

Kierunki rozwoju wyrobów użytkowych z wykorzystaniem tekstyliów elektroprowadzących

W ostatnich latach można zaobserwować znaczący rozwój koncepcji Internetu Rzeczy, zgodnie z którą otaczające nas urządzenia elektroniczne mogą się ze sobą komunikować i wymieniać między sobą dane. Typowe urządzenia elektroniczne są sztywne, mają budowę trójwymiarową i charakteryzują się określoną masą, co często stanowi istotne ograniczenie w odniesieniu do możliwości ich zastosowania jako urządzeń noszonych przez człowieka do monitorowania jego stanu fizjologicznego lub parametrów bezpośrednio otaczającego go środowiska. W związku z tym, dynamicznie rozwijającym się kierunkiem badań są tekstylia elektroprowadzące, łączące w sobie funkcje urządzeń elektronicznych z właściwościami materiałów włókienniczych. Tekstylia te zastosowane w inteligentnej odzieży mogłyby wspomagać funkcjonowanie człowieka zarówno w życiu codziennym, jak i w środowisku pracy.

Inteligentna odzież nie powinna różnić się wizualnie od tradycyjnej odzieży, bez zintegrowanej elektroniki. Prowadzone są liczne badania nad opracowaniem technologii integracji materiałów elektroprowadzących z materiałami włókienniczymi, która zapewniłaby odpowiednie do zastosowania właściwości elektryczne, jak również ich trwałość podczas użytkowania.

Tekstylne wyroby elektroprowadzące

W związku ze znaczącym zainteresowaniem tekstylnymi materiałami elektroprowadzącymi, w ramach prac komitetu technicznego CEN/TC 248 „Textiles and Textile Products” grupy roboczej WG 31 Smart Textiles, podjęte zostały działania ukierunkowane na usystematyzowanie stosowanych w tym zakresie pojęć. W ich wyniku opracowano i wydano raport techniczny ISO/TR 23383:2020¹, dotyczący tekstyliów inteligentnych, a prace nad raportem

¹ISO/TR 23383:2020 Textiles and textile products – Smart (Intelligent) textiles – Defi-

niacjami, categorisation, applications and standardization needs.
²Rambausek, L. Textronics Definition, Development and Characterization of Fibrous Organic Field Effect Transistors. PhD Dissertation, 2014, Ghent University, Belgium.
³Qu, H., Skorobogaty, M., Conductive polymer yarns for electronic textiles, [w:] Dias, T., Electronic Textiles. Smart Fabrics and Wearable Technology, Woodhead Publishing Series in Textiles, Cambridge, UK, 2015, pp. 21-44.

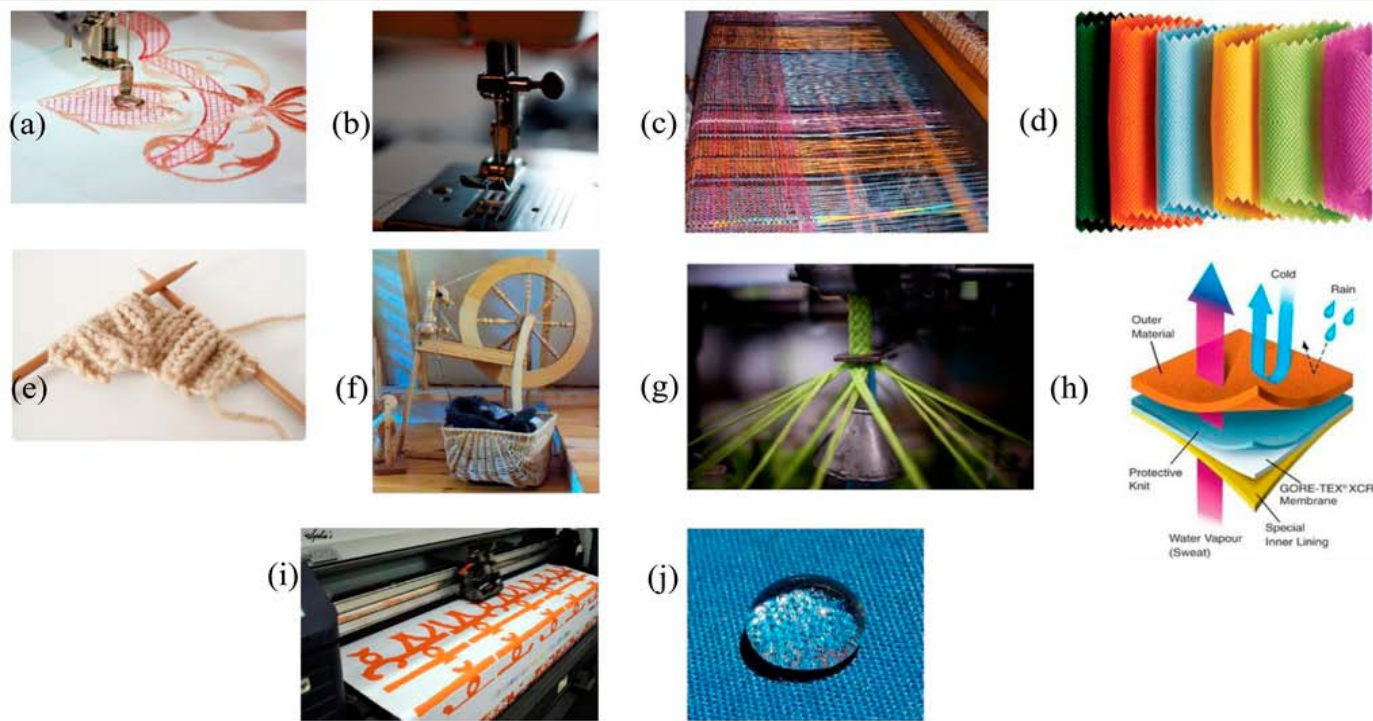
poświęconym tekstyliom ze zintegrowaną elektroniką i technologiami informacyjno-komunikacyjnymi (ang. ICT) są w toku. Oprócz tekstylnych wyrobów, które przewodzą prąd elektryczny, wyróżnia się bowiem również e-tekstylia (ang. *electronic textiles*, *e-textiles*), przez co należy rozumieć tradycyjne materiały włókiennicze ze zintegrowanymi obwodami elektrycznymi, mającymi modyfikować ich funkcje. Jeszcze szerszą grupę stanowią tekstylia inteligentne, które wykazują zamierzoną i możliwą do wykorzystania reakcję na zmiany w bezpośrednim otoczeniu lub na skutek zadanego sygnału^{1,2,3}.

