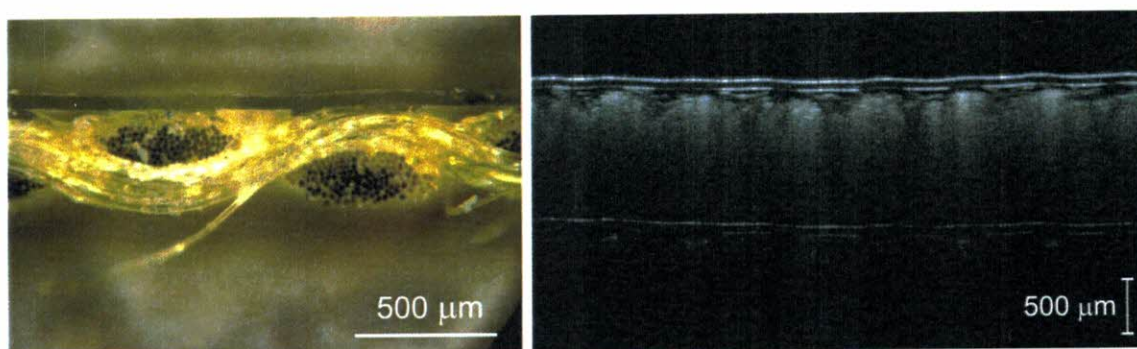
Pomimo stosowania podobnych procedur w trakcie produkcji kompozytowych wyrobów tekstylnych, produkty wyjściowe charakteryzują się innymi parametrami, w tym zróżnicowane są grubością warstwy polimerowej stanowiącej bezpośrednie podłoże dla naniesionej warstwy metalicznej. Warstwa ta jest istotna dla odporności struktur tekstronicznych na czynniki mechaniczne takie jak sztywność, odporność na rozciąganie, rozdzieranie czy też zginanie. Ważna jest zatem możliwość oceny grubości warstwy powlekającej powierzchnię tkaniny w kompozytach tekstylnych.

Jakość powłoki polimerowej, ze względu na wyrównanie powierzchni materiału tekstylnego, decyduje również o jakości warstw metalicznych wytwarzanych na jej powierzchni. Należało więc opracować nową unikalną, alternatywną dla badań mikroskopowych metodę oszacowania grubości wyrównującej warstwy wierzchniej w kompozytach tekstylnych.

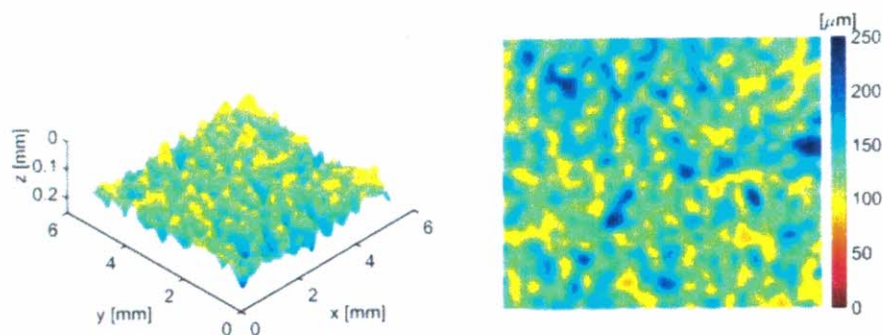
Koncepcja metody pomiarowej została opisana w artykule [EK-10]. W publikacji zaproponowano nieinwazyjną nowatorską metodę ekstrakcji i pomiaru warstwy poliuretanowej w kompozytach włókienniczych jako alternatywną do inwazyjnych pomiarów mikroskopowych, wymagających przekrojów porzeczných próbek materiału. Oceny parametrów warstwy polimerowej, jej grubości oraz jednorodności można dokonać wykorzystując optyczną tomografię koherentną OCT. W metodzie tej na obrazach pozyskanych z tomografu optycznego, wykrywa się górną i dolną granicę badanej warstwy wykorzystując filtrowanie, wzmocnienie krawędzi, progowanie oraz wygładzając wykryte krawędzie.

Pomiary były następnie ekstrapolowane z trójwymiarowego obrazu OCT tkaniny kompozytowej. Dla każdej z badanych próbek określano mapy grubości warstwy

polimerowej w polu widzenia 5 x 5 mm. Następnie określano średnią grubość warstwy i porównano ją z pomiarami mikroskopowymi. Przykładowy obraz pozyskany zarówno z mikroskopu optycznego jak i tomografu koherentnego przedstawiono na Rysunku 12. Natomiast przykładową mapę grubości badanej warstwy zaprezentowano na Rysunku 13. Szczegółowe informacje na temat prowadzonych badań znajdują się w artykule [EK-10].



Rysunek 12. Obraz mikroskopowy przekroju poprzecznego kompozytu tekstylnego - Cordura wykonany przy użyciu mikroskopii w ciemnym polu z obiektywnym powiększeniem x80 (po lewej stronie) i odpowiadający mu B-skan pozyskany z tomografu koherentnego (po prawej stronie)



Rysunek 13. Mapa grubości warstwy poliuretanowej podłoża kompozytowego Cordura w widoku 3D oraz mapa 2D.

Otrzymane wyniki badań prowadzonych z zastosowaniem optycznej tomografii koherentnej pokazują wysoką zgodność między pomiarami wykonanymi z zastosowaniem mikroskopu optycznego i uzyskanymi wynikami metodą obrazowania OCT. Badania dotyczyły kompozytu Cordura.

