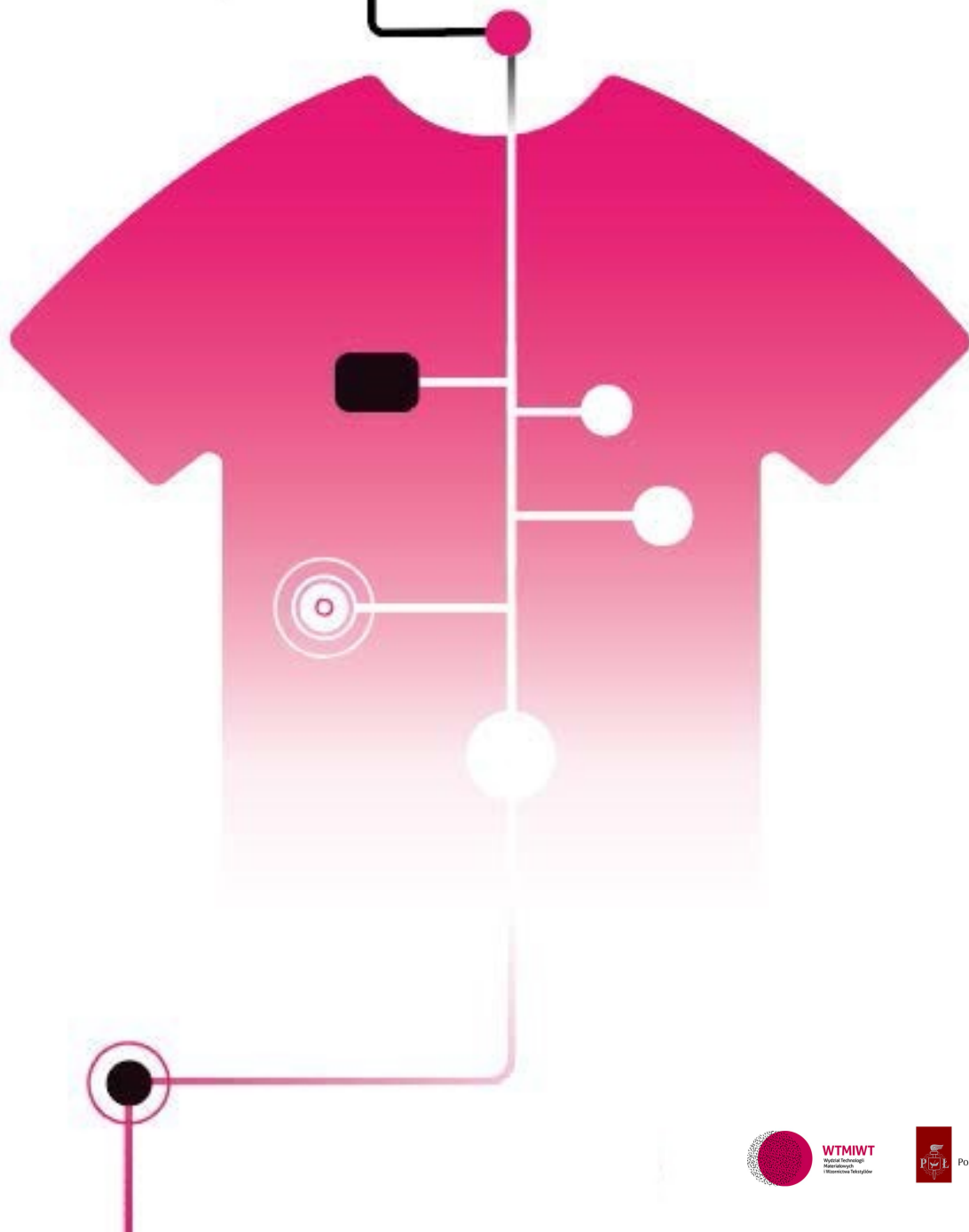




Innowacyjne
materiały
i technologie
w inżynierii
materiałowej
tekstyliów

XXI Konferencja Naukowa Wydziału Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów



**XXI Konferencja Naukowa
Wydziału Technologii Materiałowych
i Wzornictwa Tekstyliów**

**Innowacyjne materiały i technologie
w inżynierii materiałowej tekstyliów**

Monografia

Łódź 2022

Recenzenci:

prof. dr hab. inż. Iwona Frydrych
prof. dr hab. inż. Małgorzata Matusiak
prof. dr hab. inż. Marek Kozicki
dr hab. inż. Eulalia Gliścińska, prof. uczelni
dr hab. inż. Ewa Skrzetuska, prof. uczelni
dr hab. inż. Marcin Barburski, prof. uczelni
dr hab. inż. Zbigniew Draczyński, prof. uczelni
dr hab. inż. Piotr Kulpiński, prof. uczelni
dr hab. inż. Zbigniew Mikołajczyk, prof. uczelni
dr hab. Michał Puchalski, prof. uczelni
dr hab. inż. Grzegorz Szparaga
dr hab. Adam Puszkarz

Projekt okładki:

Martyna Berezowska

Redakcja naukowa:

dr hab. Michał Puchalski, prof. uczelni
dr hab. inż. Jacek Leśnikowski

Skład:

dr hab. inż. Jacek Leśnikowski

© Copyright by Politechnika Łódzka, Łódź 2022

ISBN 978-83-66741-80-5

DOI 10.34658/9788366741805

Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej
93-005 Łódź, ul. Wólczańska 223
Tel. 42-631-20-87, 42-631-29-52
E-mail: zamowienia@info.p.lodz.pl
www.wydawnictwo.p.lodz.pl

Komitet Naukowy Konferencji

prof. dr hab. inż. Katarzyna Grabowska

Dziekan WTMiWT PŁ – Przewodnicząca

dr hab. inż. Zbigniew Mikołajczyk, prof. uczelni

Prodziekan WTMiWT PŁ ds. Rozwoju

dr hab. inż. Zbigniew Stempień, prof. uczelni

Dyrektor Instytutu Architektury Tekstyliów PŁ

prof. dr hab. inż. Izabella Krucińska

Dyrektor Instytutu Materiałoznawstwa Tekstyliów i Kompozytów
Polimerowych PŁ

prof. dr hab. inż. Ryszard Korycki

Kierownik Katedry Katedra Inżynierii Mechanicznej, Informatyki Technicznej
i Chemii Materiałów Polimerowych PŁ

prof. dr hab. inż. Łukasz Kaczmarek

Przewodniczący Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa PŁ, Dyrektor
Instytutu Inżynierii Materiałowej PŁ

dr hab. inż. Katarzyna Majchrzycka, prof. CIOP PIB

Kierownik Zakładu Ochron Osobistych CIOP PIB w Łodzi

dr Radosław Dziuba

Dyrektor Łukasiewicz - Łódzki Instytut Technologiczny

dr hab. inż. Marcin Struszczyk, prof. ITB „MORATEX”

Dyrektor Instytutu Technologii Bezpieczeństwa „MORATEX” w Łodzi

dr hab. Małgorzata Zimniewska, prof. IWNiRZ

Dyrektor Instytutu Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich w Poznaniu

dr hab. Arkadiusz Adameczyk, prof. nadzw.

Dyrektor Instytutu, Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Przemysłu
Skórzanego w Łodzi

dr hab. inż. Janusz Juraszek, prof. ATH

Dziekan Wydziału Inżynierii Materiałów, Budownictwa i Środowiska,
Akademia Techniczno-Humanistyczna w Bielsku-Białej

dr hab. inż. Marcin Kostrzewa, prof. UTH Rad.

Dziekan Wydziału Inżynierii Chemicznej i Towaroznawstwa, Uniwersytet
Technologiczno-Humanistyczny im. K. Puławskiego w Radomiu

Komitet Organizacyjny Konferencji

dr hab. Michał Puchalski, prof. uczelni – Przewodniczący

dr hab. inż. Marcin Barbarski, prof. uczelni

dr hab. inż. Jacek Leśnikowski

dr inż. Iwona Nowak

dr inż. Elżbieta Sąsiadek

dr inż. Malwina Jaszczak

mgr inż. Małgorzata Gieldowska

mgr inż. Aleksandra Walkowska

Spis treści

B. Niekraszewicz, A. Sochacka, Włókna celulozowe z udziałem alginianu	5
E. Pabjańczyk-Wlazło, M. Chrzanowski, G. Szparaga, Właściwości mechaniczne pianek na bazie hialuronianu sodowego	12
E. Sąsiadek-Andrzejczak, M. Kozicki, Smart Paper	21
E. Śmiechowicz, M. Strzelińska, Zielona synteza nanocząstek srebra w modyfikacji włókien celulozowych typu Lyocell	27
M. Olesińska, G. Szparaga, Ocena zawartości srebra w wybranej grupie wyrobów biomedycznych metodą atomowej spektroskopii absorpcyjnej	40
E. Sąsiadek-Andrzejczak, Dozymetria 1D i 2D promieniowania wysokoenergetycznego – przegląd prac Zespołu DosLab	50
H. Szafrąska, Wybrane aspekty oceny właściwości estetycznych szwów laminowanych w odzieży roboczej	60
E. Matyjas-Zgondek, E. Rutkowski, Samoczyszczące wykończenie tkanin bawełnianych	70
M. Matusiak, Kwantyfikacja efektu gofrowania tkanin gofrowanych	78
P. Szablewski, Model analityczny dla dużych ugięć płaskiej struktury tekstylnej o zmiennej sztywności zginania i jego weryfikacja z wykorzystaniem symulacji MES	85
J. Kosmol, I. Krucińska, Termowizja jako ocena sposobu wykorzystania metody NIR w celu poprawy jakości wyrobów haftowanych	97
E. Radaszewska, P. Szablewski, Identyfikacja współczynników sprężystości w problemie zginania płaskich wyrobów włókienniczych	105
W. Serweta, B. Wionczyk, J. Wójcik, B. Szalek, Badania nad możliwością zastosowania włókien coolmax w innowacyjnym obuwnictwie	112
G. Kosiuk, M. Matusiak, Analiza parametrów charakteryzujących strukturę geometryczną powierzchni tkanin	125
P. Maślanka, Wpływ przepuszczalności powietrza tkaniny pokrycia na rozkład ciśnienia w skrzydle paralotni	133
D. Kamińska, M. Matusiak, Wpływ splotu na transport wilgoci w tkaninach bawełnianych	143

M. Gloger, Z. Stempień, J. Pinkos , Tekstylne osłony balistyczne ze strukturą haftowaną	148
A. Poniecka, M. Barburski , Właściwości mechaniczne haftu technicznego wykonanego z włókien lnianych	158
K. Abramczyk, M. Barburski, J.R. Blaszcak, B. Samuel , Tkanina jako bariera akustyczna	166
P. Miśkiewicz, M. Tokarska, I. Frydrych , Analiza wybranych właściwości termicznych tkanin modyfikowanych powierzchniowo pod kątem zastosowania w gorącym środowisku pracy	177

Rozdział I

MEDTEX i SMARTEX

WŁÓKNA CELULOZOWE Z UDZIAŁEM ALGINIANU

Barbara Niekraszewicz, Anita Sochacka

*Katedra Inżynierii Mechanicznej, Informatyki Technicznej i Chemii Materiałów
Polimerowych
Politechnika Łódzka*

1. Wstęp

Polimery naturalne stale wzbudzają zainteresowanie chemii, biochemii, medycyny, farmakologii, biotechnologii czy włókiennictwa, a nade wszystko producentów materiałów opatrunkowych. Opatrunki są ciągle unowocześniane, coraz bardziej funkcjonalne i w coraz większym stopniu spełniają wymagania lekarzy. Kluczową rolę odgrywają w tym takie polimery naturalne, jak celuloza, chityna/chitozan czy alginiany. Są to polimery biodegradowalne, a więc ekologiczne i przyjazne środowisku. Od lat zapotrzebowanie na włókna z nich wytworzone lub produkowane z ich udziałem rośnie. Biogodność, dobra absorpcja czy jonowymienność to cechy, które są szczególnie ważne przy wytwarzaniu takich produktów, jak materiały opatrunkowe, podłoża do hodowli komórkowych czy resorbowalne implanty.

Chitozan i alginian są biogodne, a dodatkowo obdarzone są unikalnymi właściwościami, do których można zaliczyć przyspieszanie gojenia ran, zdolność do spęczniania i tworzenia żeli w przypadku alginianu oraz antybakteryjność w przypadku chitozanu. To czyni je bardzo atrakcyjnymi surowcami do wytwarzania funkcjonalnych włókien i tekstyliów, szczególnie medycznych. Ograniczeniem może być zbyt wysoka cena, stąd podejmowane są próby przeniesienia ich unikalnych właściwości poprzez wytworzenie włókna kompozytowego. Wzbogacenie tworzywa włókien z jednego polimeru naturalnego innym naturalnym nie zakłóci ich korzystnych cech wspólnych, a sprawi, że nowe zmodyfikowane włókno przynajmniej w części zyska unikalne właściwości drugiego polimeru. Wprowadzenie do struktury włókna celulozowego innego polimeru naturalnego poprawi jego funkcjonalność i poszerzy spektrum działania, co jest zgodne z obecnie panującymi trendami ogólnościowymi¹.

Wiele ośrodków naukowych prowadzi badania nad tworzeniem materiałów kompozytowych złożonych z dwóch bądź z trzech polimerów naturalnych. Pierwsze doświadczenia nad tworzeniem struktur alginianu z celulozą dotyczyły otrzymywania makroporowatych żeli celulozowo-alginianowych i ich wyniki pokazały słuszność obranego kierunku badań. Alginian sodu rozpuszczono w rozpuszczalniku o składzie: 6%wag.NaOH/4%wag.mocznik/90% wag.woda. Celulozę w postaci proszku

¹ Mather R., *Chemistry of Textile Fibres*, (2nd Edition), Royal Society of Chemistry, 2015, s. 128.

rozpuszczano również w tym samym rozpuszczalniku. Tak przygotowane roztwory zmieszano razem i sieciowano epichlorohydryną. Otrzymane żełe charakteryzowały się mikroporowatą strukturą i bardzo dobrymi właściwościami mechanicznymi oraz bardzo wysokim współczynnikiem spęcznienia w wodzie².

Przeprowadzono też próby otrzymania włókien celulozowo-alginianowych. Dotyczyły one obróbki wykończalniczej włókien bawełnianych lub lyocell polegającej na napawaniu włókien wodnym roztworem alginianu sodu, a następnie jonowym sieciowaniu łańcuchów alginianowych i celulozowych jonami Cu(II). Po napawaniu włókna poddawano redukcji generując w ten sposób nanocząstki miedzi. Włókna takie charakteryzowały się dobrymi parametrami mechanicznymi i dobrą aktywnością biobójczą³.

Włókna bawełniane poddano również obróbce roztworem alginianu sodu, w którym rozprowadzono otrzymane wcześniej nanocząstki tlenku cynku. Tak zmodyfikowane włókna charakteryzowała bardzo dobra aktywność biologiczna. Włókna z powodzeniem mogą być stosowane na materiały opatrunkowe⁴. Funkcjonalne wykończenia tekstyliów, w których użyto alginian, przeprowadzono stosując powlekanie nanokompozytowe lub sieciujące jonowo. Alginiany w tych wykończeniach były nośnikami nanocząstek srebra, cynku czy miedzi. Pokrywano nimi różne rodzaje włókien, m.in. bawełnę i włókna celulozowe z bambusa⁵.

Nowe mieszane biowłókna z celulozy bakteryjnej i alginianu otrzymano z roztworu celulozy i alginianu w wodnym roztworze LiOH/mocznik/tiomocznik przez koagulację w 10% wodnym roztworze H₂SO₄. Badania FTIR pokazały specyficzną interakcję pomiędzy grupami hydroksylowymi celulozy bakteryjnej i grupami karboksylowymi z alginianu. Właściwości mechaniczne nieznacznie wzrosły w stosunku do włókien otrzymanych z czystego alginianu. Autorzy przewidywali, że nowe włókna mają szansę znaleźć zastosowanie w inżynierii tkankowej⁶.