Oznacza to, że tekstylia elektroprowadzące stanowią najbardziej zawężoną grupę wyrobów spośród wymienionych, a pojęcia „tekstylne wyroby elektroprowadzące”, „e-tekstylia” oraz „materiały inteligentne” nie powinny być używane wymiennie.

W artykule dokonano przeglądu technik nadawania tekstyliom właściwości elektroprowadzących, jak również gotowych rozwiązań opracowanych z ich wykorzystaniem. Wyniki przeprowadzonej analizy pozwoliły na wskazanie kierunków dalszego rozwoju wyrobów użytkowych z wykorzystaniem tekstyliów elektroprowadzących.

Techniki nadawania tekstyliom właściwości elektroprowadzących

W celu uzyskania właściwości elektroprowadzących w materiale włókienniczym stosowane są różne techniki (rys. 1.), które realizowane mogą być



Rys. 1. Wybrane techniki nadawania tekstyliom właściwości elektroprowadzących²: a) haft, b) szycie, c) tkanie, d) formowanie włókien, e) dzianie, f) przędzenie, g) oplatanie, h) powlekanie/laminowanie, i) drukowanie, j) obróbka chemiczna

na wielu etapach wytwarzania materiału – począwszy od procesu obróbki włókien, po procesy wykończalnicze gotowego wyrobu^{4,5}.

Pierwsza grupa technik dotyczy metod, w których wyrób włókienniczy uzyskuje właściwości elektroprowadzące dzięki wykorzystanym w nim włóknom lub przędzy. Do tego celu wykorzystywane są włókna i przędzie elektroprowadzące. Biorąc pod uwagę zdolność do przewodzenia prądu, wyróżnia się następujące grupy włókien elektroprowadzących⁶:

- włókna o małej rezystancji ($10^{-6} \div 10^{-1}$) Ω/m , np. włókna metalowe
- włókna o średniej rezystancji ($10^{-1} \div 10^{-2}$) Ω/m , np. włókna węglowe
- włókna o dużej rezystancji ($10^2 \div 10^4$) Ω/m , np. polimery zawierające proszek węglowy lub siarczki miedzi.

W celu uzyskania właściwości elektroprowadzących przędzy, najczęściej stosuje się bazę z surowca nieprzewodzącego prądu lub słabo przewodzącego prąd (np. bawełna, poliester lub poliakrylonitryl), która następnie jest powlekana metalem, węglem lub elektroprowadzącym polimerem (np. PEDOT:PSS). Tak wykonane liniowe wyroby włókiennicze wprowadzane są do struktury płaskiego wyrobu włókienniczego na etapie jego wytwarzania, tj. w zależności od asortymentu – w trakcie tkania, dziania, bądź formowania włókniny^{4,5,6}.