Przeprowadzając powyższe badania określić można grubość warstwy polimerowej stanowiącej podłoże dla warstwy elektroprzewodzącej stanowiącej podparcie dla cienkiej warstwy metalicznej, zwiększającej jej odporność na czynniki mechaniczne. Przeprowadzenie tego rodzaju badań, nie wymusza specjalistycznego przygotowania

próbek i można je wykonać nawet w przypadku już istniejących, wytworzonych, a nawet już użytkowanych struktur tekstronicznych.

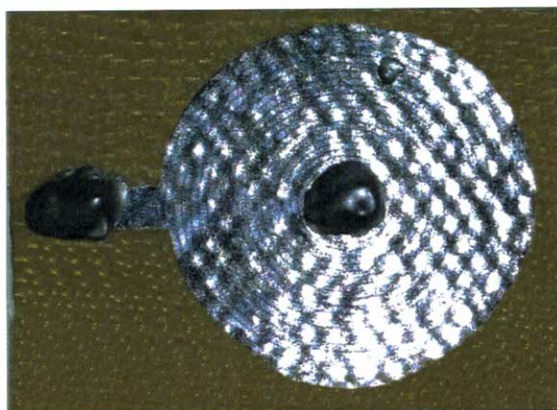
4.2.B.6 Funkcjonalizacja cienkich warstw metalicznych

Struktury tekstroniczne oprócz ścieżek elektroprzewodzących na podłożach tekstylnych to również elementy bierne takie jak rezystory i cewki. Brałam udział w opracowaniu laserowej technologii wytwarzania elementów biernych w cienkich warstwach metalicznych naniesionych w drodze osadzania próżniowego na tekstylne podłoża kompozytowe. Przykładowe zdjęcia otrzymanych elementów przedstawione są na Rysunku 14.



Cordura, Ag, 2-5 Ω

a)



Cordura, Ag, L~900 μ H

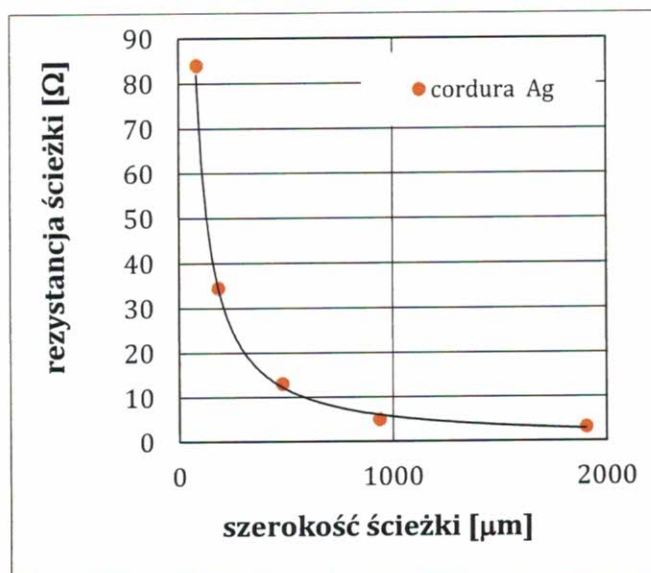
b)

Rysunek 14. Przykładowe zdjęcia elementów biernych wytworzonych na podłożu kompozytowym Cordura z zastosowaniem laserowego kształtowania struktur

a) rezystor wytworzony w warstwie Ag $R=2-5 \Omega$;

b) spiralna cewka indukcyjna wytworzona w warstwie Ag na podłożu Membrana, L~900 μ H.

W ramach prowadzonych badań właściwości cienkich warstw elektroprzewodzących wytwarzane były ścieżki o różnych szerokościach. Następnie na podstawie pomiarów została określona zależność rezystancji powierzchniowej struktury od jej szerokości (Rysunek 15). Jak wynika z wykresu, z wykorzystaniem opracowanej technologii możliwe jest wytworzenie ścieżek elektroprzewodzących węższych niż 1 mm, a także innych elementów o parametrach zmiennych w szerokim zakresie, wykorzystując różne geometrie, długości i szerokości ścieżek. Wyniki badań szerzej zostały opisane w [EK-11, EK-12, EK-13].



Rysunek 15. Zależność rezystancji ścieżki testowej od rzeczywistej szerokości ścieżki

Opisane powyżej prace związane z wytwarzaniem struktur elektroprzewodzących i badaniem ich własności prowadzone były częściowo w ramach projektu badawczego TexSensors Narodowego Centrum Badań i Rozwoju, w którym byłam jednym z głównych wykonawców.

4.2.B.7 Sensory tekstroniczne

W ramach działalności statutowej opracowałam prototypową konstrukcję czujnika wilgotności na podłożu membrana. Wyniki prowadzonych innowacyjnych badań własnych zostały opublikowane w [EK-14]. Omówione tam wyniki dotyczą analizy odporności sensora na mechaniczne odkształcenia podczas rozciągania i zmian jego rezystancji w różnych warunkach środowiskowych, z zastosowaniem autonomicznego układu pomiarowo-przetwarzającego. Przeprowadzone badania potwierdziły użyteczność i możliwość zastosowania zaprojektowanego czujnika jako np. czujnika wilgotności skóry w ubraniach monitorujących dla osób starszych w szpitalach i ośrodkach geriatrycznych.