Ze względu na swoją specyfikę, proces NMMO wydaje się być najbardziej odpowiedni do przeprowadzenia takiej modyfikacji, żeby otrzymać włókna celulozowe z udziałem alginianu wapnia, gdzie alginian będzie wprowadzany do roztworu w postaci alginianu sodu na etapie rozpuszczania celulozy w NMMO, natomiast jony wapnia podczas zestalania włókien w kąpieli, którą jest wodny roztwór CaCl₂.

² Chang Ch., Duan B., Zhang L., *Fabrication and characterization of novel macroporous cellulose-alginate hydrogels*, Polymer 2009, Vol. 50, ss. 54-67.

³ Grace M., Chand N., Kumar Bajpai S., *Copper Alginate-Cotton Cellulose (CACC) Fibers with Excellent Antibacterial Properties*, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2009, Vol. 4, No. 3, ss. 24-35.

⁴ Varaprasad K., Raghavendra G.M., Jayaramudu T., Seo J., *Nanozinc oxide-sodium alginate antibacterial cellulose fibers*, Carbohydrate Polymers 2016, Vol. 135, ss. 349-355.

⁵ Li J., He J., Huang Y., *Role of alginate in antibacterial finishing of textiles*, International Journal of Biological Macromolecules, 2016, Vol. 94, ss. 466-473.

⁶ Zhang S., Luo J., *Preparation and Properties of Bacterial Cellulose/Alginate Blend Bio-Fibers*, Journal of Engineered Fibers and Fabrics, 2011 Vol. 6, No. 3, , ss. 69-72.

2. Część doświadczalna

2.1. Materiały

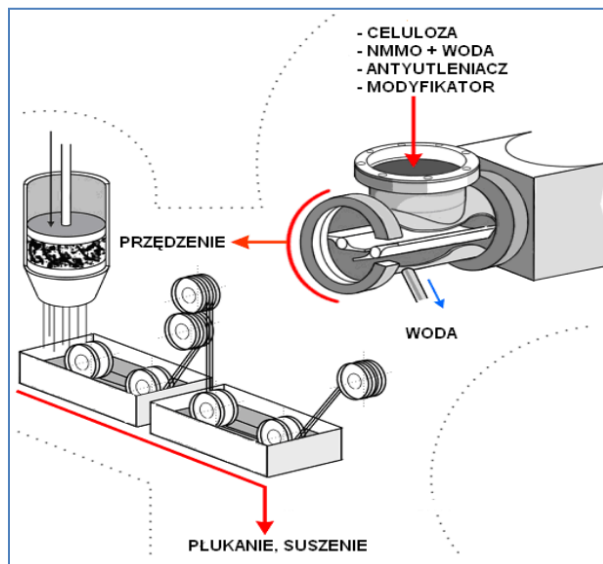
Do wykonania roztworów przędzalniczych zastosowano masę celulozową PLACETATE firmy Rayonier® o zawartości α -celulozy 98% i średnim stopniu polimeryzacji (DP) 1236. Rozpuszczalnikiem był 50% roztwór wodny N-tlenku N-metylomorfoliny (NMMO) firmy HUNTSMAN Corporation, a stabilizatorem termicznym - ester propylowy kwasu galusowego Tenox PG firmy Sigma®. Do modyfikacji użyto alginian sodowy firmy ALDRICH (M/G 1,56; ciężar cząsteczkowy 120000-190000g/mol; lepkość dynamiczna 15-25cP dla 1% roztworu wodnego, pH 1% roztworu wodnego 6,5-8,5).

2.2. Metodyka badań

Otrzymywanie włókien

Sporządzono 8% roztwory celulozy w NMMO, do których w czasie rozpuszczania wprowadzano alginian sodowy w postaci 4-5% roztworu wodnego. Ilości alginianu tak dobrano, aby wprowadzić 5, 10, 15 i 20% wag. alginianu w stosunku do zawartości α -celulozy. Do układu wprowadzano również stabilizator termiczny Tenox. Rozpuszczanie prowadzono w podwyższonej temperaturze i pod zmniejszonym ciśnieniem w urządzeniu firmy IKAVISK do uzyskania jednorodnego roztworu i odebrania odpowiedniej ilości wody.

Tak przygotowane roztwory przędzalnicze formowano metodą sucho-moką na przędzarce laboratoryjnej wytlaczając przez szczelinę powietrzną (11cm) do I kąpieli zestalającej (20°C), którą stanowił 3% wodny roztwór CaCl₂ z niewielkim dodatkiem HCl (Rys. 1). Prędkość w kanaliku dyszy przędzalniczej wynosiła 1m/min, a prędkość odbioru 20m/min. Temperatura dyszy przędzalniczej wynosiła 115°C. W kąpieli zestalającej następowała wymiana jonów sodu na jony wapnia. Otrzymane włókna przeprowadzano przez II kąpiel zestalającą o takim samym składzie jak I, ale o temperaturze 70°C. Następnie włókna wielokrotnie płukano i suszono. Dla porównania otrzymano w takich samych warunkach włókna celulozowe bez udziału alginianu. Zaobserwowano, że w czasie formowania włókien z kolejnych roztworów, czyli wraz ze zwiększającą się ilością wprowadzonego alginianu sodu, formowanie było mniej stabilne, co było widoczne w postaci większej liczby zrywów włókien elementarnych. Włókna charakteryzowały się białą barwą.



Rys. 1. Schemat wytwarzania roztworów przędzalniczych i formowania włókien celulozowych metodą sucho-mokrą⁷.

Źródło: opracowanie własne.

Metody badania włókien

Oznaczenie sorpcji wilgoci zostało wykonane w oparciu o normę PN-71/P-04635, a oznaczenie retencji wody przez włókna w oparciu o normę PN-72/P-04800. Oznaczenie zdolności włókien do spęczniania żelowego GSR wykonano na podstawie procedury opisanej w publikacji Qina⁸.

Podstawowe parametry wytrzymałościowe oznaczano poprzez pomiar masy liniowej, wytrzymałości na rozerwanie i wydłużenia względnego. Pomiar masy liniowej wykonano według normy ISO 1973:1995 (E). Wytrzymałość na rozerwanie i wydłużenie względne zostały wyznaczone według normy PN-EN ISO 5079:1999 na zrywarce laboratoryjnej ZWICK/Z 2.5/TN1S wyposażonej w oprogramowanie TestXpert v 7.1.

2.3. Omówienie wyników badań

Ze względu na ewentualny kierunek zastosowania modyfikowanych włókien na materiał opatrunkowy istotne w pracy było porównanie najważniejszych dla tego zastosowania właściwości otrzymanych włókien z włóknami niemodyfikowanymi. Spodziewano się zmian we właściwościach hydrofilowych i zdolności do spęczniania

⁷ Rubacha M., Leonowicz M., Pawlik P., Łaskiewicz B, Kulpiński P., Materiały Konferencyjne VI Sympozjum EL – TEX, Łódź, 2004.

⁸ Qin Y.,: *Gel Swelling Properties of Alginate Fibers*, *J. Appl. Polym. Sci.* 2004, Vol. 91, s. 1641-1645.

jako skutek wprowadzenia do tworzywa celulozowego bardziej hydrofilowego tworzywa alginianowego.

Właściwości hydrofilowe określano poprzez pomiar sorpcji wilgoci przez włókna w temp. 20°C i przy RH 65% oraz przez pomiar retencji wody we włóknach. Badania sorpcji wilgoci (Tabela 1) pokazały, że wraz ze wzrostem ilości wprowadzanego do płynu przedzalniczego alginianu następuje wzrost sorpcji wilgoci w modyfikowanych włóknach z wartości 12,74 % do 14,22% dla włókien odpowiednio z roztworów z 5% i 20% udziałem alginianu. Dla porównania ten parametr dla włókna bez alginianu był na poziomie 12,27%. Z uzyskanych wyników widać poprawę tego parametru, ale ta poprawa nie jest wyjątkowo duża (max 16%). W przypadku retencji wody osiągnięto lepsze efekty. Wyniki wykonanych badań tego parametru pokazały wzrost z 80,85% do 94,95% dla włókien odpowiednio z roztworów z 5% i 20% udziałem alginianu. W stosunku do włókien niemodyfikowanych (retencja 75,14%) jest to wzrost o 26% (max). Ta poprawa obu parametrów jest efektem obecności tworzywa alginianowego we włóknach celulozowych, które charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami pochłaniania płynów i zatrzymywania ich w swojej strukturze.

Dla włókien, które miałyby być użyte jako surowiec na materiały opatrunkowe, ważna jest ocena ich zdolności do spęczniania. Pełniejszą ocenę tej właściwości dało oznaczenie współczynnika spęczniania żelowego GSR. Do pomiarów spęczniania włókien zastosowano ciecz zbliżoną swym składem do wysięku z rany lub surowicy ludzkiej. Wyniki przeprowadzonych badań współczynnika spęczniania żelowego (GSR) (Tab. 1) pokazały, że wraz z ilością wprowadzanego do roztworu przedzalniczego alginianu rosła zdolność modyfikowanych włókien do spęczniania, gdyż GRS dla włókien bez alginianu wynosił 1,78g/g, a dla włókien o maksymalnym (20%) udziale alginianu 2,08g/g. Wzrost parametrów związanych z właściwościami higroskopijnymi i zdolnością do spęczniania potwierdził, że kierunek modyfikacji włókien celulozowych alginianem był właściwy. Dla pełniejszej analizy efektów wykonanej modyfikacji istotne było zbadanie wpływu wprowadzenia do tworzywa włókien celulozowych tworzywa alginianowego na parametry wytrzymałościowe.

Tabela 1. Wpływ ilości wprowadzonego alginianu sodu na sorpcję i retencję wody oraz współczynnik spęczniania żelowego włókien z różnym udziałem modyfikatora.

Nazwa próbki	Ilość wprowadzonego alginianu sodu	Sorpcja [%]	Retencja [%]	Współczynnik spęczniania żelowego GSR, [g/g]
AlCa – 0	0%	12,27	75,14	1,78
AlCa – 5	5%	12,74	80,85	1,84
AlCa – 10	10%	13,28	91,05	1,97
AlCa – 15	15%	13,74	92,38	2,00
AlCa – 20	20%	14,22	94,95	2,08

Źródło: opracowanie własne.

Wykonane badania wytrzymałości na rozerwanie i wydłużenia względnego (Tabela 2) pokazały, że wraz ze wzrostem ilości wprowadzonego alginianu następuje pogorszenie wytrzymałości na rozerwanie – z 30,55cN/tex dla włókna niemodyfikowanego do 21,02cN/tex dla włókna z maksymalnym 20% udziałem alginianu w roztworze przędzalniczym. Dla włókna otrzymanego z roztworu z 5% udziałem alginianu wytrzymałość na rozerwanie w porównaniu do włókna niemodyfikowanego jest niemalże na tym samym poziomie (29,57cN/tex). Zaobserwowano również spadek wydłużenia względnego.

Tabela 2. Wpływ ilości wprowadzonego alginianu sodu na wytrzymałość na rozerwanie i wydłużenie względne włókien otrzymanych z różnym udziałem modyfikatora.

Nazwa próbki	Ilość wprowadzonego alginianu sodu	Masa liniowa [dtex]	Wytrzymałość na rozerwanie [cN/tex]	Wydłużenie względne [%]
AlCa – 0	0%	7,32	30,55	9,04
AlCa – 5	5%	6,31	29,57	6,75
AlCa – 10	10%	7,64	22,24	6,70
AlCa – 15	15%	7,77	25,16	6,94
AlCa – 20	20%	8,10	21,02	8,58

Źródło: opracowanie własne.

3. Podsumowanie

Badania właściwości hydrofilowych pokazały, że wraz ze wzrostem ilości alginianu wprowadzanego do tworzywa włókien celulozowych wzrasta zarówno sorpcja wilgoci, jak i retencja wody w tych włóknach. Włókna otrzymane z udziałem alginianu charakteryzują się dobrą zdolnością do spęczniania, która rośnie wraz ze wzrostem ilości alginianu w tworzywie włókna. Badania wskaźników wytrzymałościowych modyfikowanych włókien pokazały pewien niekorzystny wpływ przeprowadzonej modyfikacji na właściwości mechaniczne włókien, co jednak nie wyklucza ich zastosowania do wytwarzania włóknin.

Sposób otrzymywania włókien celulozowo-alginianowych w procesie NMMO wymaga dalszych prac, które ulepszyłyby przygotowanie zmodyfikowanego roztworu przędzalniczego, formowanie włókien i późniejszą ich obróbkę. Jednak na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że otrzymano włókna celulozowo-alginianowe o zwiększonej funkcjonalności w stosunku do niemodyfikowanego włókna celulozowego otrzymanego w procesie NMMO.

Literatura

- [1] **Mather R.**, *Chemistry of Textile Fibres*, (2nd Edition), Royal Society of Chemistry, 2015, s. 128.
- [2] **Chang Ch., Duan B., Zhang L.**, *Fabrication and characterization of novel macroporous cellulose-alginate hydrogels*, *Polymer* 2009, Vol. 50, ss. 54-67.
- [3] **Grace M., Chand N., Kumar Bajpai S.**, *Copper Alginate-Cotton Cellulose (CACC) Fibers with Excellent Antibacterial Properties*, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics*, 2009, Vol. 4, No. 3, ss. 24-35.
- [4] **Varaprasad K., Raghavendra G.M., Jayaramudu T., Seo J.**, *Nanozinc oxide-sodium alginate antibacterial cellulose fibers*, *Carbohydrate Polymers* 2016, Vol. 135, ss. 349-355.
- [5] **Li J., He J., Huang Y.**, *Role of alginate in antibacterial finishing of textiles*, *International Journal of Biological Macromolecules* 2016, Vol. 94, , ss. 466-473.
- [6] **Zhang S., Luo J.**, *Preparation and Properties of Bacterial Cellulose/Alginate Blend Bio-Fibers*, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 2011, Vol. 6, No. 3, ss. 69-72.
- [7] **Rubacha M., Leonowicz M., Pawlik P., Łaszkiewicz B., Kulpiński P.**, *Materiały Konferencyjne VI Sympozjum EL – TEX, Łódź, 2004.*
- [8] **Qin Y.**, *Gel Swelling Properties of Alginate Fibers*, *J. Appl. Polym. Sci.* 2004, Vol.91, s. 1641-1645.

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE PIANEK NA BAZIE HIALURONIANU SODOWEGO

Ewelina Pabjańczyk-Wlazło^{*1}, Michał Chrzanowski², Grzegorz Szparaga¹

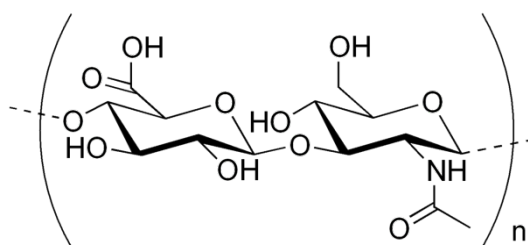
¹ Instytut Materiałoznawstwa Tekstyliów i Kompozytów Polimerowych,
Politechnika Łódzka

² Sieć Badawcza Łukasiewicz – Łódzki Instytut Technologiczny

*ewelina.pabjanczyk-wlazlo@p.lodz.pl

1. Wstęp

Kwas hialuronowy (HA) został po raz pierwszy wyizolowany w 1934 r. z ciała szklistej bydła [1] przez dwóch amerykańskich naukowców Karla Meyera i Johna Palmersa. Nazwa związku pochodzi od greckiego słowa *hyalos*, które oznacza szkło i odnosi się do jego szklistej i przezroczystej właściwości. Od tego czasu w literaturze naukowej pojawiało się coraz więcej doniesień na temat miejsca występowania HA, jego właściwości fizyko-chemicznych i metod produkcji. HA jest nietoksycznym i niepowodującym podrażnienia związkiem i jednym z najszerzej rozpowszechnionych związków w przyrodzie. HA jest jednym z glikoaminoglikanów (GAG) – naturalnych heteropolisacharydów [2]. HA składa się z nierozgałęzionych polisacharydów, powtarzających się jednostek disacharydów połączonych wiązaniami glikozydowymi. Struktura HA jest przedstawiona na **Rys. 1** i składa się z dwóch naprzemiennych jednostek kwasu D-glukuronowego i N-acetylo-D-glukozaminy połączonych wiązaniami β -1,4- i β -1,3-glikozydowymi [3,4].