Rozwiązanie, w którym materiał elektroprowadzący naniesiony jest na włókna, z których potem została wykonywana przędza, a następnie tkanina, zaproponował m.in. Akbarow z zespołem⁷. W rozwiązaniu tym zastosowano nikiel na włóknach poliakrylonitrylowych (PAN). Włókna poddawano kąpeli w NiCl_2 oraz COCl_2 , a następnie suszono przez 20 min w 413 K. Podobną metodę zastosowali Tscada z zespołem⁸. Elektroprowadzący polielektrolit, poli(3,4-etylenodiotyiofen) poli(styrenosulfonian) (PEDOT-PSS), był elektrochemicznie łączony z przędzą jedwabną. Po dodaniu glicerolu uzyskano dodatkowo wzrost przewodności elektrycznej z 0,00117 S/cm (rezystancja 2,62 M Ω/cm) na 0,102 S/cm (20,6 k Ω/cm). Znane są również rozwiązania, w których stosowane są przędzie wykonane z włókien metalowych, otrzymanych w wyniku plastycznej obróbki metali na zimno (najczęściej ze stali, srebra, miedzi, mosiądzu, niklu lub stopów tych metali)⁴. Zamiast nanoszenia na podłoże polimerów elektroprowadzących można je syntezować bezpośrednio na materiale lub włóknie⁹. W pracach Kuhna materiał lub włókno było zanurzane w płynnym roztworze polimeru i na powierzchni materiału w obecności czynnika utleniającego powstawała powłoka polimeru elektroprowadzącego. Z kolei Schwarz ze współpracownikami¹⁰ w swoich badaniach pokrywali włókna paraaramidowe miedzią. Miedź wykazuje dobrą przyczepność do polipyrrolu, dlatego na włókno nanoszono najpierw warstwę polipyrrolu, a następnie warstwę miedzi. Wraz ze wzrostem czasu nanoszenia rosła grubość warstwy miedzi i spadała ekspotencjalnie rezystancja włókien. Jednak jak wynika z danych literaturowych¹¹, stosowanie na tekstyliach naniesienia z miedzi jest obciążone ryzykiem, gdyż miedź jest niestabilna termodynamicznie w warunkach atmosferycznych.

Kolejną grupę technik stanowią metody, w których elektroprowadzące wyroby włókiennicze (najczęściej liniowe – tj. przędza) integrowane są z tradycyjnymi płaskimi wyrobami włókienniczymi poprzez haft lub naszywanie⁴.

⁴ Tokarska, M. Nowe podejście do oceny właściwości elektroprowadzących włókienniczych struktur anizotropowych. Politechnika Łódzka: Zeszyty Naukowe 2015, 1135.

⁵ Stoppa, M., Chiolerio A. Wearable electronics and smart textiles: a critical review. Sensors, 2014, 14, 11957-11992; <https://doi.org/10.3390/s140711957>

⁶ Borowik, L., Jakubas A. Pomiar wybranych parametrów elektrycznych materiałów włókienniczych do zastosowań w odzieży inteligentnej. Przegląd Elektrotechniczny 2015, 91,1: 115-117 doi:10.15199/48.2015.01.22

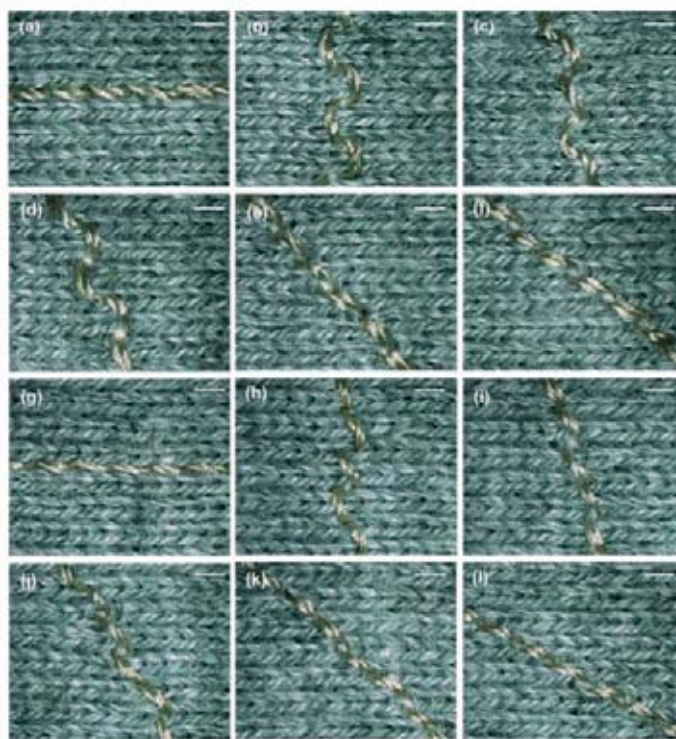
⁷ Akbarov, D., Bakhodir, B., Akbarov, R., Westbroek, P., De Clerk, K., Kiekens P. Optimizing Process Parameters in Polyacrylonitrile Production for Metallization with Nickel, Textile Research Journal 2005,75.3: 197-202.