Czujnik ten może mieć zastosowanie również w innych tekstronicznych aplikacjach odzieżowych, tam gdzie monitorowanie wilgotności jest istotne.

W ramach realizowanego przeze mnie projektu badawczego wykonano prototypowy czujnik tekstroniczny do pomiaru stężenia gazów. Warstwy chemoreaktywne czujników gazu nanoszone były za pomocą reaktywnej techniki drukowania atramentowego na

złotych elektrodach, które zostały osadzone próżniowo na włókninie polipropylenowej. Opracowane czujniki wykazały istotne zmiany rezystancji względnej pod wpływem podawanych w sposób kontrolowany gazami. Sensory zostały zaprojektowane w sposób umożliwiający ich implementację w inteligentnych ubraniach do osobistego monitorowania pomieszczeń przemysłowych w przypadku narażenia człowieka na wpływ niebezpiecznych, najczęściej bezwonných gazów. Wyniki badań zostały przedstawione w publikacjach [EK - 15, EK - 16]. Wytworzenie takiego czujnika wymagało synergicznego połączenia kilku procesów (w tym technologii PVD), a co za tym idzie także współpracy kilku jednostek naukowych i specjalistów z różnych dziedzin.

Zadania jakie stoją przed współczesną odzieżą, to nie tylko zapewnienie komfortu termicznego człowieka, ale również zastosowanie jej jako interfejsu komunikacyjnego przekazującego informacje o parametrach życiowych użytkownika. Przeprowadzone badania mają duży potencjał aplikacyjny ze względu na zastosowanie struktur tekstronicznych zarówno w medycynie, odzieży sportowej roboczej, wojskowej, modzie, przemyśle motoryzacyjnym czy też w komunikacji.

W literaturze można znaleźć publikacje poświęcone nanoszeniu cienkich warstw metalicznych metodą fizycznego osadzania próżniowego. Jednakże autorzy prac nie zajmują się ich przydatnością do wykorzystania ich w systemach elektroniki noszonej. Brak jest również badań dotyczących wytwarzania tego rodzaju powłok o strukturze ciągłej. Stanowi to o znaczącej oryginalności przeprowadzonych przeze mnie badań i uzyskanych wyników.

Za moje najważniejsze osiągnięcia badawcze stanowiące istotny wkład w dziedzinę Nauki Techniczne w dyscyplinę Elektrotechnika, uważam opracowanie i zoptymalizowanie nowatorskiej technologii wytwarzania elektroprowadzących struktur tekstronicznych o predefiniowanych wartościach rezystancji oraz o dużej odporności na obciążenia mechaniczne, z zastosowaniem procesu fizycznego osadzania próżniowego (PVD) na kompozytowych podłożach tekstylnych.

W przypadku wytwarzania sensorów, w konstrukcji których stosuje się elektroprowadzące warstwy chemoreaktywne nakładane metodą *in situ*, istotne jest wcześniejsze wytworzenie elektrod, które będą elementem obwodu

elektrycznego. Ze względu na powstawanie produktów ubocznych reakcji syntezy warstw chemoreaktywnych, elektrody powinny być wykonane ze złota jako materiału o dużej odporności chemicznej. Wytworzenie płaskich elektrod złotych na potrzeby elektroniki drukowanej nie jest możliwe z wykorzystaniem druku cyfrowego ze względu na fakt wykorzystania atramentów, które uzyskują swoją funkcjonalność po zastosowaniu obróbki termicznej w temperaturze powyżej 200°C. Poddanie podłoża tekstylnych działaniu takich temperatur powoduje degradację wyrobu włókienniczego w stopniu uniemożliwiającym jego użytkowanie. Stosowanie innych metod osadzania warstw cienkich związane jest również z wykorzystaniem substratów chemicznych oraz jest ekonomicznie nieuzasadnione. Naniesienie chemoodpornych warstw złotych bez narażenia podłoża na zniekształcenia czy też degradację, jest możliwe za pomocą fizycznego osadzania próżniowego. Z tego powodu rozwijanie tej technologii na potrzeby elektroniki drukowanej jest w pełni uzasadnione.

W wyniku przeprowadzonych badań można sformułować następujące wnioski:

- Opracowana technologia umożliwia wytworzenie struktur charakteryzujących się pożądanymi właściwościami elektrycznymi oraz dużą odpornością na odkształcenia mechaniczne szczególnie przy obciążeniach cyklicznych, co ma szczególne znaczenie dla elementów tekstronicznych.
- Wytworzone warstwy elektroprzewodzące wykazują odporność na rozciąganie nawet do 60% w przypadku warstw złota oraz 20% w przypadku warstw srebra przy zachowaniu ciągłości struktury pod względem elektrycznym.
- W przypadku obciążeń zginających, struktury wytworzone z wykorzystaniem opracowanej technologii wytrzymują ponad tysiąc cykli deformacji.
- Opracowana metoda wytworzenia elektrotechnicznych elementów biernych w cienkich warstwach metalicznych na podłożach tekstylnych jest metodą autorską, dotychczas niespotykaną.
- Z wykorzystaniem technologii fizycznego osadzania próżniowego możliwe jest wytworzenie sensorów identyfikujących zmiany

środowiskowe poprzez zmianę parametrów elektrycznych. Opracowane i wytworzone tą metodą sensory tekstroniczne mają w sobie duży element innowacyjności.