Rys. 1. Struktura chemiczna kwasu hialuronowego

Źródło: domena publiczna

In vivo występuje w postaci soli sodowej (HANa, hialuronian sodu) i głównie jest obecny w macierzy zewnątrzkomórkowej, ale także na powierzchni i wewnątrz komórek. Wyższe ilości kwasu hialuronowego wytwarzane są podczas gojenia się ran, rozwoju zarodkowego, a także w ciele szklistym oka, w ścianach naczyń

krwionośnych, pępowinie i stawach, podczas gdy najwyższe ilości można znaleźć w macierzy zewnątrzkomórkowej tkanek skóry [5,6].

HANA jest wysoce higroskopijnym biopolimerem ze względu na grupę karboksylową obecną w kwasie glukuronowym, która w fizjologicznym środowisku pH nadaje polimerowi charakter polianionowy. W środowisku wodnym cząsteczki HANA mogą zwiększać swoją objętość n-krotnie, tworząc sieć stabilizowaną wiązaniami wodorowymi. Jedna cząsteczka HANA może związać około 250 cząsteczek wody, jednak na jej zdolność do wiązania wody wpływa jej forma przestrzenna, na którą z kolei wpływa pH i różne kationy obecne w roztworze [7]. Większość cząsteczek wody jest mechanicznie unieruchomiona w helisie tego polisacharydu, a niektóre cząsteczki wiążą się z łańcuchem za pomocą wiązań wodorowych [8].

Te cechy HANA sprawiają, że jest to cząsteczka o dużej objętości hydrodynamicznej i dużej osmotyczności. Niezwykłe właściwości fizykochemiczne hialuronianu wynikają z połączenia jego struktury przestrzennej i zdolności do przybierania formy spirali z przypadkowymi zwojami. Ta cecha wraz ze specjalnymi właściwościami higroskopijnymi sprawia, że makrocząsteczka tego GAG-u przyjmuje ogromną objętość hydrodynamiczną, tworząc roztwory o wysokiej lepkości i elastyczności. To z kolei powoduje, że HANA odgrywa ważną rolę w utrzymywaniu strukturalnej i biomechanicznej integralności tkanek, utrzymywaniu właściwej gospodarki wodnej komórek, biorąc udział w migracji komórkowej, różnicowaniu i proliferacji, które zachodzą w macierzy zewnątrzkomórkowej [9].

Zdolność wiązania wody wpływa na właściwości lepkosprężyste, a wodne roztwory hialuronianu wykazują właściwości pseudoplastyczne, tj. spadek lepkości wraz ze wzrostem naprężenia ścinającego i z powodu podwyższonej temperatury. Wiadomo również, że jego właściwości lepkosprężyste zależą od masy cząsteczkowej i stężenia HANA w roztworze [10]. Pianki polimerowe są jedną z najnowszych i coraz bardziej popularnych grup materiałów w dziedzinie medycyny regeneracyjnej ze względu na szczególne i korzystne właściwości, które wykazują np. struktura porowata, zdolność sorpcyjna i możliwość uzyskania kontrolowanego uwalniania substancji czynnych [11]. Ich właściwości, w zależności od metody otrzymywania, zależą w dużej mierze od rodzaju polimeru, jego masy cząsteczkowej, stężenia w roztworze, układu rozpuszczalników, zastosowanych dodatków (np. porogenów) i uzyskanej charakterystyki powierzchni, jak i struktury porowatej. W metodzie otrzymywania pianek za pomocą liofilizacji, tj. jednej z najprostszych metod otrzymywania pianek polimerowych polegającej najpierw na mrożeniu roztworów polimerowych, a później sublimacyjnym usuwaniu rozpuszczalnika. Zarówno rodzaj polimeru, jak i jego stężenie, mają wpływ na uzyskiwane właściwości mechaniczne finalnych struktur porowatych.

Celem badań było przygotowanie porowatych struktur za pomocą liofilizacji na bazie biogodnych soli sodowych kwasu hialuronowego oraz analiza zależności masy

cząsteczkowej zastosowanego polimeru i jego stężenia na wybrane właściwości mechaniczne otrzymanych pianek.

2. Materiały i metody

2.1. Polimer i przygotowanie roztworów

Sól sodowa kwasu hialuronowego (HANa) o czystości kosmetycznej została zakupiona od Contipro Biotech (Republika Czeska) w postaci białego proszku. W badaniu analizowano dwie masy cząsteczkowe polimeru: $M_1 = 80\text{--}130$ kDa i $M_4 = 2,0\text{--}2,2$ MDa oraz zastosowano cztery stężenia roztworów polimerowych (1,2,3 i 4%). HANa został wyprodukowany biotechnologicznie w wyniku fermentacji bakterii *Streptococcus Zooepidemicus Equi*, trawionych enzymatycznie (hialuronidazą jąder bydłęcych) do określonej masy cząsteczkowej i frakcjonowany chromatograficznie. Roztwory polimerów przygotowano przez rozpuszczenie polimeru w świeżo destylowanej wodzie i poddanie mieszanemu mechanicznemu przez 4 godziny. Dla każdej próbki przygotowano roztwór polimeru o objętości $V = 100$ ml, a roztwory polimeru wylano następnie do specjalnych plastikowych pojemników przeznaczonych do celów zamrażania, po 25 g na każdą próbkę.

2.2. Liofilizacja

Roztwory następnie zamrażano w temperaturze -80°C w chłodziarce laboratoryjnej przez 24 godziny, a tak przygotowane próbki suszono sublimacyjnie w liofilizatorze Martin Christ FREEZE DRYER ALPHA 1-2/LD PLUS (Stany Zjednoczone). Suszenie prowadzono przy ciśnieniu $p = 0,001$ mbar, stosując podgrzewaną półkę o ustawionej temperaturze 33°C . Proces prowadzono przez 48 godzin, aż do całkowitego usunięcia rozpuszczalnika z próbki.

2.3. Badanie właściwości mechanicznych

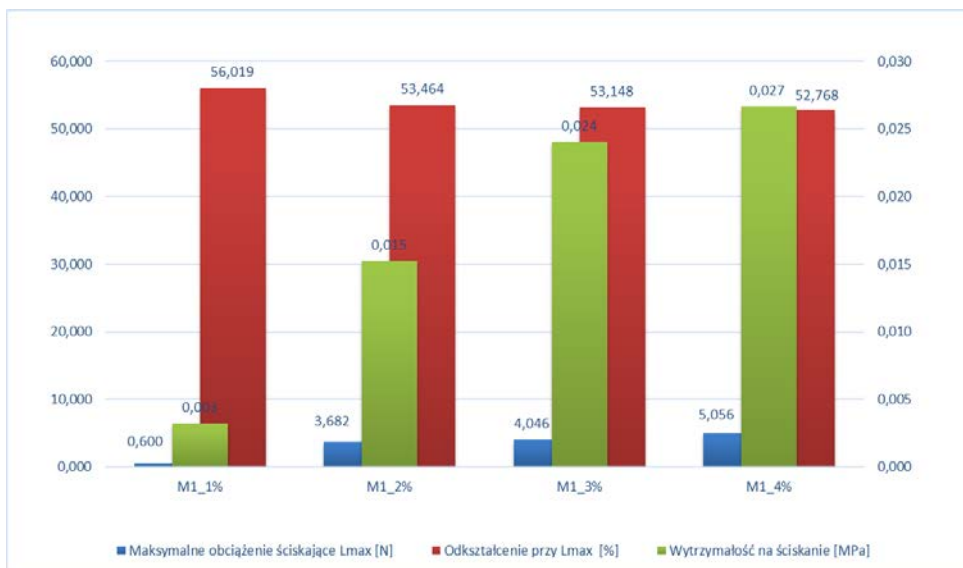
Zbadano zależność masy cząsteczkowej zastosowanego polimeru i jego stężenia od wybranych właściwości mechanicznych pianek. Aby ocenić tę zależność, opracowano metodę badania odporności na odkształcenie w oparciu o normę amerykańską: *Test Methods for Flexible Cellular Materials — Slab, Bonded, and Molded Urethane Foams, D 3574-03 - Test B1 — indentation force deflection tests — specified deflection*. Odchylenie siły wgniecenia mierzono jako siłę niezbędną do wytworzenia w piance oznaczonych wgnieceń. W badaniu maksymalne obciążenie ściskające (N) zostało zmierzone przy założonym 50% ugięciu. Pianki o jednolitych wymiarach 5 cm x 5 cm x 1 cm były analizowane pod kątem właściwości mechanicznych przy użyciu uniwersalnych systemów testowych INSTRON serii 5900 do badań wytrzymałości na rozciąganie, ściskanie i giętkość (Stany Zjednoczone).

Za każdym razem zastosowano jedną próbkę. Analiza pozwoliła obliczyć maksymalne obciążenie ściskające L_{max} , odkształcenie przy L_{max} oraz wytrzymałość na ściskanie (MPa), jak również średnie wartości odkształcenia i wytrzymałości na ściskanie. Odchylenie standardowe obliczono dla wielkości próby $n=25$. Do celu oceny wpływu porowatości pianek na ich właściwości mechaniczne wzięto pod uwagę porowatość całkowitą obliczoną stosując jako referencyjną (teoretyczną) gęstość obliczoną na podstawie zależności $\rho=m/V$ oraz jako eksperymentalnie określoną gęstość – gęstość polimeru obliczoną na podstawie pomiarów z wykorzystaniem kolumn gradientowych.

3. Wyniki i wnioski

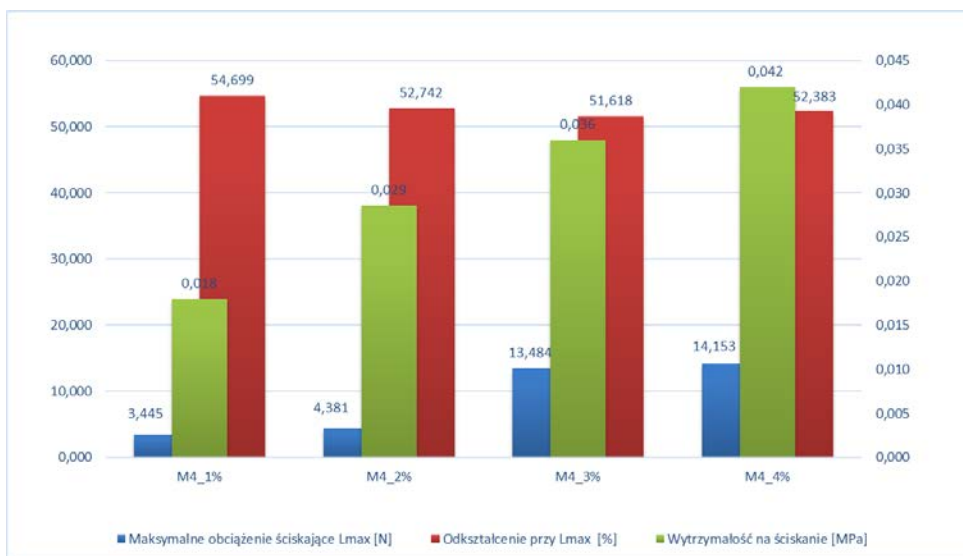
Z punktu widzenia projektowanego zastosowania oraz ze względu na specyfikę wytwarzanych struktur (porowatość, higroskopijność, kruchość pianek), jednym z bardzo istotnych parametrów mechanicznych, który może świadczyć o przydatności danej struktury do zastosowania w medycynie regeneracyjnej jest jego wytrzymałość na ściskanie rozumiana jako odkształcenie pod wpływem przyłożonej siły (maksymalnym obciążeniu ściskającym) lub jego wartość uśredniona.

Analiza pozwoliła na określenie następujących parametrów mechanicznych wytwarzanych pianek: maksymalne obciążenie ściskające, odkształcenie ściskające przy maksymalnym obciążeniu ściskającym i wytrzymałość na ściskanie, średnie odkształcenie przy ściskaniu i średnia wytrzymałość na ściskanie. Wyniki porównania właściwości mechanicznych wytworzonych pianek pod względem stężenia i wybranych mas cząsteczkowych polimeru: M_1 i M_4 przeprowadzono i przedstawiono na **Rysunkach 2 i 3**, a także w **Tabeli 1 i 2**.



Rys. 2. Porównanie wybranych właściwości mechanicznych dla pianek o masie cząsteczkowej M_1

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 3. Porównanie wybranych właściwości mechanicznych dla pianek o masie cząsteczkowej M_4

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 1. Porównanie wybranych uśrednionych właściwości mechanicznych pianek wytworzonych z masy cząsteczkowej M_1 i M_4 w zakresie stężeń 1 – 4%.

Opis próbki	Stężenie [%]	Średnie odkształcenie przy ścisnaniu [%]	Odchylenie standardowe	Średnia wytrzymałość na ścisnanie [MPa]	Odchylenie standardowe
M1_1%	1%	54,739	3,065	0,003	0,001
M1_2%	2%	52,384	1,620	0,015	0,007
M1_3%	3%	51,981	1,161	0,025	0,007
M1_4%	4%	51,957	1,307	0,027	0,008
M4_1%	1%	54,933	3,470	0,018	0,005
M4_2%	2%	52,752	1,497	0,019	0,008
M4_3%	3%	51,406	1,039	0,042	0,022
M4_4%	4%	51,713	1,256	0,036	0,030

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 2. Porównanie wybranych uśrednionych właściwości mechanicznych pianek oraz ich porowatości całkowitej, wytworzonych w masy cząsteczkowej M_1 i M_4 o stężeniu 4%.

Opis próbki	Stężenie [%]	Średnie odkształcenie przy ścisnaniu [%]	Odchylenie standardowe	Średnia wytrzymałość na ścisnanie [MPa]	Odchylenie standardowe	Porowatość całkowita [%]
M1_4%	4%	51,957	1,307	0,027	0,008	64,36
M4_4%	4%	51,713	1,256	0,036	0,030	18,76

Źródło: opracowanie własne.

Z punktu widzenia oceny organoleptycznej, zastosowanie najwyższej masy cząsteczkowej i stężenia 4% pozwala na uzyskanie materiałów o znacznie większej trwałości w środowisku o wilgotności względnej $RH=40 - 60\%$ oraz o stosunkowo wysokiej kruchości. Na podstawie analizy **Rys. 1 i 2** oraz **Tab. 1 i 2** można wywnioskować, że:

1. Maksymalne obciążenie ściskające oraz wytrzymałość na ścisnanie rośnie wraz ze wzrostem poziomu stężenia w ramach tej samej masy cząsteczkowej polimeru. Poza tym, wartość tych dwóch parametrów jest zauważalnie wyższa dla zastosowania wyższej masy cząsteczkowej. Dla stężenia $C = 4\%$ możemy uzyskać prawie dwukrotnie wyższą wytrzymałość na ścisnanie wytworzonej pianki ($M_1 = 0,027$ MPa vs. $M_4 = 0,042$ MPa). Wyższa odporność wytworzonych pianek z wyższej masy

cząsteczkowej jest prawdopodobnie spowodowana zwielokrotnieniem liczby wiązań wodorowych stabilizujących strukturę przestrzeni helis HANa. Ilość możliwych do powstania wiązań jest uzależniona m.in. od długości łańcucha oraz jego zdolności do tworzenia struktur przestrzennych, w których również tworzą się dodatkowe wiązania wodorowe stabilizujące strukturę. Przy zastosowaniu tego samego stężenia polimeru w roztworze, ale przy dłuższym łańcuchu prawdopodobieństwo powstania większej ilości wiązań wodorowych jest stosunkowo wyższe.