⁸ Tscada, S., Nakashima, H., Torimitsu, K. Electroconductive Polymer Combined Silk Fiber Bundle for Bioelectrical Signal Recording, PLoS One 2012,7.4.

⁹ Kuhn, H.H., Kimbrell, W.C. Jr. Electrically conductive textile materials and method for making same", US Patent 4803096, 1987.

¹⁰ Schwarz, A., Hakuzimana, J., Westbroek, P., De Mey, G., Priniotakis G. et al. 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 2012,82.15: 1587-1596.

¹¹ Parka, K., Kim, B., Jeong, D., Moon, S., Kim J. Copper conductive patterns by inkjet printing, Elsevier journal, Second International Conference on Multifunctional, Hybrid and Nanomaterials 2007,515,19: 7401-7720.



Rys. 2. Widok próbek dzianin z wprowadzoną przędzą elektroprowadzącą techniką haftu²

Metody te również cieszą się dużym zainteresowaniem z uwagi na możliwość łatwego i precyzyjnego sterowania przebiegiem ścieżki elektroprowadzącej. Zheng z zespołem¹² wskazują jednak na istotę doboru prawidłowych parametrów haftu w aspekcie zapewnienia jednolitych właściwości wprowadzonych tą techniką ścieżek i zabezpieczenia przed uszkodzeniem powleczenia elektroprowadzącego przędzy. Autorzy w swojej pracy oceniali wygląd próbek, stabilność wymiarów i rezystancję elektryczną ścieżek, biorąc pod uwagę prędkość haftu, długość ściegu, napięcie wstępne przędzy oraz kierunek haftu. Badania wykazały, że ścieżki wykonane w kierunku kolumnienek dzianiny charakteryzowały się większą jednorodnością niż w przypadku pozostałych analizowanych kierunków. Widok wykonanych próbek przedzianin ze ścieżkami elektroprowadzącymi wykonanymi techniką haftu przedstawiono na rys. 2.

Z kolei technikę integracji materiałów elektroprowadzących z tradycyjnymi tekstyliami za pomocą szycia wykorzystał w swojej pracy Leśnikowski¹³, który ocenił możliwość wykorzystania tej techniki do wykonania tekstylnych linii sygnałowych. W rozwiązaniu tym linie sygnałowe wykonane z elektroprowadzącego płaskiego wyrobu włókienniczego nazywane były na podłożu tekstylnie nieprzewodzące. Leśnikowski¹⁴ analizował także wpływ temperatury i wilgotności na zdolności transmisyjne linii sygnałowych wykonanych w opisany powyżej sposób. W badaniach tych wykazano istotny wpływ podłoża tekstylnego na zmiany w charakterystycznej impedancji linii pod wpływem wilgotności.

Ostatnią grupą technik nadawania tekstyliom właściwości elektroprowadzących jest modyfikacja powierzchni tradycyjnego płaskiego wyrobu włókienniczego⁴. Ronghui¹⁵ opracował metodę nanoszenia warstw miedzi i niklu na tkaninę poliestrową z wykorzystaniem techniki galwanizacji bez-

¹² Zheng, Y., Jin, L., Qi, J., Liu, Z., Xu, L., Hayes, S., Gill, S., Li, Y. Performance evaluation of conductive tracks in fabricating e-textiles by lock-stitch embroidery, Journal of Industrial Textiles, 2020. <https://doi.org/10.1177/1528083720937289>

¹³ Leśnikowski, J. Analysis of characteristic impedance of microstrip and coplanar textile signal lines. The Journal of The Textile Institute 2020. <https://doi.org/10.1080/00405000.2020.1784501>

¹⁴ Leśnikowski, J. Effect of temperature and humidity on the transmission properties of textile signal lines The Journal of The Textile Institute 2020,111,4: 604-610. <https://doi.org/10.1080/00405000.2019.1658851>

¹⁵ Ronghui G. A study of optimizing processes for metallized textile design application. Praca doktorska, The Hong Kong Polytechnic University, 2010.

prądowej (tj. elektrolitycznego osadzania metalu na powierzchni) – tkanina ta była niklowana chemicznie w NiSO_4 . Podejmowane są również prace w zakresie nanoszenia materiałów elektroprowadzących na podłoża tekstylne metodą napyłania magnetroneowego¹⁶ (tj. metoda fizycznego osadzania warstw z fazy gazowej – PVD, *physical vapour deposition*), która pozwala na uzyskanie jednolitej metalicznej powłoki⁴.