4.3 Autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa, recenzenci wydawniczy

Publikacje podstawowe (w tym 6 czasopism z listy JCR)

- [EK-1] Pawlak R., **Korzeniewska E.**, Frydrysiak M., Zięba J., Tęsiński Ł., Gniotek K., Stempień Z., Tokarska M. *Using vacuum deposition technology for the manufacturing of electro-conductive layers on the surface of textiles* Fibres and Textiles in Eastern Europe 2012 91(2), pp. 68-72

IF₂₀₁₂=0,801; MNiSW=25.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współtworzeniu koncepcji badań, selekcji materiałów, na których przeprowadzane były eksperymentalne badania podstawowe nanoszenia warstw elektroprzewodzących, opracowaniu wyników oraz pisaniu manuskryptu. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 18,5%.

- [EK-2] **Korzeniewska E.**, Jakubas A. *Pomiar rezystancji powierzchniowej warstw cienkich o dowolnych kształtach wytworzonych na podłożach elastycznych* Przegląd Elektrotechniczny 2014(12), pp. 233-236;

IF=0; MNiSW=10.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wytworzeniu struktur elektroprzewodzących, na opracowaniu metodologii przeprowadzenia badań pomiarów rezystancji wytworzonych struktur z wykorzystaniem różnych metod, opracowaniu przeglądu literatury, opracowaniu wyników, pisaniu manuskryptu oraz pełnieniu funkcji „osoba do kontaktu z Edytorem”. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 50%.

- [EK-3] **Korzeniewska E.**, Szczęśny A.: *Parasitic parameters of thin film structures created on flexible substrates in PVD process* Microelectronic Engineering 2018, 193, pp. 62-64

IF₂₀₁₇=2,02; MNiSW=25.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na wytworzeniu struktur elektroprzewodzących, analizie literatury, na opracowaniu metodologii

przeprowadzenia badań dotyczących pomiarów rezystancji, impedancji oraz dobroci badanych struktur w zakresie częstotliwości od 20 Hz do 200 kHz, przeprowadzeniu pomiarów, opracowaniu wyników, pisaniu manuskryptu oraz pełnienia funkcji „osoba do kontaktu z Edytorem”. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 50%.

- [EK-4] **Korzeniewska E.**, Murawski P., Krawczyk A., Pawlak R.: *Detekcja defektów cienkich struktur elektroprowadzących z wykorzystaniem termografii* Przegląd Elektrotechniczny 2016, 92(1), pp. 93-95

IF=0; MNiSW=14.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji badań, wytworzeniu struktur elektroprowadzących, zarówno homogenicznych jak i zdefektowanych, przeprowadzeniu badań termograficznych, opracowaniu wyników, pisaniu manuskryptu oraz pełnienia funkcji „osoba do kontaktu z Edytorem”. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 40%.

- [EK-5] **Korzeniewska E.**, Szczęsny A., Krawczyk A., Murawski P., Mróz J., Seme S. *Temperature distribution around thin electroconductive layers created on composite textile substrates* Open Physics 2018, 16(1), pp. 37-41;

IF₂₀₁₇=0,755; MNiSW=15.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na opracowaniu metodologii badań, wytworzeniu struktur elektroprowadzących, przeprowadzeniu badań termograficznych, a także opracowaniu i interpretacji uzyskanych wyników. Pozyskane obrazy termograficzne poddawałam analizie rozkładu temperatur w bezpośrednim sąsiedztwie badanych struktur z wykorzystaniem autorskiego oprogramowania Image ThermaBase EU. Zajmowałam się także pisaniem manuskryptu oraz pełniłam funkcję „osoby do kontaktu z Edytorem”. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 50%.

- [EK-6] **Korzeniewska E.** *Heat dissipation due to protective layer of the electroconductive deposition made on textile substrate* 2018 Proceedings of 11th International Conference on Modern Electrical and Energy Systems, MEES 2017, 2018,- pp. 396-399

IF=0; MNiSW=15;

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na określeniu problemu badawczego, stworzeniu koncepcji badań, przeprowadzeniu badań termograficznych,

analizie wyników z wykorzystaniem oprogramowania Image ThermaBase EU oraz pisaniu i edycji manuskryptu. Udział procentowy mojej pracy wynosi 100%.

- [EK-7] **Korzeniewska E.**, Szczęsny A., Józwik J., Tofil A.: *Computer measurement of the friction of thin metal structure created in PVD technology on the flexible substrate*, MATEC Web of Conferences Volume 252 (2019) III International Conference of Computational Methods in Engineering Science (CMES'18) Kazimierz Dolny, Poland, November 22-24, 2018, doi: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925209005>

MNiSW=0.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji i założeń pracy, analizie literatury przedmiotu, wytworzeniu struktur metalicznych, na opracowaniu metodologii przeprowadzenia badań współczynnika tarcia struktur wytworzonych na tekstylnym podłożu kompozytowym, opracowaniu wyników, pisaniu manuskryptu oraz pełnienia funkcji „osoba do kontaktu z Edytorem”. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 60%.

- [EK-8] Pawlak R., **Korzeniewska E.**, Koneczny C., Hałgas B. *Properties of thin metal layers deposited on textile composites by using the PVD method for textronic applications* Autex Research Journal 2017, 17(3), pp. 229-237

IF₂₀₁₇=0,957; MNiSW=20.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w tworzeniu koncepcji badań, wytworzeniu struktur elektroprzewodzących, na opracowaniu metodologii przeprowadzenia badań, przeprowadzeniu badań wytrzymałości struktur na rozciąganie, opracowaniu i analizie wyników, pisaniu manuskryptu oraz pełnienia funkcji „osoba do kontaktu z Edytorem”. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 40%.