2. Odkształcenie ściskające przy maksymalnym obciążeniu ściskającym pozostawało na względnie podobnym poziomie zarówno w zakresie różnych stężeń, jak i przy porównaniu dwóch różnych mas cząsteczkowych. Pozwala to stwierdzić, że wytworzone struktury porowate na bazie tego biopolimeru, charakteryzują się względnie niską elastycznością niezależnie od stosowanego stężenia i masy cząsteczkowej.
3. Średnie odkształcenie przy ściskaniu nieznacznie spada wraz ze wzrostem stężenia polimeru w obrębie tej samej masy cząsteczkowej. Identyczną zależność zaobserwowano dla masy cząsteczkowej M_4 , przy czym próbki przygotowane z najniższego stężenia $C=1\%$ wykazywały się największymi wartościami odchylenia standardowego.
4. Średnia wytrzymałość na ściskanie rosła wraz ze wzrostem stężenia polimeru w roztworze, jak również wraz ze wzrostem masy cząsteczkowej polimeru.
5. Teoretycznie wyliczona porowatość całkowita pianek wytworzonych z polimerów o niższej masie cząsteczkowej znacząco się różni od porowatości pianek z wyższej masy cząsteczkowej (64,36% vs. 18,76%). Nie wpłynęło to jednak znacząco na wartość uśrednioną odkształcenia przy ściskaniu i wytrzymałości na ściskanie.
6. Analiza właściwości mechanicznych nie wykazała znaczących różnic w zakresie wartości odkształceń przy maksymalnym obciążeniu ściskającym między próbkami.

4. Podsumowanie

W wyniku przeprowadzonych badań określono zależności masy cząsteczkowej zastosowanego polimeru i jego stężenia na wybrane właściwości mechaniczne porowatych struktur otrzymanych za pomocą liofilizacji na bazie biozgodnego polimeru – soli sodowej kwasu hialuronowego. Stosowano dwa rodzaje masy cząsteczkowej oraz 4 stężenia procentowe (1 - 4%). Potwierdzono, że maksymalne obciążenie ściskające oraz wytrzymałość na ściskanie rośnie wraz ze wzrostem poziomu stężenia w ramach tej samej masy cząsteczkowej polimeru jak również wartość tych dwóch parametrów jest zauważalnie wyższa dla zastosowania wyższej

masy cząsteczkowej. Ponadto stwierdzono, że wytworzone struktury porowate charakteryzują się względnie niską elastycznością niezależnie od stosowanego stężenia i masy cząsteczkowej. Nie potwierdzono wpływu obliczonej porowatości pianek na wartości uśrednione odkształcenia przy ściskaniu i wytrzymałości na ściskanie, co może wskazywać na nieadekwatność wybranej metody obliczenia porowatości całkowitej pianek do tego typu materiałów piankowych.

Literatura

- [1] **Meyer K., Palmer J.W.,** *The polysaccharide of the vitreous humor*, Journal of Biological Chemistry 1934, vol. 107, ss. 629–634
- [2] **Tammi M.I., Day A.J., Turley E.A.,** *Hyaluronan and homeostasis: a balancing act*, Journal of Biological Chemistry 2002, vol. 277, ss. 4581–4584
- [3] **Olczyk P., Komosińska-Vassev K., Winsz-Szczotka K., Kuźnik-Trocha K., Olczyk K.,** *Hialuronian – struktura, metabolizm, funkcje i rola w procesach gojenia ran*, Postępy Higieny i Medycyny Doświadczalnej 2008, vol. 62, ss. 651–659, e-ISSN 1732-2693
- [4] **Khabarov V.N., Boykov P.Y., Selyanin M.A., Polyak F.,** *Hyaluronic Acid - Preparation, Properties, Application in Biology and Medicine*, Willey 2015, ISBN: 978-1-118-63379-3
- [5] **Hascall V.C., Majors A.K., De La Motte C.A., Evanko S.P., Wang A., Drazba J.A., Strong S.A., Wight T.N.,** *Intracellular hyaluronan: a new frontier for inflammation?*, Biochimica et Biophysica Acta 2004, nr 1673, ss.3–12
- [6] **Itano N., Atsumi F., Sawai T., Yamada Y., Miyaishi O., Senga T., Hamaguchi M., Kimata K.,** *Abnormal accumulation of hyaluronan matrix diminishes contact inhibition of cell growth and promotes cell migration*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 2002, vol. 99, ss. 3609–3614
- [7] **Głowacki A., Kozma E., Olczyk K., Kurzaj E.J.,** *Glikozaminoglikany – struktura i funkcja*, Postępy biochemii 1995, vol. 42, nr 2, ss. 139 -148
- [8] **Scott J.E.,** *Supramolecular organization of extracellular matrix glycosaminoglycans, in vitro and in the tissues*, FASEB Journal 1992, vol. 6, nr 9, ss. 2639-2645
- [9] **Toole B.P.,** *Hyaluronan: from extracellular glue to pericellular cue*, Nature Reviews Cancer 2004, nr 4, ss. 528–539

- [10] **Pabjańczyk-Włazło, E., Król P.**, *Rheological Properties of hyaluronic acid aqueous solutions*, V Wyjazdowa Sesja Naukowa Doktorantów Politechniki Łódzkiej, Rogów 9-12.04.2015, ISBN: 978-83-7283-655-7
- [11] **Radice M., Brun P., Cortive R., Scapinelli R., Battaliard C., Abatangelo G.**, *Hyaluronan-based biopolymers as delivery vehicles for bone-marrow-derived mesenchymal progenitors*, Journal of Biomedical Materials Research 2000, vol. 50, ss. 101–109

SMART PAPER

Elżbieta Sasiadek-Andrzejczak i Marek Kozicki

*Katedra Inżynierii Mechanicznej, Informatyki Technicznej i Chemii Materiałów
Polimerowych
Politechnika Łódzka*

1. Wstęp

W dobie dynamicznego rozwoju wytwarzania produktów przemysłowych oraz opakowań producenci są narażeni na problemy związane z kopiowaniem swoich autorskich pomysłów. Nowoczesne systemy zabezpieczeń związane są z poprawą kontroli jakości oraz ochroną przed bezprawnym i niekontrolowanym handlem. Zabezpieczanie produktów i opakowań jest jednym z podstawowych mierników jakości w odniesieniu do: jakości surowców, poprawności stosowania procesów produkcyjnych, określania warunków przechowywania, transportu oraz dystrybucji [1, 2]. Wiele znaczników stosuje się w celu ochrony produktów przed niepożądanym wpływem czynników zewnętrznych: zmianą wilgotności i temperatury, wpływem tlenu, czy nadmierną ekspozycją na światło – głównie na promieniowanie ultrafioletowe (UV).

Takie znaczniki dostarczają informacji na temat wpływu czynników klimatycznych, biologicznych i mechanicznych m.in. na cechy produktu takie jak: straty ilościowe, zmiany kształtu, konsystencji, smaku oraz utraty funkcjonalności [3]. Stosuje się także układy pochłaniające, np. absorbery tlenu, wody, zapachów, dwutlenku węgla i etylenu [4, 5, 6]. Na rynku komercyjnym funkcjonują także wskaźniki TTI (eng. Time and Temperature Indicators), np. Monitor Mark™ (3M), OnVu™ and CoolVu™ (Freshpoint), które dostarczają informacji na temat różnicy temperatur w stosunku do optymalnej wartości określonej przez producenta. Takie wskaźniki wytwarza się na bazie związków termochromicznych, które zmieniają swoją barwę w zależności od zaprogramowanej temperatury [7].

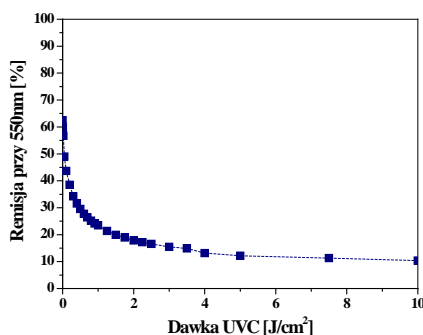
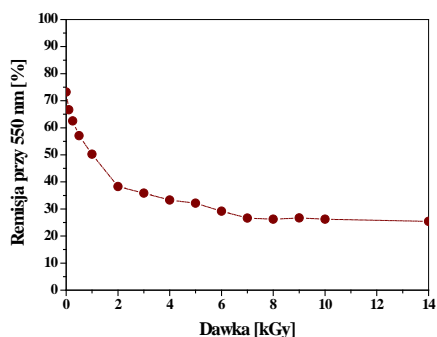
Znane są również metody zabezpieczania banknotów i papierów wartościowych, takie jak: znak wodny, nić zabezpieczająca, kolorowe włókna widoczne w świetle odbitym, białe lub przezroczyste włókna syntetyczne świecące pod wpływem promieniowania UV, cekiny oraz druki specjalne. Drukowane wyroby i opakowania można zabezpieczać poprzez stosowanie specjalnych atramentów i farb m.in. farb luminescencyjnych, absorbujących promieniowanie IR, fotochromicznych, termochromicznych, penetrujących, zmiennych optyczne, opalizujących oraz chemicznie reaktywnych [8, 9].

Kolejną grupą markerów są wskaźniki fotochromowe, które projektuje się w celu monitorowania promieniowania UV. Dostarczają one informacji w prosty, szybki

i widoczny sposób bez konieczności stosowania dodatkowych urządzeń pomiarowych. W ostatnim czasie zespół DosLab działający w Katedrze Inżynierii Mechanicznej, Informatyki Technicznej i Chemii Materiałów Polimerowych Politechniki Łódzkiej opracował podobne rozwiązanie na bazie soli tetrazoliny i diacetylenów do pomiarów dawek promieniowania UV [10-17], które na skutek napromienienia zmieniają swoją barwę, a której intensywność jest proporcjonalna do pochłoniętej dawki. Opublikowane wyniki prac nie wyczerpują w pełni tematu opracowania markerów i sensorów do pomiarów promieniowania UV, dlatego zespół DosLab poszukuje nowych obszarów badań m.in. związanych z implementacją modyfikowanych włókien poliakrylonitrylowych (PAN), które mogą pełnić rolę znacznika oryginalności, np. produktów papierowych.

2. Smart Paper

Wcześniejsze prace zespołu DosLab związane z dozymetrami tekstylnymi, doprowadziły do opracowania i wytworzenia włókien PAN o zmodyfikowanej strukturze z dodatkiem diacetyleny (PDA) [15, 17]. Wykazano, że włókna PAN-PDA mogą rejestrować dawki promieniowania UV w zakresie dawek 0-10 J/cm² oraz promieniowania jonizującego w zakresie dawek 0-6 kGy (Rysunek 1).

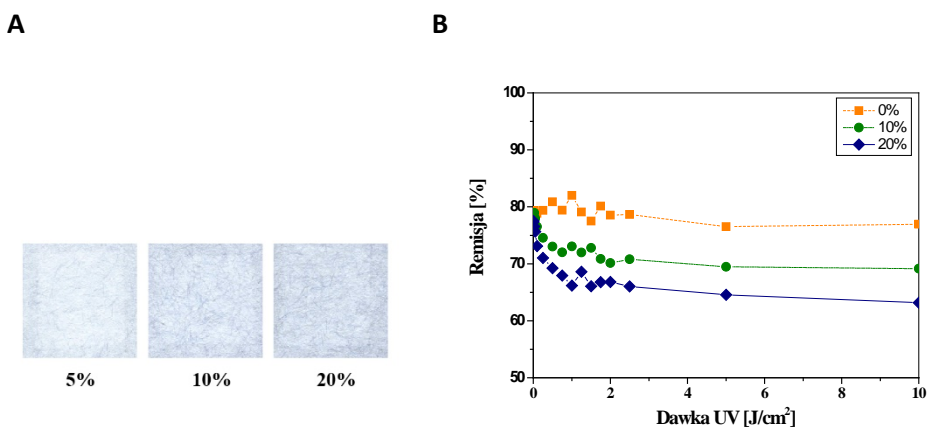
A**B**

Rys. 1. Zmiana remisji światła włókien PAN-PDA w zależności od zaabsorbowanej dawki promieniowania (A) UVC w zakresie 0-16 J/cm² oraz (B) promieniowania jonizującego w zakresie 0-14 kGy.

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie uzyskanych danych stwierdzono, że włókna PAN-PDA można stosować jako element systemu zabezpieczeń wyrobów papierowych. W kolejnym etapie we współpracy z Instytutem Papiernictwa Politechniki Łódzkiej przygotowano próbki papieru o gramaturze 65 g/m² zawierające w swojej strukturze włókna odcinkowe PAN-PDA (5-20% w/w włókien w odniesieniu do wyjściowej masy pulpy celulozowej). Po przygotowaniu, próbki papierowe były napromieniane

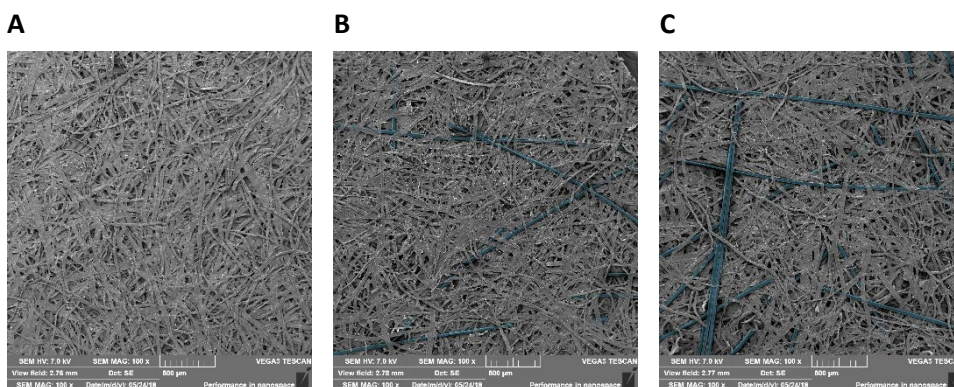
promieniowaniem UV i mierzone za pomocą spektrofotometru odbiciowego Spectraflash SP 300 DataColor (Szwajcaria) w systemie barwnym CIELAB. Zgodnie z oczekiwaniami, próbki w wyniku napromienienia zmieniają zabarwienie (z bezbarwnej na niebieski), podobnie jak próbki włókien PAN-PDA. Intensywność zmiany barwy jest proporcjonalna do zaabsorbowanej dawki promieniowania oraz zależy od ilości włókien w masie celulozowej. Na Rysunku 2 przedstawiono podstawową charakterystykę próbek papieru zawierających różny udział włókien w strukturze.



Rys. 2. Zmiana barwy próbek papieru modyfikowanego włóknami PAN-PDA po ekspozycji na promieniowanie UV ($0,5 \text{ J/cm}^2$) (A) oraz zależność emisji światła w zależności od zaabsorbowanej dawki promieniowania UV w zakresie $0\text{-}10 \text{ J/cm}^2$ (B).

Źródło: opracowanie własne.

Podobnie jak w przypadku dozymetrów 2D, na podstawie uzyskanych danych, wyznaczono parametry kalibracyjne poszczególnych wariantów papieru: *i)* zakres pomiarowy, *ii)* zakres liniowej odpowiedzi na dawkę, *iii)* dawkę progową oraz *iv)* czułość układu.



Rys. 3. Zdjęcia SEM próbek papieru modyfikowanego włóknami PAN-PDA: 0% (A), 10% (B) i 20% (C).

Źródło: opracowanie własne.