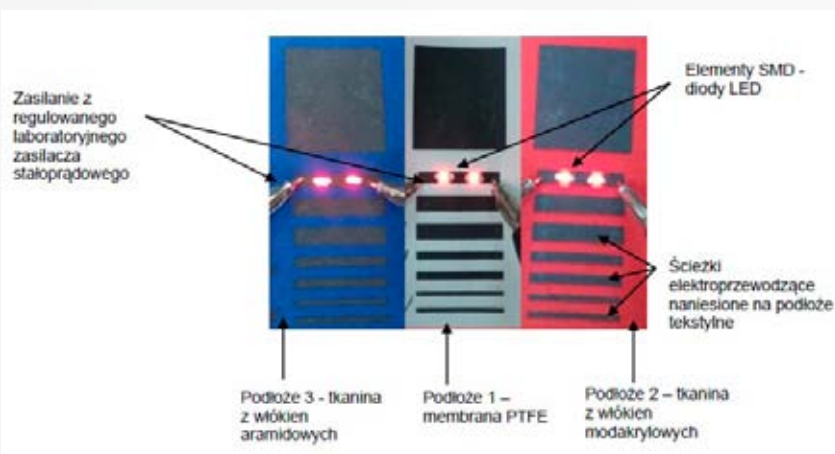
Z przeglądu literatury wynika, że w badaniach materiały elektroprowadzące nanoszono również metodą sitodruku. W pracy Kazani i współpracowników¹⁷ nanoszono pasty z cząstkami srebra (Electrodag PF 410 firmy Acheson oraz 5025 firmy DuPont) na tkaniny o różnym składzie surowcowym (bawełna, wiskoza, poliamid, poliester mieszanki bawełna/poliester oraz wiskoza/poliester). Autorzy stwierdzili, że rezystancja uzyskanych nanoszeń zależała od podłoża tekstylnego. Dla jednego rodzaju pasty uzyskano różne rezystancje na różnych podłożach. Stwierdzono również, że dla każdej z past inne było jej rozprowadzenie na materiałach. Ponadto stwierdzono, że rezystancja pasty na tkaninie jest znacznie wyższa niż deklarowana przez producenta, co może się wiązać z faktem, że pasta wnika w strukturę tkaniny a wartość podawana przez producenta dotyczy pomiarów na płaskim i gładkim podłożu.

Autorzy badali również rezystancję nanoszeń po symulacji użytkowania, tj. po ścieraniu oraz praniu. Po cyklach ścierania tkaną wełnianą stwierdzono względną zmianę rezystancji od 14% do 579%. Po cyklach prania również stwierdzono znaczny wzrost rezystancji. W celu zabezpieczenia nanoszenia przed uszkodzeniem w wyniku ścierania lub prania, autorzy zastosowali powłokę z termoplastycznego poliuretanu o grubości 80 μm , co pozwoliło uzyskać dla dwóch z ośmiu materiałów brak zmiany rezystancji po praniu. Dużym zainteresowaniem cieszy się także technika nanoszenia warstw elektroprowadzących za pomocą drukarek cyfrowych, wykorzystująca do tego celu dyspersje elektroprowadzących polimerów, czy atramentów z nanocząstkami metali⁴. Widok przykładowych drukowanych na podłożach tekstylnych obwodów elektronicznych wykonanych w ramach projektu realizowanego w CIOP-PIB przedstawiono na rys. 3.

Stempień z zespołem¹⁸ sprawdzali właściwości warstw elektroprowadzących wykonanych z wykorzystaniem tuszu bazującego na nanocząstkach srebra nadrukowanego na różne podłoża tekstylne: naturalne, syntetyczne, mineralne i mieszanki z jednoczesnym spiekaniem w 130 °C podczas drukowania. Rezystancję powierzchniową wykonanych materiałów oceniano również po zginaniu, ścieraniu, praniu i czyszczeniu chemicznym, a na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono dobrą odporność wykonanych warstw elektroprowadzących na procesy niszczące towarzyszące użytkowaniu odzieży.