- [EK-9] **Korzeniewska E.**, Józwik J., Zawiślak R., Krawczyk A., Michałowska J. *Odporność warstw metalicznych stosowanych w systemach tekstronicznych na deformacje mechaniczne*, Przegląd Elektrotechniczny 2017, 93(12), pp. 111-114

IF=0; MNiSW=14.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji badań, opracowaniu przeglądu literaturowego, wytworzeniu struktur

elektroprzewodzących, na opracowaniu metodologii przeprowadzenia badań wytrzymałości struktur na cykliczne rozciąganie z zastosowaniem mobilnego optycznego systemu pomiarowego 3D systemu PONTOS, opracowaniu otrzymanych wyników, pisaniu manuskryptu oraz pełnienia funkcji „osoba do kontaktu z Edytorem”. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 60%.

- [EK-10] Gocławski J., **Korzeniewska E.**, Sekulska-Nalewajko J., Sankowski D., Pawlak R. *Extraction of the polyurethane layer in textile composites for textronics applications using optical coherence tomography* Polymers 2018, 10(5),469
IF₂₀₁₇=2,935; MNiSW=40.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji i założeń pracy, badaniach literaturowych, badaniach mikroskopowych i analizie otrzymanych obrazów, obróbce wyników przeprowadzonych badań, analizie i interpretacji otrzymanych wyników oraz przygotowaniu manuskryptu. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 25%.

- [EK-11] Pawlak R., Lebioda M., Tomczyk M., Rymaszewski J., **Korzeniewska E.**, Walczak M., *Modeling and applications of conductive elements on textile materials*, COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering 2018 37(5), pp. 1645-1656
IF₂₀₁₇=0,534, MNiSW=15.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w tworzeniu koncepcji i założeń pracy, wytworzeniu struktur elektroprzewodzących, na opracowaniu metodologii przeprowadzenia badań oraz pisaniu manuskryptu. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 15%.

- [EK-12] **Korzeniewska E.**, Walczak M., Rymaszewski J.: *Elements of elastic electronics created on textile substrate* 2017 Proceedings of the 24th International Conference on Mixed Design of Integrated Circuits and Systems, MIXDES 2017, 8005250, pp. 447-450
MNiSW=15.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na stworzeniu koncepcji i założeń pracy, analizie literatury przedmiotu, wytworzeniu struktur elektroprzewodzących, przeprowadzeniu badań wytrzymałościowych, na opracowaniu metodologii badań i ich przeprowadzeniu, opracowaniu

wyników, pisanu manuskryptu oraz pełnienia funkcji „osoba do kontaktu z Edytorem”. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 70%.

- [EK-13] Pawlak R., **Korzeniewska E.** Stempień Z.: *Thin conductive structures on coated textiles* 2016 Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics, WZEE 201156, IEEE Explore Digital Library article number:7800248

MNiSW=15.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w tworzeniu koncepcji i założeń pracy, wytworzeniu struktur elektroprowadzących oraz elementów biernych do zastosowania w obwodach elektrycznych wytworzonych na podłożach kompozytowych, na opracowaniu metodologii przeprowadzeniu badań, przeprowadzeniu badań, opracowaniu wyników pisanu manuskryptu oraz pełnienia funkcji „osoba do kontaktu z Edytorem”. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 45%.

- [EK-14] Frydrysiak M., **Korzeniewska E.**, Tęsiorowski Ł.: *The textile resistive humidity sensor manufacturing via (PVD) sputtering method* 2015 Sensor Letters 13(11), pp. 998-1001.

MNiSW=0.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w tworzeniu koncepcji i założeń pracy, selekcji i weryfikacji podłoży na których możliwe będzie wytworzenie struktur elektroprowadzących wrażliwych na wilgotność, wytworzenie warstw metalicznych, na opracowaniu metodologii przeprowadzeniu badań, opracowaniu wyników oraz pisanu manuskryptu. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 33,3%.

Publikacje uzupełniające

- [EK-15] Stempień Z., Kozicki M., Pawlak R., **Korzeniewska E.**, Pościk A., Sajna D.: *Ammonia gas sensors ink-jet printed on textile substrates* Proceedings of IEEE Sensors 2017, 7808457

MNiSW=15.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w tworzeniu koncepcji i założeń pracy, wyselekcjonowaniu podłoża na którym możliwe jest zarówno wytworzenie warstw chemoreaktywnych jak i elektroprowadzących

warstw ciągłych, wytworzeniu elektrod ze złota oraz pisaniu manuskryptu. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 20%.

- [EK-16] Stempień Z., Kozicki M., Kozanecki M., Pawlak R., **Korzeniewska E.**, Owczarek G., Pościk A.: *Using the reactive inkjet printing technique to fabricate the gas sensors on textile substrates*, International Journal of Engineering Sciences 2018 11(2) 43 - 48

MNiSW=0.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w wytworzeniu sensora gazu poprzez wytworzenie struktur elektroprowadzących, analizie wyników badań oraz pisaniu manuskryptu. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 20%.