Przeanalizowano także zmiany strukturalne próbek papieru domieszkowanych włóknami PAN-PDA przy użyciu elektronowego mikroskopu skaningowego (SEM) TESCAN VEGA3–EasyProbe (TESCAN Brno, s.r.o., Republika Czeska). Próbki przed obrazowaniem zostały napyłone Au/Pd (Cressington Sputter Coater 108 auto, Wielka Brytania) przez 120 s (grubość warstwy Au/Pd na powierzchni próbki 30 nm). Na Rysunku 3 przedstawiono przykładowe zdjęcia wykonane dla próbek zawierających 10% i 20% w/w włókien PAN-PDA.

3. Podsumowanie

W badaniach wstępnych wykazano, że włókna PAN-PDA można stosować jako modyfikator wyrobów papierowych. Modyfikacja struktury papieru jest prostym sposobem zabezpieczenia wyrobu przed kopiowaniem przez podmioty nieuprawnione. Zaproponowana metoda gwarantuje równomierność rozłożenia włókien w strukturze wyrobu oraz uzyskanie gładkiej powierzchni, która może być dalej poddana procesom drukowania. Niewątpliwą zaletą rozwiązania jest wywoływanie barwnej zmiany wyłącznie podczas ekspozycji na promieniowanie UV o określonej długości fali.

Po napromienieniu uzyskuje się równomierne wybarwienie, które może być stosowane jako znacznik typu „on-off”. Zakłada się dalsze prace badawcze związane m.in. ze zmianą parametrów technologicznych papieru, technologią wytwarzania próbek oraz zastosowaniem modyfikowanego papieru jako dozymetry 2D do monitorowania rozkładu dawek promieniowania. Rozwiązanie to jest zgłoszone do opatentowania [18, 19]. Więcej szczegółów na temat publikacji i patentów związanych z tematami badawczymi zespołu DosLab można znaleźć na stronie: <http://mkozicki-sci.eu>

Literatura

- [1] **Cichoń Z., Miśniakiewicz M.**, Analiza tendencji w opakowalnictwie żywności uwarunkowanych zmieniającymi się wymaganiami rynkowymi, *Opakowanie* 2000, nr10.
- [2] **Korzeniowski A., Foltynowicz Z., Kubera H.**, Trendy rozwoju opakowań, *Przemysł Spożywczy* 2000, nr 4.
- [3] **Ghaani M., Gozzolino C.A., Castelli G., Farris S.**, An overview of intelligent packaging technologies in the food sector, *Trends in Food Science & Technology* 2016, vol. 51, ss.1-11.
- [4] **Ahvenainen R.**, Active and intelligent packaging [in:] *Novel food packaging techniques* Ahvenainen R. Eds., Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England 2003.

-
- [5] **Kozak W., Cierpiszewski R.**, Opakowania aktywne, *Przemysł Spożywczy* 2010, vol. 64, nr 10.
- [6] **Kozak W., Cierpiszewski R.**, Opakowania inteligentne, *Przemysł Spożywczy* 2010, vol. 64 nr 03.
- [7] **Biegańska M., Gwiazdowska D., Kozak W., Marchwińska K.**, The use of TTI indicators for quality monitoring of freshly squeezed juices, *The International Forum on Agri-Food Logistics II Domestic Scientific Conference AGROLOGISTYKA 2014: Efficient Logistic as a Chance of Efficient Consumer Response in the Agri-Food Sector*, Poznań, Poland 2014.
- [8] **De Heij H.**, *Designing Banknote Identity - DNB Occasional Studies*, De Nederlandsche Bank NV 2012.
- [9] **Jakucewicz J., Khadzhyanova S.**, *Sposoby zabezpieczania dokumentów*, Monografie Politechniki Łódzkiej, Łódź 2015, ISBN 978-83-7283-686-1.
- [10] **Kozicki M., Sasiadek E.**, *Textile UV detector with 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride as an active compound*, *Radiat. Meas.* 2011, vol. 46, pp. 510-526.
- [11] **Kozicki M., Sasiadek E.**, *UV dosimeter based on polyamide woven fabric and nitro blue tetrazolium chloride as an active compound*, *Radiat. Meas.* 2011, vol. 46, pp. 1123-1137.
- [12] **Kozicki M., Sasiadek E.**, *Polyamide woven fabrics with 2,3,5-triphenyltetrazolium chloride or nitro blue tetrazolium chloride as 2D ionizing radiation dosimeters*, *Radiat. Meas.* 2012, vol. 47, pp. 614-621.
- [13] **Kozicki M., Sasiadek E.**, *Scanning of flat textile-based radiation dosimeters: influence of parameters on the quality of results*, *Radiat. Meas.* 2013, vol. 58, pp. 87-93.
- [14] **Sasiadek E., Andrzejczak R., Kozicki M.**, *The importance of fabric structure in the construction of 2D textile radiation dosimeters*, *Radiat. Meas.* 2012, vol. 47, pp. 622-627.
- [15] **Kozicki M., Sasiadek E., Karbownik I., Maniukiewicz W.**, *Doped polyacrylonitrile fibres as UV radiation sensors*, *Sensors & Actuators: B. Chemical* 2015, vol. 213, pp. 234 – 243.
- [16] **Kozicki M., Sasiadek E., Kadlubowski S., Dudek M., Maras P., Nosal A., Gaziński-Lipman M.**, *Flat foils as UV and ionising radiation dosimeters*, *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry* 2018, vol. 351, pp. 179–196.
- [17] **Kozicki M., Sasiadek E., Kadlubowski S., Dudek M., Karbownik I.**, *Radiation sensitive polyacrylonitrile microfibres doped with PDA nanoparticles*, *Radiation Physics and Chemistry* 2020, vol. 169, no 107751.

- [18] **Kozicki, Marek, Sąsiadek, Elżbieta.** Sposób oznaczania oryginalności wyrobów włókienniczych i papierowych, P.419132, 17.10.2016
- [19] **Kozicki M., Sąsiadek E., Karbownik I.:** Sposób oznaczania oryginalności wyrobów włókienniczych i papierowych, P.419133, 17.10.2016

ZIELONA SYNTEZA NANOCZĄSTEK SREBRA W MODYFIKACJI WŁÓKIEN CELULOZOWYCH TYPU LYOCELL

Emilia Śmiechowicz, Marta Strzełińska

*Katedra Inżynierii Mechanicznej, Informatyki Technicznej
i Chemii Materiałów Polimerowych
Politechnika Łódzka*

1. Wstęp

W chwili obecnej można zauważyć duże zapotrzebowanie rynku konsumenckiego na sztuczne włókna celulozowe, będące substytutem i alternatywą dla naturalnych włókien bawełnianych. Ogromną zaletą włókien celulozowych są ich dobre właściwości użytkowe, w tym m.in. wytrzymałość na rozciąganie czy sorpcja wilgoci, a także niezwykle istotna dla środowiska naturalnego biodegradowalność włókien. Z powodu coraz to większych wymagań odbiorców, którzy oczekują od branży włókienniczej włókien i materiałów włókienniczych z grupy „High-Tech”, naukowcy opracowują nowe, wpisujące się w ten zakres tzw. „inteligentne” włókna i wyroby tekstylne. Oznacza to, że produkty te muszą być materiałami funkcjonalnymi, tzn. mającymi zdolność reagowania i oddziaływania na bodźce zewnętrzne.

Nieustanny rozwój przemysłu włókienniczego zapewnia konsumentom dostęp do wysokiej klasy interaktywnych włókien i wyrobów włókienniczych. Jedną z dziedzin, która nierozzerwalnie wpisała się w obszar włókiennictwa, a zarazem niezwykle rozwinęła nowoczesne włókiennictwo jest nanotechnologia. Połączenie nanotechnologii z różnymi technologiami włókienniczymi, a w tym np. obróbką wykończalniczą materiałów włókienniczych czy technologią wytwarzania włókien celulozowych typu Lyocell, umożliwiło otrzymywanie włókien i wyrobów o rozmaitych specyficznych właściwościach, np. antyelektrostatycznych, pochłaniających promieniowanie UV czy antybakteryjnych.

W dobie stale rosnących przypadków zagrożeń, wywoływanych przez różnego rodzaju chorobotwórcze komórki bakteryjne, badania służące otrzymywaniu włókien bioaktywnych odgrywają bardzo istotną rolę.

Nanocząstki srebra są nanomateriałem o wysokim stopniu komercjalizacji, również w dziedzinie włókiennictwa, aż 30% komercyjnych produktów o zadeklarowanym użyciu nanocząstek zawiera cząstki nanosrebra¹. W porównaniu ze wszystkimi

¹ Reidy B. et al., *Mechanisms of Silver Nanoparticle Release, Transformation and Toxicity: A Critical Review of Current Knowledge and Recommendations for Future Studies and Application*, Materials 2013, nr 6, ss. 2295-2350.

dziedzinami, w których wykorzystywane są nanocząstki srebra, to właśnie przemysł włókienniczy jest sektorem, gdzie najczęściej używane jest srebro o nanometrycznych rozmiarach¹. Ponadto, zdecydowaną większość wśród wszystkich włókienniczych nanomateriałów funkcjonalnych stanowią tekstylia zawierające nanocząstki srebra. Należą do nich m.in. odzież sportowa, koszulki, skarpetki, bielizna i wiele innych¹.

Dzięki bioaktywnym właściwościom nanocząstek srebra, wyroby włókiennicze, do których wprowadzono ten rodzaj metalicznych nanocząstek, uzyskują nowe właściwości, np. dezodorujące czy antybakteryjne i antygrzybiczne. Dodatkowo, mikroorganizmy nie są odporne na srebro, w przeciwieństwie do szeroko stosowanych i często nadużywanych antybiotyków². W związku z tym tekstylia zawierające nanocząstki srebra są chętnie wykorzystywane w celach medycznych, np. z przeznaczeniem na nici chirurgiczne, opatrunki, a także jako odzież i pościel szpitalna.

Nanocząstki srebra można wprowadzać na powierzchnię gotowych wyrobów włókienniczych za pomocą obróbki wykończalniczej (np. poprzez napawanie, natryskiwanie czy powlekanie), mogą być one także generowane bezpośrednio na i wewnątrz wyrobu (metoda in-situ), a także wprowadzane do tworzywa na etapie formowania włókien³.

Sadeghian Maryan i współpracownicy przeprowadzili eksperyment, w którym poddali modyfikacji tkaninę jeansową barwioną barwnikiem indygo. Tkanina została wprowadzona do kąpieli zawierających azotan srebra i wodorotlenek sodu, przy czym w jednej z omawianych kąpeli użyto dodatkowo glukozę. Nanocząstki srebra syntezowano bezpośrednio na tkaninie jeansowej metodą redukcji chemicznej z użyciem (w zależności od składu zastosowanej kąpieli) bawełny, skrobi i/lub glukozy. Naukowcy z sukcesem przeprowadzili syntezę nanocząstek srebra, które nadały tkaninie właściwości bioaktywne – wykonane testy potwierdziły aktywność antybakteryjną tkaniny wobec *Escherichia coli* i *Staphylococcus aureus*. Ponadto, w kąpieli zawierającej glukozę, z uwagi na jej zdolność do redukcji barwnika, zaszedł proces odbarwienia tkaniny.

Dzięki temu, równocześnie z osiągnięciem właściwości antybakteryjnych, uzyskano popularny efekt postarzenia tkaniny jeansowej⁴. Innym przykładem zastosowania nanocząstek srebra we włókiennictwie są opatrunki z nanowłókien przeznaczone do leczenia ran pooparzeniowych. Rujitanaraj i współpracownicy wprowadzili azotan srebra do 70% wodnego roztworu kwasu octowego, a następnie

¹ Lombi E. et al., *Silver speciation and release in commercial antimicrobial textiles as influenced by washing*, Chemosphere2014, vol. 111, ss. 352-358.

² Landage S.M., Wasif A. I., *Nanosilver – an effective antimicrobial agent for finishing of textiles*, International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies 2012, vol. 4, nr 1, ss. 66-78.

³ Koźmińska R., et al., *Możliwości nadawania tekstyliom cech antybakteryjnych w obróbce wykończalniczej poprzez zastosowanie nanocząstek srebra*, Przegląd włókienniczy 2010, vol. 64, nr 12, ss. 36-39.

⁴ Sadeghian Maryan A. et al., *One step of silver nanoparticles and discoloration of blue cotton denim garment in alkali media*, J Polym Res2013, vol. 20, nr 189.

dodali odważony proszek żelatynowy. Otrzymany w ten sposób roztwór przechowywano 12h, po czym przeprowadzono proces elektroprzędzenia. Otrzymano nanowłókna o średnicach od 230 do 280 nm, zawierające nanocząstki o średnich rozmiarach około 13 nm, o potwierdzonym działaniu antybakteryjnym przeciwko *P. aeruginosa*, *S. aureus* oraz *E. coli*¹. Wendler i współpracownicy otrzymali natomiast włókna celulozowe typu Lyocell o nazwie ALCERU modyfikowane nanocząstkami srebra. Nanocząstki w postaci wodnej dyspersji zostały wprowadzone na etapie rozpuszczania celulozy i zamknięte w matrycy polimerowej włókien. Otrzymane włókna posiadają potwierdzone właściwości antybakteryjne i charakteryzują się dobrymi parametrami wytrzymałościowymi. Ponadto, włókna ALCERU cechują się także wysokim stopniem bieli, co sprawia, że mają one zastosowanie w produkcji białych koszulek i bielizny. Dodatkowo, włókna te mogą być wykorzystywane do produkcji białego papieru o relatywnie długim czasie przechowywania bez zmian w kolorze².

W niniejszym rozdziale przedstawiono jedną z możliwych modyfikacji włókien celulozowych Lyocell nanocząstkami srebra w celu otrzymania włókien antybakteryjnych. Obserwowane trendy ku stosowaniu metod modyfikacji włókien i tekstyliów, które będą w pełni przyjazne środowisku, przyczyniły się do realizacji badań w oparciu o tzw. „zieloną syntezę” nanocząstek srebra z użyciem glukozy i skrobi, tj. związków przyjaznych środowisku naturalnemu.

2. Część doświadczalna

2.1. Materiały

Do wykonania roztworów przedziałniczych zastosowano masę celulozową PLACETATE firmy Rayonier® o zawartości α -celulozy 98% i średnim stopniu polimeryzacji (DP) 1236. Rozpuszczalnikiem był 50% roztwór wodny N-tlenku N-metylomorfoliny (NMMO) firmy HUNTSMAN Corporation, a stabilizatorem termicznym – ester propylowy kwasu galusowego Tenox PG firmy Sigma®. Jako prekursor w reakcji syntezy nanocząstek srebra zastosowano azotan srebra AgNO_3 marki CHEMPUR®. Jako czynnik redukujący w reakcji syntezy nanocząstek srebra użyto glukozy ($\text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6$) (gęstość, 1,44 g/m³, temperatura topnienia 146°C, rozpuszczalność w wodzie 470 g/l, pH 6-7). Jako czynnik stabilizujący w reakcji syntezy nanocząstek srebra użyto skrobi ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$)_n (rozpuszczalność w wodzie 50 g/l, pH 6-7,5).

¹ Rujitanaraj P., et al., *Wound-dressing materials with antibacterial activity from electrospun gela-tin fiber mats containing silver nanoparticles*, Polymer 2008, vol. 49, ss. 4723-4732.

² Ali Raza Z., et al., *Development of antibacterial cellulosic fabric via clean impregnation of silver nanoparticles*, Journal of Cleaner Production 2015., vol. 101, ss. 377-386.

2.2. Przygotowanie roztworów do syntezy nanocząstek srebra

Przygotowanie roztworu azotanu srebra o stężeniu 0,01 mol/dm³

Odpowiednią ilość wcześniej odważonego azotanu srebra rozpuszczono w wodzie destylowanej tak, aby otrzymać roztwór o stężeniu 0,01 mol/dm³. Tak przygotowany roztwór przechowywano w lodówce bez dostępu do światła. Do procesu syntezy nanocząstek srebra stosowano taką objętość azotanu srebra, aby uzyskać stężenie srebra we włóknach na poziomie 500 ppm. Stężenie to zapewnia skuteczne działanie antybakteryjne włókien¹⁰.