W przedstawionych doniesieniach literaturowych wykazano, jak wiele prac prowadzono w kierunku opracowania tekstylnych wyrobów elektroprowadzących. W wyniku postępu w zakresie technik nadawania właściwości elektroprowadzących materiałom włókienniczym można uzyskać oczekiwaną rezystancję materiału nie tylko w stanie nowym: materiały te utrzymują również swoje właściwości w symulowanych procesach starzeniowych odzwierciedlających ich przewidywane użytkowanie (tj. pranie, zginanie, ścieranie).

Powoduje to, iż podejmowane są prace nad wykorzystaniem tych rozwiązań w praktyce, a w szczególności – w odzieży inteligentnej, gdzie częściowo sztywne elementy elektroniczne zastępowane są przez materiały elastyczne, bazujące na tekstyliach elektroprowadzących.



Rys. 3. Przykładowe drukowane obwody elektroniczne w formie naniesionych na trzy podłoża tekstylne ścieżek elektroprowadzących (z zawartością nanorurek węglowych w PMMA), z elementami SMD (Surface Mounted Devices) w formie diod LED
Źródło: oprac. własne.

Wyroby użytkowe wykorzystujące tekstylnie elektroprowadzące

Z danych Global Market Insights¹⁹ z 2017 r. wynika, że rynek odzieży inteligentnej bazującej na tekstyliach elektroprowadzących w okresie od 2016 r. do 2024 r. może odnotować wzrost z 179 mln USD nawet do 4 mld USD, a jako główne czynniki napędzające rynek wskazano:

- wzrost świadomości w zakresie zdrowia w Europie
- wzrost liczby obrażeń towarzyszących uprawianiu sportu w USA
- zwiększone wykorzystanie przez profesjonalnych sportowców w Ameryce Północnej i Brazylii
- wzrost liczby obrażeń na stanowiskach pracy w Azji i krajach Bliskiego Wschodu oraz Afryki
- rozwój technologii sensorów w Chinach i Tajwanie
- wdrażanie zastosowania inteligentnej odzieży w różnych sektorach gospodarki w Ameryce Północnej i Europie
- zwiększające się zainteresowanie wdrożeniem inteligentnej odzieży w zastosowaniach wojskowych w Ameryce Północnej i Azji.

Materiały tekstylne o właściwościach elektroprowadzących mogą być stosowane w odzieży jako ścieżki doprowadzające energię elektryczną, ścieżki sygnałowe linii transmisyjnych, mogą być wykorzystywane do konstrukcji różnorodnych czujników, jak również chronić przed nadmiernym wpływem pola elektromagnetycznego²⁰.

W odniesieniu do wyrobów użytkowych bazujących na tekstyliach elektroprowadzących, na szczególną uwagę zasługuje inteligentna odzież do monitorowania stanu fizjologicznego użytkownika. Odzież taka znajduje bowiem zastosowanie zarówno w sporcie – do monitorowania wydolności sportowca i poprawy jego osiągnięć, jak i w opiece zdrowotnej, wojsku i przemyśle – do monitorowania stanu zdrowia pacjenta, żołnierzy oraz pracowników i zapewnienia im odpowiedniej opieki.

Angelucci z zespołem²¹ zidentyfikowała i skategoryzowała parametry fizjologiczne, które mogą być monitorowane za pomocą inteligentnej odzieży, jak również wskazała typowe rozmieszczenie w odzieży czujników niezbędnych do tego celu (rys. 4.).

¹⁶ Ziąja, J., Koprowska, J., Janukiewicz, J., Using Plasma Metallisation for manufacture of Textile Screens Against Electromagnetic Fields, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2008, 16, 5(70): 64-66.

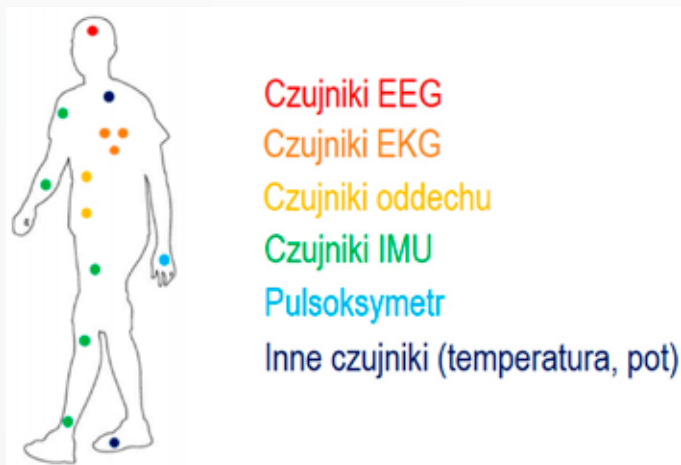
¹⁷ Kazani, I., Hertleer, C., De Mey, G., Schwarz, A., Guxho, G., Van Langenhove, L. Electrical Conductive Textiles Obtained by Screen Printing, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2012, 20, 1 (90).