4.4 Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych

Prócz zainteresowań zogniskowanych wokół struktur tekstronicznych i możliwości ich aplikacji, zajmowałam się także oddziaływaniem impulsowego pola elektrycznego na winogrona, jako surowca stosowanego w przemyśle winiarskim, a także modyfikacją powierzchni materiałów i polimerów z wykorzystaniem wiązki laserowej.

Ponadto prowadzę około zawodową działalność prospołeczną uczestnicząc w pracy organizacji pozarządowych o charakterze naukowym. Opis podejmowanych działań znajduje się w załączniku 3 do niniejszego autoreferatu.

A) Wpływ impulsowego pola elektrycznego na winogrona

Oddziaływanie impulsowego pola elektrycznego PEF na żywność jest jedną z metod jej nietermicznej obróbki stosowanej do suszenia i konserwacji żywności. Metoda ta pozwala na zachowanie walorów smakowo-zapachowych, wartości odżywczych, barwy, naturalnej jakości oraz składników witaminowych obrabianych produktów spożywczych. Metoda ta jest często używana do poprawienia wydajności pozyskiwania soków z warzyw i owoców. Działanie impulsowego pola elektrycznego na tkanki roślinne to problem naukowy, którego badanie wymusza współpracę naukowców reprezentujących takie dyscypliny jak elektrotechnika i technologia żywności. Podstawowe zagadnienia dotyczące procesu elektroporacji w zastosowaniu do tkanek

roślinnych, optymalne zużycie energii w trakcie procesu oraz wpływ parametrów procesu omawiane są w literaturze.

W przemyśle winiarskim zastosowanie pulsacyjnego pola elektrycznego prowadzi do poprawy parametrów jakościowych wina, takich jak zawartość związków fenolowych: antocyjanów i tanin, całkowitą zawartość polifenoli oraz intensywność koloru. Efekty zainicjowanych przeze mnie i przeprowadzonych w zespole badań, zostały opublikowane w artykułach [EKU-1, EKU-2]. W ramach prowadzonych badań analizie wpływu impulsowego pola elektrycznego poddawane były zarówno owoce winogron, służące jako produkt do wytworzenia wina jak i sam produkt końcowy. Potwierdzono zasadność stosowania impulsowego pola elektrycznego celem uzyskania większej ilości składników prozdrowotnych w produkcie końcowym jakim jest wino. Analizowałam również strukturę owoców z zastosowaniem optycznej tomografii koherentnej. Z pozyskanych obrazów i ich analizy wynika zmiana struktury owoców winogron zwłaszcza w obszarze przy skórce, czyli w obszarze, gdzie mamy do czynienia z nagromadzeniem się składników prozdrowotnych. Przeprowadzone badania były badaniami nowatorskimi, a ich wyniki zostały zaprezentowane w artykule [EKU-3].

B) Modyfikacja powierzchni materiałów i polimerów z zastosowaniem wiązki laserowej

W ramach przeprowadzonych badań nad możliwościami osadzania warstw elektroprzewodzących na powierzchnię tkanin w trakcie analizy ich powierzchni, wystąpił problem związany z pilingiem wyrobów włókienniczych. Powstała zatem potrzeba, by zmodyfikować warstwę wierzchnią tkaniny tak, aby efekt niepożądanego pilingu zmniejszyć. Moją koncepcją było wykorzystanie działania wiązki laserowej stosowanej wcześniej do wytwarzania biernych elementów obwodów elektrycznych na kompozytowych podłożach tekstylnych. Otrzymane wyniki badań stanowiły podstawę do złożenia wniosków o ochronę patentową:

- Sposób zmniejszania tendencji wyrobów tekstylnych do pilingu P. 426907, data zgłoszenia 06.09.2018r.
- Sposób oceny tendencji wyrobów tekstylnych do pilingu P. 426910, data zgłoszenia 06.09.2018r.

Przedmiotem zgłoszenia patentowego jest metoda zmniejszenia tendencji wyrobów tekstylnych do pilingu poprzez oddziaływanie wiązki światłowodowego lasera na

powierzchnię podłoży włókienniczych oraz sposób oceny tej tendencji za pomocą metody opartej o optyczną tomografię koherentną (OCT). Wiązka lasera o odpowiedniej mocy stabilizuje powierzchnię materiału i zmniejsza tendencję do odstawiania włókien przędzy od podłoża. Tkaniny niemodyfikowane i modyfikowane laserem oceniane są za pomocą OCT. Jest to metoda pozyskiwania obrazów, która umożliwia badanie próbek w sposób nieniszczący i bezdotykowy.

W trakcie badań dotyczących możliwości naniesienia struktur elektroprzewodzących na kompozyty tekstylne wyselekcjonowałam tekstylia laminowane teflonem. Jednakże ze względu na cechy charakterystyczne teflonu, uzyskanie cienkiej warstwy przewodzącej na jego powierzchni jest trudne. Do poprawy właściwości elektrycznych warstw metalicznych naniesionych metodą fizycznego osadzania próżniowego, zostały wykorzystane również efekty moich wcześniejszych prac wykonanych w Instytucie Systemów inżynierii Elektrycznej dotyczących opracowania metody laserowej modyfikacji powierzchni teflonu. W zależności od użytej mocy i długości fali wiązki laserowej obniżenie rezystywności cienkiej warstwy może wynosić nawet 50%. Wyniki prac zostały zaprezentowane w artykule [EKU-4].