Przygotowanie roztworu glukozy o stężeniu 0,01 mol/dm³

Roztwór wykonano rozpuszczając odpowiednią ilość odważonej glukozy w wodzie destylowanej. Ilość odważonego odczynnika redukującego wynika ze stosunku molowego srebra do glukozy, jaki bierze udział w reakcji (2:1).

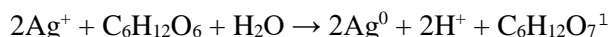
Przygotowanie roztworu skrobi o stężeniu 0,01 mol/dm³

Roztwór wykonano rozpuszczając odpowiednią ilość odważonej skrobi w wodzie destylowanej. Ilość odważonego odczynnika stabilizującego została wyznaczona w oparciu o reakcje redukcji azotanu srebra i wynika ze stosunku molowego srebra do skrobi, jaki bierze udział w reakcji (2:1).

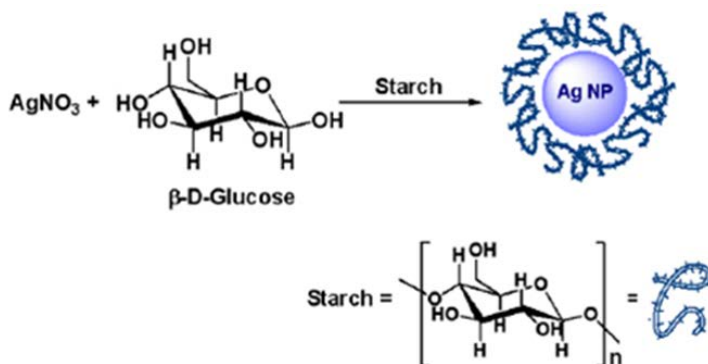
2.3. Synteza nanocząstek srebra

Nanocząstki srebra syntezowano wykorzystując metodę chemicznej redukcji jonów srebra. Jako odczynnik redukujący zastosowano glukozę, a jako odczynnik stabilizujący – skrobię.

Redukcja azotanu srebra glukozą z wykorzystaniem skrobi przebiegła według poniższej reakcji:



¹ Kulpiński P., *Bioactive cellulose fibers with silver nanoparticles*, e-Polymers 2007, nr 068, ss. 1-12.



Rys. 1 Uproszczony schemat (zielonej) syntezy nanocząstek przy użyciu glukozy i skrobi¹⁰

Źródło: opracowanie własne.

Ilość użytych odczynników: redukującego (glukozy) i stabilizującego (skrobi) wynika ze stosunku molowego srebra do pozostałych substratów reakcji i wynosi dla każdego z odczynników 2:1. Przygotowane roztwory glukozy i skrobi wprowadzono do odmierzonego wcześniej NMMO, po czym wkroplono azotan srebra. Proces syntezy nanocząstek srebra w przygotowanych w ten sposób układach prowadzono w ciemni przy zastosowaniu zmiennych parametrów czasu i temperatury, przedstawionych w Tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka roztworów nanocząstek srebra.

Oznaczenie próbki	Czas inkubacji [h]	Temperatura inkubacji [°C]
R _S	-	-
R-12/20	12	20
R-24/20	24	20
R-12/50	12	50
R-24/50	24	50

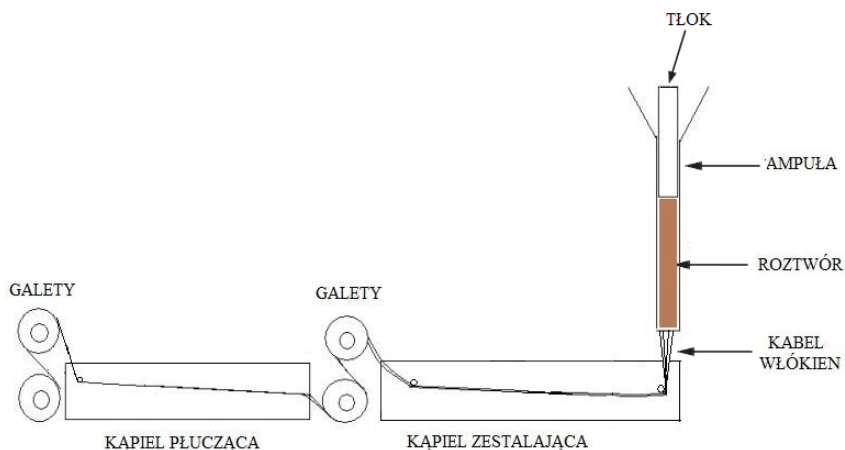
Źródło: opracowanie własne.

2.4. Sporządzanie roztworów przędzalniczych zawierających nanocząstki srebra

Roztwory przędzalnicze przygotowano przy użyciu mieszalnika marki IKAVISK, posiadającego płaszcz grzejny oraz dwa poziome mieszadła, poprzez dodanie uprzednio wykonanych roztworów nanocząstek srebra do rozdrobnionej masy celulozowej. Proces przeprowadzono pod zmniejszonym ciśnieniem. Temperatura końcowa procesu osiągnęła około 112°C, czas rozpuszczania celulozy w NMMO wyniósł około 120 minut, a ilość odebranej każdorazowo wody to 180 ± 5 cm³ wody. Stężenie celulozy w otrzymanych roztworach wyniosło 8%.

2.5. Formowanie włókien ze sporządzonych roztworów przędzalniczych

Włókna formowano metodą sucho-mokrą na przędzarce laboratoryjnej. Płyn przędzalniczy był wytłaczany przez kanaliki dyszy o 18 otworach, przechodził przez strefę powietrzną, a następnie strużki roztworu były zestalane we włókna w kąpeli zestalającej. Włókna płukano i suszono. Schemat formowania włókien został przedstawiony na Rysunku 2.



Rys. 2 Schemat formowania włókien metodą sucho-mokrą.

Źródło: opracowanie własne.

2.6. Metody badania włókien

W celu przeprowadzenia pomiarów spektrofotometrycznych układów NMMO z wygenerowanymi nanocząstkami srebra wykorzystano metodę spektrofotometrii UV-Vis. Badania przeprowadzono wykorzystując spektrofotometr Jasco UV/VIS (Japonia), w zakresie długości fali 290 - 700 nm. Układy NMMO z nanocząstkami srebra rozcieńczano w stosunku 1:1 wodą destylowaną. Roztworem odniesienia był

rozcieńczony wodą destylowaną w takim samym stosunku N-tlenek-N-metylomorfoliny (NMMO).

Analiza wielkości nanocząstek srebra, ich rozkładu średnicy oraz udziału objętościowego i liczbowego, a także intensywności dynamicznego rozpraszania światła została przeprowadzona metodą Dynamicznego Rozpraszania Światła (DLS). Badania zostały wykonane w temperaturze 25°C na urządzeniu PSS NICOMP 380. Przed pomiarami, próbki włókien z nanocząstkami srebra naświetlono promieniowaniem UV o dawce 50 J/cm² w celu obniżenia stopnia polimeryzacji celulozy, co pozwoliło otrzymać roztwory o odpowiedniej lepkości. Naświetlone próbki włókien o masie około 0,07 gram rozpuszczono w EWNN – winianie sodowo-żelazowym i wytrząsano przez 1h na wytrząsarce laboratoryjnej.

Obserwację rozmieszczenia nanocząstek w matrycy polimerowej włókien przeprowadzono przy wykorzystaniu transmisyjnej mikroskopii elektronowej (TEM). Obserwacje wykonano na Transmisyjnym Mikroskopie elektronowym TENCAI G2 FEG 20 (200 kV) z wykorzystaniem techniki „jasnego pola” (procedura P/19/IB-05). Wykonano obserwacje wysokorozdzielcze HRTEM (Wysokorozdzielcza Transmisyjna Mikroskopia Elektronowa, ang. High-Resolution Transmission Electron Microscopy) włókien z nanocząstkami srebra. Oznaczenie sorpcji wilgoci włókien zostało wykonane w oparciu o normę PN-71/P-04635, a oznaczenie retencji wody przez włókna w oparciu o normę PN-72/P-04800.

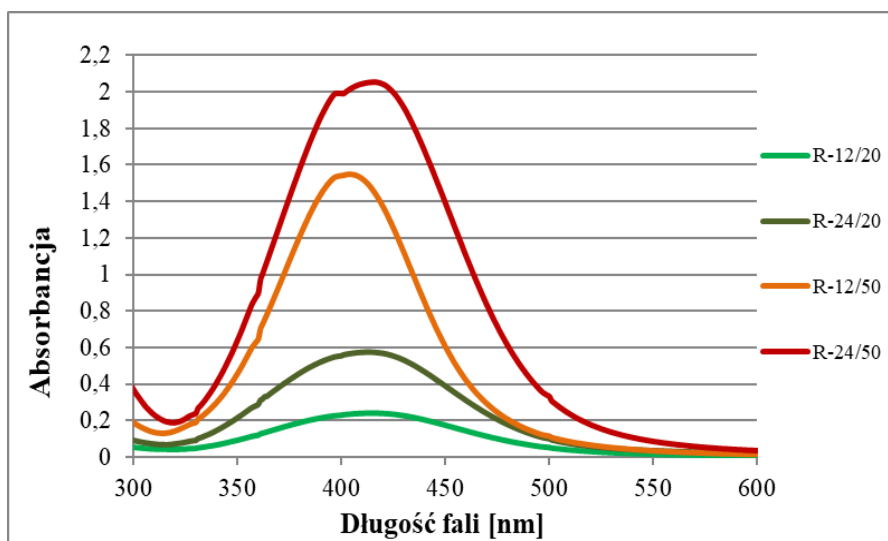
Podstawowe parametry wytrzymałościowe włókien oznaczano poprzez pomiar masy liniowej, wytrzymałości na rozerwanie i wydłużenia względnego włókien. Pomiar masy liniowej włókien wykonano według normy ISO 1973:1995 (E). Wytrzymałość na rozerwanie i wydłużenie względne zostały wyznaczone według normy PN-EN ISO 5079:1999 na zrywarce laboratoryjnej ZWICK/Z 2.5/TN1S wyposażonej w oprogramowanie TestXpert v 7.1.

3. Omówienie wyników badań

W celu potwierdzenia obecności nanocząstek w syntezowanych układach NMMO, jako że nanocząstki posiadają zdolność absorpcji promieniowania widzialnego z maksimum w przedziale 400 – 500 nm, wykonano badania spektrofotometryczne układów NMMO. Oceniono także stopienia przereagowania azotanu srebra w NMMO przy użyciu glukozy i skrobi w zależności od temperatury i czasu syntezy. Na Rysunku 3 przedstawiono widma UV-Vis roztworów syntezowanych w ciemni przy zmiennych parametrach czasu i temperatury.

Można zauważyć, że maksima absorbancji mieszczą się przy długościach fali w zakresie 406 - 418 nm, co potwierdza obecność nanocząstek srebra w badanych układach. Obserwuje się również wzrost wartości absorbancji wraz z wydłużaniem czasu syntezy nanocząstek, jak również wraz z podwyższeniem temperatury syntezy. W przypadku syntezy nanocząstek srebra w temperaturze 20°C zauważalne są niskie wartości absorbancji ok. 0,2 (12 godzinna synteza) i ok. 0,6 (24 godzinna synteza).

Oznacza to niewielki stopień przereagowania azotanu srebra w NMMO i wskazuje na obecność w układzie niewielkiej ilości nanocząstek srebra. Podwyższenie temperatury syntezy nanocząstek srebra, jak również wydłużenie czasu ich syntezy przyczynia się do znacznego wzrostu wartości absorpcji i oznacza przereagowanie prekursora w NMMO w znacznym stopniu. Wysoka wartość absorpcji rzędu ok. 2,1 obserwowana w przypadku analizy syntezowanego roztworu R-24/50 może świadczyć o praktycznie całkowitym przereagowaniu prekursora w NMMO.



Rys. 3 Porównanie zależności absorpcji w funkcji długości fali dla nanocząstek srebra syntezowanych w układach NMMO-AgNO₃-Glukoza-Skrobia w temperaturach 20 i 50 °C i w czasie 12 i 24h.

Źródło: opracowanie własne.

W celu pełniejszej analizy nanocząstek srebra otrzymanych w układach NMMO oraz we włóknach celulozowych przeprowadzono badanie wielkości nanocząstek metodą Dynamicznego Rozpraszania Światła. Badanie wielkości nanocząstek srebra metodą DLS umożliwiło określenie udziału liczbowego i objętościowego cząstek, które były obecne w roztworze, a także intensywność rozpraszanej przez nanocząstki światła. Oprogramowanie komputerowe aparatu użytego do badania DLS traktuje wszystkie wykryte nanocząstki jako 100% i dokonuje ich podziału, w zależności od rozmiaru, na trzy frakcje. Oś oznaczona na wykresie jako REL. to wartość względna, wyrażona w [%]. W celu możliwości porównania wykonane zostało także badanie roztworu rozpuszczonego włókna bez modyfikacji (WS) oraz wodnego roztworu NMMO, który nie zawierał nanocząstek srebra (RS). Aby zbadać wpływ czasu przeprowadzonej syntezy na wielkość nanocząstek srebra, analizę przeprowadzono oddzielnie dla syntezy zarówno w temperaturze 20°C oraz w 50°C. Wyniki zamieszczono w Tabeli 2 i Tabeli 3.

Analiza wyników przedstawionych w Tabelach 2 i 3 pozwala zauważyć, że w przypadku rozpuszczonego włókna standardowego bez modyfikacji (WS)

występuje tylko jedna frakcja cząstek o średnicy 3,8 nm, która wskazuje na obecność kłębków nierozpuszczonej celulozy, co potwierdzają dane literaturowe¹.

Dokonana analiza DLS wykazała, że najlepsze parametry otrzymanych nanocząstek srebra uzyskano poprzez przeprowadzenie procesu syntezy nanocząstek w temperaturze 50°C i czasie 12 godzin. Obecne we włóknach W-12/50 nanocząstki miały średnicę około 26 nm i stanowiły – co warto podkreślić – około 99% rozpatrywanej populacji cząstek. Udział aglomeratów nanocząstek wynosił zaledwie 1%. Wydłużenie czasu syntezy nanocząstek do 24 godzin w analizowanej temperaturze skutkowało zwiększeniem średnicy otrzymywanych nanocząstek srebra do około 65 nm i wytworzeniem dużej ilości aglomeratów.

Zastosowanie niższej temperatury syntezy nanocząstek srebra równej 20°C, niezależnie od czasu prowadzenia procesu, wpłynęło na powstanie większych nanocząstek srebra o średnicach na poziomie 60 – 70 nm, a także dużych udziałów aglomeratów nanocząstek.

Tabela 2. Analiza nanocząstek w układach NMMO-AgNO₃-Glukoza-Skrobia oraz w układach rozpuszczonych włókien z nanocząstkami srebra, syntezowanymi w różnym czasie, w temperaturze 20°C w porównaniu z włóknami niemodyfikowanych (W_s) oraz wodnym roztworem NMMO (R_s).

Próba	Fracja	Udział objętościowy		Udział liczbowy	
		Średnica [nm]	Udział procentowy [%]	Średnica [nm]	Udział procentowy [%]
W _s	1	3,8	100	3,8	100
R _s	1	423,7	100	410,5	100
R-12/20	1	2,4	100	2,3	100
	2	----	----	----	----
	3	----	----	----	----
W-12/20	1	59,8	8,0	58,4	81,5
	2	639,9	7,9	619,0	7,7
	3	4276,8	84,1	4048,9	10,8
R-24/20	1	2,4	99,7	2,4	99,8
	2	4,7	0,3	4,7	0,2
	3	25,5	<0,1	25,0	<0,1
W-24/20	1	64,9	9,6	63,4	83,2
	2	523,9	5,0	507,4	5,6
	3	3796,9	85,3	3695,7	11,2

Źródło: opracowanie własne.