¹⁸ Stempień, Z., Rybicki, E., Patykowska, A., Rybicki, T., Szykowska, M.I. Shape-programmed inkjet-printed silver electro-conductive layers on textile surfaces, *Journal of Industrial Textiles* 2017, 47, 6: 1321-1341.

¹⁹ <https://www.gminsights.com/industry-analysis/smart-clothing-market> (dostęp z dnia: 23.03.2021 r.)

²⁰ Tokarska, M. Nowe podejście do oceny właściwości elektroprowadzących włókienniczych struktur anizotropowych. *Politechnika Łódzka: Zeszyty Naukowe* 2015, nr 1135.

²¹ Angelucci, A., Cavicchioli, M., Cintorino, I.A., Lauricella, G., Rossi, C., Strati, S., Aliverti, A. Smart Textiles and Sensorized Garments for Physiological Monitoring: A Review of Available Solutions and Techniques, *Sensors* 2021, 21, 814. <https://doi.org/10.3390/s21030814>



Rys. 4. Typowy rozkład czujników w inteligentnej odzieży z funkcją monitorowania stanu człowieka²¹

W swojej publikacji Angelucci²¹ wydzieliła następujące kategorie parametrów fizjologicznych: biopotencjały, do których należą parametry związane z aktywnością mózgu (elektroencefalografia – EEG), serca (elektrokardiografia – EKG) i mięśni (elektromiografia – EMG), parametry związane z oddechem (w szczególności: saturacja oraz wentylacja minutowa), parametry związane z fizjologiczną homeostazą organizmu (tj. temperatura i skład chemiczny potu). Na rynku dostępne są już rozwiązania, które pozwalają na monitorowanie wybranych parametrów fizjologicznych, w tym w szczególności w zakresie aktywności serca (np. AiQ Smart Clothing, Medtronics-Zephyr Performance Systems, Chronolife SAS-KeeSense).

Nieco inną grupę odzieży inteligentnej, która również jest w fazie dynamicznego rozwoju, stanowi odzież ochronna, a największy postęp w tej dziedzinie można zaobserwować w przypadku odzieży ochronnej dla strażaków²². W tym zakresie zrealizowano szereg projektów międzynarodowych (np. i-Protect, PROeTEX, ProFiTex, Smart@Fire), ukierunkowanych na opracowanie bezprzewodowej sieci czujników w obrębie inteligentnej odzieży ochronnej dla strażaków, z uwzględnieniem: monitorowania stanu fizjologicznego, monitorowania wybranych parametrów środowiskowych (np. temperatura otoczenia, strumień ciepła, stężenie gazów), lokalizacji oraz systemów alarmowych z wizualizacją danych.

Czynnikiem hamulcowym we wdrażaniu tego rodzaju rozwiązań jest jednak brak wymagań normatywnych, odnoszących się do inteligentnej odzieży ochronnej. Problem ten został jednak dostrzeżony przez Komisję Europejską i w ramach mandatu M/553 z dnia 6 stycznia 2017 r. rozpoczęto prace normalizacyjne dotyczące odzieży chroniącej przed czynnikami gorącymi ze zintegrowanymi inteligentnymi tekstyliami i elementami nietekstylnymi, wspomagającymi zapewnienie bezpieczeństwa użytkownika. W wyniku wspólnych działań komitetów technicznych z obszaru tekstyliów inteligentnych, ergonomii, odzieży ochronnej oraz elektroniki noszonej zostały opracowane trzy dokumenty poświęcone: 1) zdefiniowaniu pojęć odnoszących się do inteligentnej odzieży ochronnej, 2) sformułowaniu wytycznych dotyczących prawidłowego jej doboru, stosowania i konserwacji, 3) sformułowaniu wymagań dla inteligentnej odzieży chroniącej przed czynnikami gorącymi oraz określeniu metod badań do jej oceny. Dokumenty te mają jeszcze obecnie status roboczych i są na etapie opiniowania, a ich publikacja przewidziana jest na 2021 r.

Przyszłość tekstylnej odzieży inteligentnej

Z przeprowadzonego przeglądu literatury wynika, że pomimo wielu badań, przeprowadzonych w zakresie opracowania tekstyliów elektroprzewodzących oraz prób wykonania linii transmisyjnych, ciągle pozostaje wiele kwestii, któ-

rych rozwiązanie umożliwi ograniczenie liczby elementów nietekstylnych, stosowanych w odzieży inteligentnej, a tym samym poprawi jej walory użytkowe.