Zastosowanie oddziaływania wiązki laserowej z różnorodnymi materiałami i nawiązana przeze mnie współpraca z naukowcami ze środowiska chemicznego zaowocowała wspólnymi badaniami nad modyfikacją powierzchni nanokompozytów elastomerowych z dodatkiem nanorurek węglowych. W wyniku modyfikacji laserowej po dobraniu optymalnych parametrów procesu teksturowania laserowego, uzyskano hydrofobowe materiały o wartościach kąta zwilżania powierzchni wodą do 147° , co jest bardzo wysoką wartością dla materiałów polimerowych (kąt 150° uznawany jest za próg superhydrofobowości). W przypadku kauczków zawierających nanorurki węglowe, ablacja laserowa spowodowała wygenerowanie struktury hierarchicznej poprzez odkrywanie ich aglomeratów. Wyniki prac zostały objęte ochroną patentową - Patent nr 231206 z dnia 13.02.2019 na wynalazek pt: "Sposób wytwarzania warstw superhydrofobowych na powierzchni kauczków akrylonitrylowego i butadienowo-styrenowego, zawierających nanorurki węglowe" oraz zostały opublikowane w artykule [EKU-5].

Publikacje

- [EKU-1] **Korzeniewska, E.**, Gałązka-Czarnecka, I., Czarnecki, A., Piekarska, A., Krawczyk, A. *Wpływ impulsowego pola elektrycznego na zawartość antocyjanów w winie* Przegląd Elektrotechniczny 2018, 94(1), pp. 57-60

MNiSW=14.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w tworzeniu koncepcji i założeń pracy, analizie literatury przedmiotu, na opracowaniu metodologii przeprowadzenia badań, przeprowadzeniu badań, opracowaniu wyników, pisaniu manuskryptu oraz pełnienia funkcji „osoba do kontaktu z Edytorem”. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 35%.

- [EKU-2] Gałązka-Czarnecka, I., **Korzeniewska, E.**, Czarnecki, A. *Wpływ impulsowego pola elektrycznego na barwę wina* Przegląd Elektrotechniczny 2018, 94(12), pp. 274-277

MNiSW=14.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w tworzeniu koncepcji i założeń pracy, analizie literatury przedmiotu, na opracowaniu metodologii przeprowadzenia badań, przeprowadzeniu badań, opracowaniu wyników, pisaniu manuskryptu oraz pełnienia funkcji „osoba do kontaktu z Edytorem”. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 33,3%.

- [EKU-3] Goćławski, J., Sekulska-Nalewajko, J., **Korzeniewska, E.**, Piekarska, A.: *The use of optical coherence tomography for the evaluation of textural changes of grapes exposed to pulsed electric field* Computers and Electronics in Agriculture 2017, 142, pp. 29-40

IF₂₀₁₇= 2,427, MNiSW=40.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w tworzeniu koncepcji i założeń pracy, przeprowadzeniu procesu technologicznego oddziaływania impulsowego pola elektrycznego na winogrona, na opracowaniu metodologii przeprowadzenia badań, przeprowadzeniu badań, opracowaniu wyników, pisaniu manuskryptu i przygotowaniu go do druku. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 35%.

- [EKU-4] **Korzeniewska E.**, Walczak M., Pawlak R.: *Laser modification of electrical properties of conductive layers made on teflon substrates*. Przegląd Elektrotechniczny, 2014, 90 (12) pp. 127-130

MNiSW=10

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na tworzeniu koncepcji i założeń pracy, na opracowaniu metodologii przeprowadzenia badań, przeprowadzeniu badań, opracowaniu wyników wpływu modyfikacji powierzchni teflonu na rezystancję warstw metalicznych wytworzonych metodą fizycznego osadzania próżniowego, pisaniu manuskryptu oraz pełnienia funkcji „osoba do kontaktu z Edytorem”. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 35%.

- [EKU-5] Siciński, M., **Korzeniewska, E.**, Tomczyk, M., Pawlak R., Bieliński D., Gozdek T., Kałuzińska, K., Walczak, M.: *Laser-textured rubbers with carbon nanotube fillers* Polymers 2018, 10(10),1091

IF₂₀₁₇= 2,935, MNiSW=40.

Mój wkład w powstanie tej pracy polegał na współudziale w tworzeniu koncepcji i założeń pracy, na opracowaniu metodologii przeprowadzenia badań, opracowaniu wyników, przygotowaniu zgłoszenia patentowego dotyczącego opracowanej technologii wytwarzania powierzchni superhydrofobowych, pisaniu manuskryptu oraz pełnienia funkcji „osoba do kontaktu z Edytorem”. Udział procentowy mojej pracy szacowany jest na 20%.