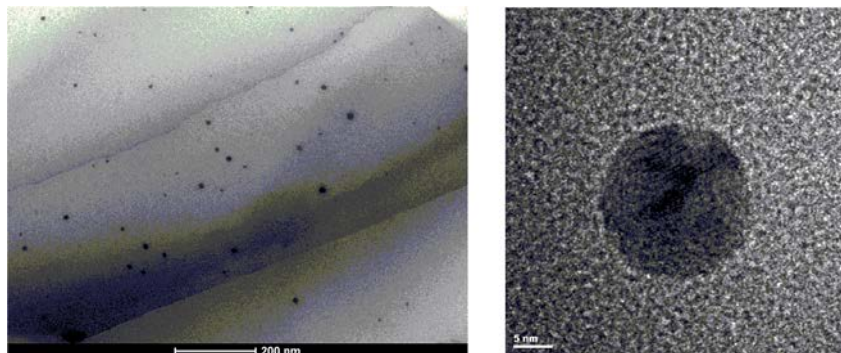
¹ Saalwachter K., et al., *Cellulose Solutions in Water Containing Metal Complexes*, *Macromolecules* 2000, vol. 33, nr 11, ss. 4094-4107.

Tabela 3. Analiza nanocząstek w układach NMMO-AgNO₃-Glukoza-Skrobia oraz w układach rozpuszczonych włókien z nanocząstkami srebra, syntezowanymi w różnym czasie, w temperaturze 50°C w porównaniu z włóknami niemodyfikowanych (WS) oraz wodnym roztworem NMMO (RS).

Próba	Frakcja	Udział objętościowy		Udział liczbowy	
		Średnica [nm]	Udział procentowy [%]	Średnica [nm]	Udział procentowy [%]
W _s	1	3,8	100	3,8	100
R _s	1	423,7	100	410,5	100
R-12/50	1	17,8	87,7	17,5	98,2
	2	122,7	12,3	118,9	1,8
	3	----	----	----	----
W-12/50	1	27,4	57,2	26,4	99,0
	2	190,4	0,7	178,5	0,2
	3	2301,6	42,1	2228,2	0,8
R-24/50	1	----	----	----	----
	2	84,0	51,8	79,5	94,0
	3	1231,1	48,2	1189,1	6,0
W-24/50	1	66,0	2,3	63,6	74,5
	2	937,2	4,4	909,7	8,4
	3	8851,6	93,4	8715,5	17,1

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki analizy przeprowadzonej metodą DLS zweryfikowano i uzupełniono obrazami nanocząstek w wytypowanych włóknach, które wykonano metodą Transmisyjnej Mikroskopii Elektronowej (TEM). Badania wykonano na transmisyjnym mikroskopie elektronowym TENCAI G2 FEG 20 (200 kV). Obrazy pozwoliły uzupełnić wyniki analizy nanocząstek metodą DLS; zwrócono uwagę na rozmiar, kształt i rozmieszczenie nanocząstek w matrycy włókien. Obrazy wykonane metodą TEM uzyskanych we włóknach W-12/50 nanocząstek srebra przedstawiono na Rysunku 3.



Rys. 3 Obrazy nanocząstek srebra we włóknach W-12/50 wykonane metodą TEM
Źródło: opracowanie własne.

Analiza obrazów nanocząstek srebra we włóknie W-12/50 wykonana metodą TEM potwierdziła obecność nanocząstek srebra o sferycznym kształcie. Ponadto, zaobserwowano stosunkowo duży udział nanocząstek powyżej 20 nm. Można zauważyć również stosunkowo równomierne rozmieszczenie nanocząstek srebra w matrycy polimerowej analizowanego włókna.

Z uwagi na ewentualne przeznaczenie włókien modyfikowanych na materiały opatrunkowe celem badań było porównanie właściwości higroskopijnych włókien modyfikowanych z włóknami niemodyfikowanymi. Właściwości higroskopijne określano poprzez pomiar sorpcji wilgoci przez włókna w temperaturze 20°C i przy RH 65% oraz przez pomiar retencji wody we włóknach. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Wyniki pomiarów sorpcji wilgoci i retencji wody przez otrzymane włókna.

Oznaczenie próbki	Inkubacja		Sorpcja wilgoci [%]	Retencja wody [%]
	Czas [h]	Temperatura [°C]		
W _s	-	-	10,56	57,76
W-12/20	12	20	10,32	56,03
W-24/20	24	20	10,42	57,24
W-12/50	12	50	10,45	55,87
W-24/50	24	50	10,70	58,65

Źródło: opracowanie własne.

Analizując wyniki sorpcji wilgoci i retencji wody przez otrzymane włókna można stwierdzić, że wartości tych parametrów dla włókien modyfikowanych i włókna standardowego są na zbliżonym poziomie. Zarówno wprowadzone nanocząstki srebra, jak i warunki ich syntezy, nie wpłynęły na właściwości higroskopijne otrzymanych włókien celulozowych typu Lyocell.

W celu sprawdzenia wpływu nanocząstek srebra i warunków ich generowania na parametry mechaniczne włókien przeprowadzono badania wytrzymałości na

rozerwanie oraz wydłużenia względnego włókien (Tabela 5). Przeprowadzone badania pozwalają stwierdzić, że wartości zbadanych parametrów wytrzymałościowych otrzymanych włókien Lyocell modyfikowanych nanocząstkami srebra nie różnią się znacząco wobec włókien standardowych bez nanocząstek. Niewielkie różnice między wartościami mogą wynikać z formowania włókien na przędzarce laboratoryjnej oraz samej specyfiki procesu ich otrzymywania.

Tabela 5. Wyniki pomiarów parametrów wytrzymałościowych włókien celulozowych.

Oznaczenie próbki	Inkubacja		Masa liniowa [dtex]	Wytrzymałość na rozerwanie [cN/tex]	Wydłużenie [%]
	Czas [h]	T [°C]			
W _s	-	-	3,002	29,33	7,89
W-12/20	12	20	2,933	25,74	8,48
W-24/20	24	20	3,001	25,04	8,58
W-12/50	12	50	3,720	28,83	7,88
W-24/50	24	50	3,080	29,17	6,62

Źródło: opracowanie własne.

Oznacza to, iż wprowadzenie nanocząstek do matrycy polimerowej nie wykazało istotnego wpływu na właściwości mechaniczne otrzymanych włókien.

4. Podsumowanie

W ramach przeprowadzonych badań otrzymano włókna celulozowe typu Lyocell z nanocząstkami srebra, które syntezowano w obecności sacharydów wykorzystując tzw. „zieloną” syntezę przyjazną środowisku naturalnemu. Przeprowadzenie procesu syntezy w temperaturze 20°C spowodowało wytworzenie znikomej ilości nanocząstek srebra w układzie NMMO i przyczyniło się do wygenerowania dużych nanocząstek i ich aglomeratów w mieszalniku laboratoryjnym. Skutkiem tego było otrzymanie we włóknach nanocząstek rzędu 60-70 nm i ich aglomeratów o bardzo dużych rozmiarach.

Optymalne warunki, pozwalające na otrzymanie największego udziału stosunkowo małych nanocząstek srebra rzędu około 26 nm i znikomego udziału aglomeratów we włóknach, uzyskano prowadząc syntezę nanocząstek w temperaturze 50°C i czasie 12h. Wydłużenie czasu syntezy nanocząstek w temperaturze 50°C spowodowało wytworzenie nanocząstek srebra o większych średnicach (około 65 nm) i dużych udziałach aglomeratów. Obecność nanocząstek srebra w matrycy włókien nie spowodowała negatywnych zmian we właściwościach wytrzymałościowych i higroskopijnych omawianych włókien.

Literatura

- [1] **Reidy B., et al.**, Mechanisms of Silver Nanoparticle Release, Transformation and Toxicity: A Critical Review of Current Knowledge and Recommendations for Future Studies and Application, *Materials* 2013, nr 6, ss. 2295-2350.
- [2] **Lombi E., et al.**, Silver speciation and release in commercial antimicrobial textiles as influenced by washing, *Chemosphere* 2014, vol. 111, ss. 352-358.
- [3] **Landage S.M., Wasif A.I.**, Nanosilver – an effective antimicrobial agent for finishing of textiles, *International Journal of Engineering Sciences & Emerging Technologies* 2012, vol. 4, nr 1, ss. 66-78.
- [4] **Koźmińska R., et al.**, Możliwości nadawania tekstyliom cech antybakteryjnych w obróbce wykończalniczej poprzez zastosowanie nanocząstek srebra, *Przegląd włókienniczy* 2010, vol. 64, nr 12, ss. 36-39.
- [5] **Sadeghian Maryan A., et al.**, One step of silver nanoparticles and discoloration of blue cotton denim garment in alkali media, *J Polym Res* 2013, vol. 20, nr 189.
- [6] **Zhang S., Luo J.**, Preparation and Properties of Bacterial Cellulose/Alginate Blend Bio-Fibers, *Journal of Engineered Fibers and Fabrics* 2011 vol. 6, nr 3, ss. 69-72.
- [7] **Rujitanaraj P., et al.**, Wound-dressing materials with antibacterial activity from electrospun gela-tin fiber mats containing silver nanoparticles, *Polymer* 2008, vol. 49, ss. 4723-4732.
- [8] **Ali Raza Z., et al.**, Development of antibacterial cellulosic fabric via clean impregnation of silver nanoparticles, *Journal of Cleaner Production* 2015, vol. 101, ss. 377-386.
- [9] **Kulpiński P.**, Bioactive cellulose fibers with silver nanoparticles, *e-Polymers* 2007, nr 068, ss. 1-12.

OCENA ZAWARTOŚCI SREBRA W WYBRANEJ GRUPIE WYROBÓW BIOMEDYCZNYCH METODĄ ATOMOWEJ SPEKTROSKOPII ABSORPCYJNEJ

Marta Olesińska, Grzegorz Szparaga

*Instytut Materiałoznawstwa Tekstyliów i Kompozytów Polimerowych
Wydział Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów
Politechnika Łódzka*

1. Wstęp

Historia opatrunków jest niemal tak długa jak historia ludzkości. Choć dziś znamy wiele ich rodzajów, od zwykłych bandaży czy gazy, do specjalistycznych opatrunków hydrożelowych, to najpopularniejszym ich rodzajem są plastry opatrunkowe.

Plaster to fragment materiału opatrunkowego z substancją samoprzylepną, która uniemożliwia przesunięcie się jego z obszaru rany.

Historia plastrów opatrunkowych rozpoczęła się w 1920 roku, kiedy to Earle Dickson, pracownik amerykańskiej firmy Johnson & Johnson, wpadł na pomysł jak pomóc swojej małżonce Josephine Knight, która często kaleczyła się podczas prac domowych. Przymocował on kawałek gazy do taśmy chirurgicznej, a następnie zabezpieczył całość krynoliną. W taki właśnie sposób powstał pierwszy w historii plater opatrunkowy. Dickinson przedstawił swój wynalazek kierownikowi przedsiębiorstwa, w którym pracował, a ten zdecydował się na rozpoczęcie jego produkcji. Plastry na początku bardzo słabo się sprzedawały, lecz zostały docenione przez skautów, którzy spopularyzowali ten niezwykle łatwy w użyciu typ opatrunku.

Wadą pierwszych plastrów był ich nieporęczny rozmiar wynoszący 46 x 6 centymetrów, dlatego też w roku 1924 firma Johnson & Johnson rozpoczęła produkcję plastrów opatrunkowych w wielu różnych rozmiarach, natomiast w 1958 roku celulozowe taśmy chirurgiczne zostały zastąpione przez taśmy winylowe [1,2].

Od tego czasu wiele się zmieniło, na rynku pojawiły się nowe rodzaje materiałów opatrunkowych i nowe metody ich produkcji. Same plastry również bardzo się zmieniły na przestrzeni lat. Powstały plastry specjalistyczne dostosowane do różnych typów ran: po oparzeniach, pooperacyjnych z dużym wysiękiem, odleżynowych i wielu innych. Obecnie bardzo popularnym rodzajem plastra jest taki, który zawiera srebro jonowe w materiale opatrunkowym.

Srebro jako antybiotyk znane jest już od starożytności. Ówczesni ludzie dodawali kawałki srebra do wody w celu zahamowania rozwoju w niej drobnoustrojów tym samym przedłużając jej zdatność do spożycia. Podczas I wojny światowej w szpitalach wojskowych stosowano srebro na rany i poparzenia żołnierzy aby zapobiec ich zainfekowaniu.

Współcześni badacze udowodnili, że pierwiastek ten wykazuje bardzo silne właściwości bakteriobójcze w szerokim spektrum drobnoustrojów [3]. Szwedzki dokument MEDTECH podaje, że „Jak dotąd nie istnieją udokumentowane przypadki, gdzie oporność na srebro doprowadziła do śmiertelnej choroby. Nie ma dostępnej alternatywy terapeutycznej dla zastosowania srebra. Stosowanie opatrunków zawierających srebro może obniżyć potrzebę przepisywania z systemowych. Może także przyczynić się do uniknięcia rozwoju oporności na antybiotyki u pacjentów z zaburzeniami gojenia ran.” Świadczy to o tym jak skutecznym preparatem antybakteryjnym jest srebro, bowiem brak konieczności przepisywania dodatkowych antybiotyków ma na pewno korzystny wpływ na ogólny stan zdrowia pacjenta [4].

Opatrunki zawierające aktywne srebro tworzą osobną grupę materiałów opatrunkowych. Srebro stanowi składnik aktywny w wielu typach opatrunków, np. może być wykorzystywany w opatrunkach piankowych, algininowych oraz typu Hydrofiber (w kontakcie z wydzieliną z rany opatrunek przybiera postać żelu) [5].

Opatrunki ze srebrem znalazły zastosowanie przede wszystkim w leczeniu ran zakażonych. Działanie srebra jest szczególnie ważne, gdy bakterie w miejscu leczonego zranienia wykazują odporność na leki przeciwdrobnoustrojowe. Srebro jonowe pozwala kontrolować środowisko pod opatrunkiem co niweluje konieczność stosowania antybiotyków, w konsekwencji ograniczając wykształcenie się lekooporności wśród drobnoustrojów.

Właściwości antybakteryjne srebra obejmują bardzo szerokie spektrum drobnoustrojów. Uwalniane z opatrunku jony srebra wykazują skuteczne działanie zarówno wobec bakterii Gram-dodatnich jak i Gram-ujemnych. W przypadku bakterii Gram-dodatnich należy zwrócić szczególną uwagę na skuteczność w zwalczaniu gronkowców (w tym szczepów metycyloopornych np. MRSA- methycillin-resistant *Staphylococcus aureus*) i enterokoków (w tym szczepów VRE- vancomycin-resistant *Enterococcus*). Przy Gram-ujemnych bakteriach najważniejsza jest skuteczność na pałeczki z rodziny *Eterobacterales* oraz pałeczki niefermentujące [6-9].