Jeden z istotnych problemów stanowią łączenia elementów elektronicznych z tekstyliami elektroprzewodzącymi. Bardzo trudno jest uzyskać połączenia trwałe, o odpowiedniej rezystancji i odporne na działania mechaniczne²³. Najczęściej wykorzystywane metody to stosowanie metalowych nap lub zszywanie elementów nićmi elektroprzewodzącymi. Na Politechnice Łódzkiej zrealizowano projekt, w którym opracowano elektroprzewodzące taśmy samoczepne do zastosowania w układach tekstronicznych²⁴, ale nie są one dostępne w ofercie handlowej.

Kolejny problem stanowi precyzja nanoszenia ścieżek elektroprzewodzących. Przy metodzie nanoszenia warstw elektroprzewodzących na cały materiał, a następnie usuwania wybranych części elektroprzewodzących, trudno o osiągnięcie precyzji umieszczenia ścieżek elektroprzewodzących. Bardzo dużą trudność stanowi również uzyskanie odporności tekstylnej linii transmisyjnej na cykle konserwacji oraz działania mechaniczne. Dotyczy to zwłaszcza nanoszenia na tekstylia cząstek metali metodą magnetronową. Uzyskuje się naniesienia nieelastyczne i o niskiej odporności na działania mechaniczne.

Ponadto, jak wynika z literatury, przy tej metodzie nanoszenia materiału elektroprzewodzącego zaobserwowano ograniczenia w szerokości wykonania ścieżek elektroprzewodzących. Dobre wyniki w zakresie niskiej rezystywności materiału po ścieraniu i praniu uzyskano w przypadku nanoszenia past elektroprzewodzących metodą sitodruku i zabezpieczania ich kolejną warstwą z termoplastycznego poliuretanu. Z przeglądu literatury wynika również, że zastosowanie jednego wariantu naniesienia na różnych podłożach tekstylnych o różnych splotach, gęstości wątku oraz osnowy przynosi rezultaty w postaci różnych rezystancji oraz odporności na użytkowanie i bez przeprowadzenia prób nie można przewidzieć końcowego efektu.

Stosowanie włókien elektroprzewodzących do opracowania układów obwodów elektrycznych wydaje się być najbardziej uzasadnione z punktu widzenia odporności na konserwację oraz działania mechaniczne, ale generuje techniczne trudności w masowej produkcji. W tym kontekście obiecującym kierunkiem wydaje się więc nanoszenie tuszu elektroprzewodzącego na tekstylia z wykorzystaniem techniki druku cyfrowego, gdzie po odpowiedniej modyfikacji można uzyskać dobrą trwałość i precyzję nadruku, przy jednoczesnym łatwym do zapewnienia przeskalowaniu technologii na masową produkcję.

Podsumowując, można stwierdzić, że w ostatnich latach nastąpił znaczący rozwój elektroniki opartej na tekstyliach, jednakże elementy nietekstylne wciąż stanowią znaczącą część odzieży inteligentnej. Oznacza to, że powinny być prowadzone dalsze badania, dzięki którym odzież inteligentna przyszłości będzie w pełni tekstylna, nie będzie wymagała wykonywania dodatkowych czynności w związanych z jej użytkowaniem, wizualnie nie będzie się wyróżniać od tradycyjnej odzieży i będzie trwała, tj. odporna na użytkowanie, w tym również na szczególnie trudne warunki środowiska pracy (np. w przypadku strażaków, czy niektórych gałęzi przemysłu).

²³ Stęplewski, W., Borecki, J., Kozioł, G., Serzysko, T., Dziedzic, A. Integracja biernych elementów elektronicznych i układów elektronicznych z płytką obwodu drukowanego, *Elektronika: konstrukcje, technologie, zastosowania* 2013, Vol. 54, nr 9, 99-102.

²⁴ Zięba, J., Frydrysiak, M., *Tekstylny system do elektroterapii*, patent nr 218735 (nr zgłoszenia 392827).

dr Agnieszka Tabaczyńska, OPTEX S.A.
 Kontakt: a.tabaczynska@optex.pl

dr inż. Anna Dąbrowska
 (ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4295-3005>)

Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy
 Kontakt: andab@ciop.lodz.pl

Publikacja opracowana na podstawie wyników III etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, sfinansowanego w latach 2014-2016 w zakresie badań naukowych i prac rozwojowych ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego/Narodowego Centrum Badań i Rozwoju. Koordynator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy.

²² Dąbrowska, A. Smart firefighting clothing, [w:] Song G., Wang F. (eds.), *Firefighter's Clothing and Equipment: Performance, Protection and Comfort*, Taylor & Francis Group (CRC Press), Boca Raton 2019, 328: 307-328.