Literatura:

1. Schwarz A., Hakuzimana J., Westbroek P., De Mey G., Priniotakis G., Nyokong T., Van Langenhove L.: *A study on the morphology of thin copper films on para-aramid yarns and their influence on the yarn's electro-conductive and mechanical properties* Textile Research Journal 82(15) 1587-1596
2. Zeng W., Shu L., Li Q., Chen S., Wang F., Tao X.-M.: *Fiber-based wearable electronics: A review of materials, fabrication, devices, and applications*, Advanced Materials, vol. 26, no. 31, 2014, pp. 5310-5336
3. Šafářová V., Militký J.: *A Study of Electrical Conductivity of Hybrid Yarns Containing Metal Fibers*, Journal of Materials Science and Engineering B 2 (2) (2012) pp. 197-202
4. Wei Zeng , Lin Shu , Qiao Li , Song Chen , Fei Wang, Xiao-Ming Tao: *Fiber-Based Wearable Electronics: A Review of Materials, Fabrication, Devices, and Applications*, Advanced Materials 2014, 26, pp. 5310–5336
5. Dietzel Y., Przyborowski W., Nocke G., Offermann P., Hollstein F., Meinhardt J.: *Investigation of PVD arc coatings on polyamide fabrics*, Surface and Coatings Technology 135 2000 pp. 75-81
6. Kayaoglu B., Gocek I., Huseyin Kizil, Levent Trabzon: *Functional Nano and Micro-Scale Thin Film Deposition on Textiles: Emerging Technologies and Applications*, Journal of Textiles and Engineer, 2012, vol. 19 no 88, pp. 39-47
7. Snouqiang J., Newton E., Marcus Yuen C.-W., Kan C.-W.: *Application of chemical silver plating on polyester and cotton blended fabric*, Textile Research Journal, Volume 77, Issue 2, February 2007, pp. 85-91
8. Kovacik P., Del Hierro G., Livernois W., Gleason K.K.: *Scale-up of oCVD: Large-area conductive polymer thin films for next-generation electronics*, Materials Horizons, Volume 2, Issue 2, 2015, pp. 221-227
9. Ziája J., Koprowska J., Janukiewicz J.: *Using plasma metallisation for manufacture of textile screens against electromagnetic fields*, Fibres and Textiles in Eastern Europe, vol.16, no.5, 2008, pp. 64-66
10. Hegemann D., Amberg M., Ritter A., Heuberger M.: *Recent developments in Ag metallised textiles using plasma sputtering*, Materials Technology, vol. 24, no. 1, 2009, pp 41-45
11. Cui H.-W., Suganuma K., Uchida H.: *Highly stretchable, electrically conductive textiles fabricated from silver nanowires and cupro fabrics using a simple dipping-drying method*, Nano Research, vol. 8, no. 5, 2015, pp. 1604-1614
12. Gao, M., Li, L., Song, Y.: *Inkjet printing wearable electronic devices*, Journal of Materials Chemistry C, vol. 5, no. 12, 2017, pp 2971-2993
13. Stempień Z., Rybicki E., Rybicki T., Lesnikowski J., *Inkjet-printing deposition of silver electro-conductive layers on textile substrates at low sintering temperature by using an aqueous silver ions-containing ink for textronic applications*, Sensors and Actuators B: Chemical, vol. 224, 2016, pp 714–725

14. Lu Y., Liang Q., Li W.: *Fabrication of copper/modal fabric composites through electroless plating process for electromagnetic interference shielding*, Materials Chemistry and Physics, vol. 140, no. 2-3, 2013, pp. 553-558
15. Yan C., Zheng Z.: *The development of pad-dry-cure compatible method for preparing electrically conductive copper coated cotton woven fabrics*, Journal of Fiber Bioengineering and Informatics, vol. 6, no. 2, 2013, pp. 117-128
16. Jung-Sim Roh *Conductive Yarn Embroidered Circuits for System on Textiles*, 2018 In book: Wearable Technologies <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.76627>
17. Kiourti A., Volakis J. L.: *Colorful Textile Antennas Integrated into Embroidered Logos* Journal of Sensor and Actuator Networks 2015, 4, pp. 371-377; doi:10.3390/jsan4040371
18. Kowalczyk D., Brzezinski S., Kaminska I., Wrobel S., Mizerska U., Fortuniak W., Piorkowska E., Svyntkivska M., Makowski T.: *Electrically conductive composite textiles modified with graphene using sol-gel method*, Journal of Alloys and Compounds 784 (2019) 22-28
19. Ramamurthy P., Chellamani K. P., Dhurai B., Perumal S., Rajan T., Subramanian B., Santhini E.: *Antimicrobial Characteristics of Pulsed Laser Deposited Metal Oxides on Polypropylene Hydroentangled Nonwovens for Medical Textiles*, 2017 Fibres and Textiles in Eastern Europe 25(2):112-119 DOI: 10.5604/12303666.1228192
20. Zhao, H., Hou, L., Lu, Y.: *Electromagnetic shielding effectiveness and serviceability of the multilayer structured cuprammonium fabric/polypyrrole/copper (CF/PPy/Cu) composite*, Chemical Engineering Journal, vol. 297, 2016, pp. 170-179
21. Lacerda Silva, N., Gonçalves, L., Carvalho, H.: *Deposition of conductive materials on textile and polymeric flexible substrates*, Journal of Materials Science: Materials in Electronics, vol. 24, no. 2, 2013, pp 635-643

Zestawienie wybranych osiągnięć z podziałem na okres przed i po uzyskaniu tytułu doktora nauk technicznych

Lp.	Rodzaj pracy	Przed doktoratem	Po doktoracie	Suma
1	Artykuły z listy JCR	0	28	28
2	Artykuły na liście MNiSW lista B	0	33	33
3	Zgłoszenia patentowe krajowe	0	2	2
4	Zgłoszenia patentowe europejskie	0	0	0
5	Przyznane patenty krajowe	0	1	1
6	Referaty na konferencjach krajowych i zagranicznych	10 konferencji	25 konferencji	35
7	Zagraniczne staże naukowe	0	1	1