Srebro w postaci metalicznej (Ag^0) reagując z wysiękiem z rany lub z potem może jonizować do postaci jonu (Ag^+). Jon ten jest wysoce reaktywny, wykazuje zdolności do oddziaływania z białkami, wolnymi aminami i resztami aminokwasowymi drobnoustrojów. Jony (Ag^+) są w stanie reagować z grupami występującymi w ścianach komórkowych bakterii i usuwać z nich atomy wodoru. Bakteria z uszkodzoną w ten sposób strukturą traci możliwość wymiany gazowej w tzw. łańcuchu oddechowym poprzez zamknięcie kanałów przenoszących elektrony, co prowadzi do śmierci komórki. Ponadto srebro przenikając dalej przez ścianę komórkową bakterii może uszkadzać jej DNA i mitochondrium oraz hamować procesy naprawcze. Dodatkowym walorem srebra jest to, że drobnoustroje nie są w stanie wytworzyć lekooporności na ten pierwiastek, ponieważ wymaga to zbyt wielu jednoczesnych zmian w ich kodzie genetycznym. [10-11]

2. Część doświadczalna

2.1. Aparatura badawcza

Do oznaczenia zawartości srebra w próbkach w pracy wykorzystywano spektrometr absorpcji atomowej iCE 3500 firmy Thermo Scientific, Urządzenie umożliwia pracę techniką płomieniową, techniką kuwety grafitowej oraz techniką wodorków/zimnych par rtęci. W zależności od ustawionych parametrów pracy aparatu, rodzaju pierwiastka i wybranej techniki urządzenie umożliwia wykonanie oznaczeń na poziomie $\mu\text{g/l}$.

Do oznaczenia całkowitej zawartości srebra w próbkach konieczne było dokonanie mineralizacji próbek, tak aby można było całkowicie przeprowadzić je do postaci roztworu. Do tego celu wykorzystywano mineralizator mikrofalowy marki MILESTONE typu START D Microwave Digestion System. Urządzenie umożliwia realizację procesu mineralizacji w naczyniach teflonowych przy podwyższonym ciśnieniu. Kontrola procesu realizowana jest poprzez pomiar temperatury wewnątrz naczynia do mineralizacji.

Do oznaczenia srebra uwalnianego z próbek wykorzystywano wytrząsarke laboratoryjną marki C1pan, typ 357. Urządzenie posiada precyzyjny układ do regulacji temperatury oraz umożliwia regulację procesu wytrząsania próbek w zakresie częstotliwości oraz amplitudy oscylacji.

W pracy wykorzystywano wagę elektroniczną marki RADWAG, model: AS 510.3Y, posiadającą funkcję rejestracji ciśnienia atmosferycznego i temperatury otoczenia.

Do przygotowania wody dejonizowanej wykorzystywano stację oczyszczania wody ThermoFisher Barnstead™ Smart2Pure™ umożliwiającą uzyskanie wody analitycznej klasy 2.

Do sporządzania roztworów do krzywej kalibracyjnej wykorzystywano pipety automatyczne firmy HLT oraz kolby miarowe klasy A firmy Chemland.

Przed sporządzeniem roztworów do analizy zostało wykonane sprawdzenie pipet i kolb miarowych metodą grawimetryczną z uwzględnieniem temperatury otoczenia.

2.2. Stosowane odczynniki

Woda dejonizowana analityczna klasy 2.

Spektralnie czysty kwas azotowy o stężeniu 65% firmy Merck.

Certyfikowany materiał referencyjny marki Certipur firmy Merck – ICP multi-element standard solution IV. Jest to wzorzec wielopierwiastkowy zawierający 23 pierwiastki rozpuszczone w kwasie azotowym o stężeniu 1000 mg/l każdy. Gęstość roztworu wzorca w temperaturze 20°C wynosi 1,0896 g/cm³. Wzorzec ten wykorzystany został do sporządzenia roztworów użytych podczas tworzenia krzywej kalibracyjnej.

Certyfikowany materiał referencyjny marki TeraCERT firmy Sigma-Aldrich – Multielement standard solution V for ICP. Jest to wzorzec wielopierwiastkowy zawierający 27 pierwiastków rozpuszczonych w kwasie azotowym, w tym srebro, którego zawartość wynosiła 10 mg/l. Gęstość roztworu wzorca w temperaturze 20°C wynosi 1,0557 g/cm³. Wzorzec ten wykorzystany został do kontroli poprawności wykonania krzywej kalibracyjnej.

2.3. Obiekt badań

Do badań wybrane zostały cztery rodzaje komercyjnie dostępnych plastrów opatrunkowych, w składzie których producenci deklarowali obecność srebra.

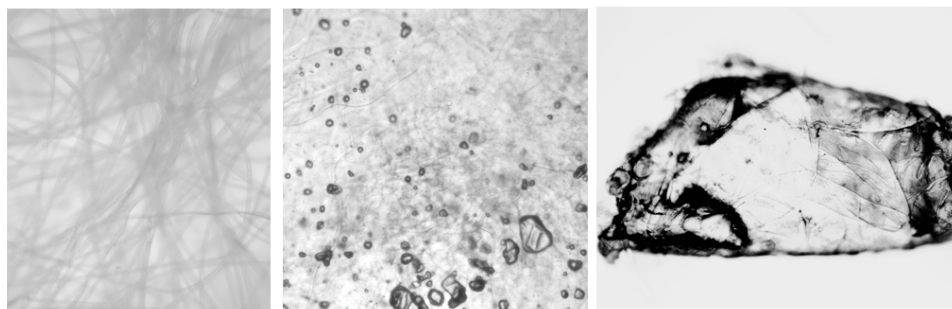
Próbka 1 - Aquacel Ag Foam - to miękki i chłonny antybakteryjny opatrunek piankowy zawierający jony srebra, przeznaczony do opatrywania ran z wysiękiem umiarkowanym lub obfitym. Odsąca wydzieliny i przeciwdziała maceracji skóry. Zdjęcia opatrunku przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Zdjęcie opatrunku Aquacel Ag Foam

Źródło: opracowanie własne.

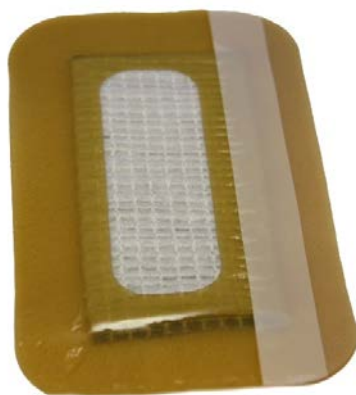
Dla opatrunku przeprowadzono obserwacje mikroskopowe w celu dokładnego zbadania jego budowy. Zdjęcia elementów struktury plastra przedstawiono na rysunku 3. Pierwsze zdjęcie przedstawia włókna ze środkowej warstwy opatrunku bez cieczy immersyjnej. Kolejne zdjęcie przedstawia widok włókien oraz niewielkie fragmenty sorbentu zanurzone w cieczy immersyjnej w postaci wody destylowanej. Na ostatnim zdjęciu widoczny jest napęczniały kawałek sorbentu.



Rys. 2. Analiza mikroskopowa opatrunku Aquacel Ag Foam.
Powiększenia: 100x, 100x z cieczą immersyjną, 100x.

Źródło: opracowanie własne.

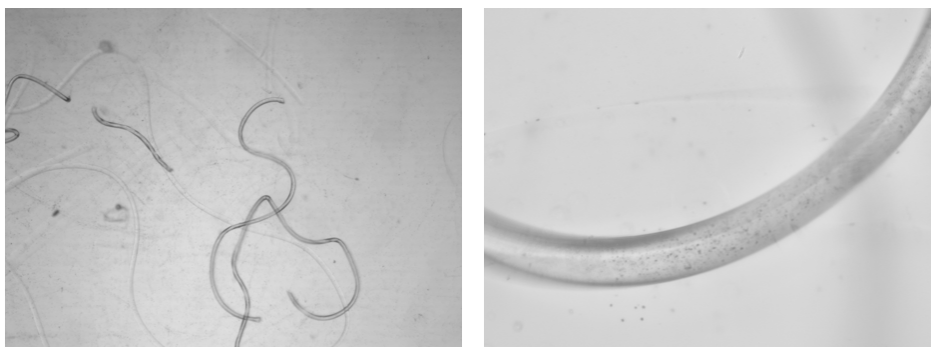
Próbka 2 - Aquace Ag Surgical – jest to chłonny opatrunek antybakteryjny, dedykowany pacjentom po operacjach. Wchłania nadmiar wysięku oraz zabezpiecza ranę dzięki deklarowanej przez producenta zawartości srebra. Redukuje ryzyko pojawienia się pęcherzy oraz maceracji skóry. Zdjęcia opatrunku przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Zdjęcie opatrunku Aquace Ag Surgical

Źródło: opracowanie własne.

Dla opatrunku przeprowadzono obserwacje mikroskopowe w celu dokładnego zbadania jego budowy. Zdjęcia elementów struktury plastra przedstawiono na rysunku 4. Widoczne na zdjęciu są dwa rodzaje włókien pochodzących z wewnętrznej warstwy opatrunku, jasne przezroczyste oraz ciemniejsze. Na większym powiększeniu w ciemnych włóknach widoczne są zatopione w całej objętości drobiny, będące najprawdopodobniej dodatkiem srebra.



Rys. 4. Analiza mikroskopowa opatrunku Aquace Ag Surgical. Powiększenia: 100x, 250x

Źródło: opracowanie własne.

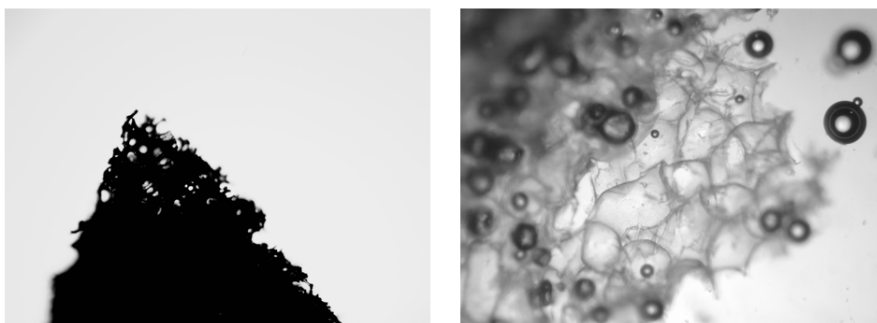
Próbka 3 - Opatrunek Allevyn Ag Sacrum - jest to samoprzylepny, poliuretanowy opatrunek ze srebrem. Przeznaczony do przewlekłych owrzodzeń, odleżyn oraz pęcherzowego oddzielania się naskórka (łac. *epidermolysis bullosa*). Jego właściwości chłonne pozwalają opatrywać rany o umiarkowanym i obfitym wysięku. Ten rodzaj opatrunku posiada specjalny kształt dostosowujący się do okolic lędźwiowo-krzyżowych. Zdjęcie opatrunku przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Zdjęcie opatrunku Allevyn Ag Sacrum

Źródło: opracowanie własne.

Dla opatrunku przeprowadzono obserwacje mikroskopowe w celu dokładnego zbadania jego budowy. Zdjęcia elementów struktury plastra przedstawiono na rysunku 6. Zdjęcia przedstawiają strukturę opatrunku wykonanego z pianki poliuretanowej, kuliste obiekty na drugim zdjęciu to pęcherzyki powietrza w cieczy immersyjnej.



Rys. 6. Analiza mikroskopowa opatrunku Allevyn Ag Sacrum. Powiększenia: 100x, 250x.

Źródło: opracowanie własne.

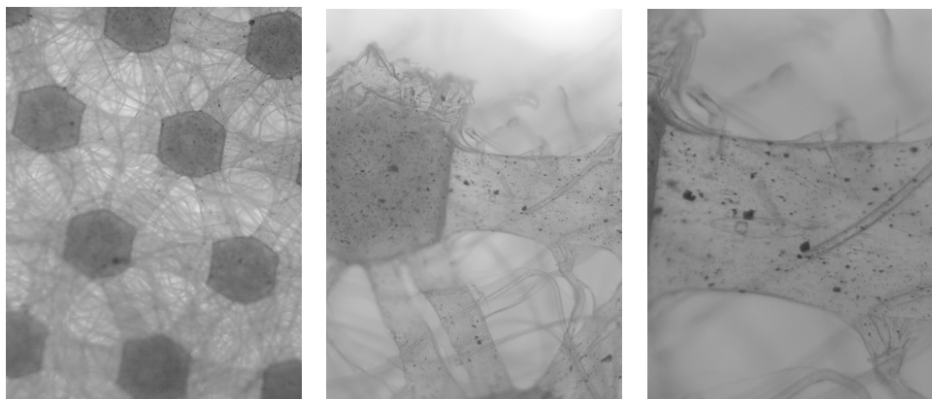
Próbka 4 - bezlateksowy, wodoodporny plaster samoprzylepny Figo. Opatrunek ten służy do szybkiego i łatwego leczenia drobnych urazów. Powierzchnie klejące są mikroperforowane dla lepszej cyrkulacji powietrza. Zdjęcia opatrunku przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Zdjęcie opatrunku Figo.

Źródło: opracowanie własne.

Dla opatrunku przeprowadzono obserwacje mikroskopowe w celu dokładnego zbadania jego budowy. Zdjęcia elementów struktury plastra przedstawiono na rysunku 8. Pierwsze ze zdjęć przedstawia warstwę kontaktową opatrunku, widoczna jest siatka z tworzywa sztucznego oraz włókna znajdujące się za nią. Na kolejnych przybliżeniach dokładnie widoczne są zatopione w strukturze siatki fragmenty dodatku prawdopodobnie zawierającego srebro.



Rys. 8. Analiza mikroskopowa opatrunku Figo.
Powiększenia: 40x, 100x, 250x.

Źródło: opracowanie własne.

Analizując wyniki oznaczenia zawartości srebra w próbkach posługiwano się wskaźnikiem stężenia skorygowanego, który to wskaźnik uwzględniał różnice w objętościach kąpieli podczas ekstrakcji i mineralizacji próbek. Do badań ekstrakcji, jak również mineralizacji wykorzystywano próbki w kształcie kołowym o średnicy 14 mm.

Na podstawie przeprowadzonych oznaczeń zawartości srebra dla próbki 1 wykazano, iż krzywa kinetyki uwalniania się pierwiastka z próbki ma charakter liniowy, a w piątej godzinie ekstrakcji próbka uwolniła całkowicie zawarte w niej srebro. Badany opatrunek przeznaczony jest dla ran o dużym oraz średnim wysięku. Opatrunki tego typu zmieniane są co 5-8 godzin, w tym czasie plaster zdąży uwolnić niemalże całą zawartość srebra.

Analizując wyniki oznaczeń uzyskane dla próbki 2 zaobserwowano, iż w pierwszych dwóch godzinach ekstrakcji z próbki uwalniały się stosunkowo niewielkie ilości srebra utrzymujące się średnio na poziomie 0,5 mg/l co może być spowodowane grubością materiału opatrunkowego w tym typie plastra. Po około dwóch godzinach zaobserwowano skokowy wzrost ilości uwalnianego srebra.

Analizując wyniki oznaczeń uzyskane dla próbki 3 można zauważyć, iż stężenie srebra w ekstraktach oscylowało na poziomie około 0,5 mg/l niezależnie od czasu prowadzenia procesu ekstrakcji. Taka kinetyka uwalniania spowodowana jest tym, iż najprawdopodobniej srebro uwolnione w procesie ekstrakcji było łatwo dostępne dla płynu. Ponadto badany typ opatrunków przeznaczony jest do leczenia odleżyn i owrzodzeń, więc być może opatrunek taki zapewnia długotrwałą obecność jonów srebra w całym czasie użytkowania opatrunku. Opatrunki tego typu zmieniane są co 5-7 dni. Przez cały czas użytkowania opatrunku musi się z niego uwalniać odpowiednia ilość aktywnego pierwiastka.

Analizując wyniki badań uzyskane dla próbki 4 stwierdzono, iż wartości absorbancji były na poziomie bądź poniżej poziomu ślepej próby, co świadczyło o braku lub bardzo małej zawartości analitu w próbce. Chcąc określić zawartość srebra w uzyskanych ekstraktach próbki te zostały zbadane przy pomocy techniki

kuwety grafitowej, która charakteryzuje się znacznie większą czułością niż metoda płomieniowa.

Na podstawie analizy uzyskanych wyników badań stwierdzono, iż badany opatrunek przez cały czas ekstrakcji uwalniał z siebie bardzo małe ilości srebra nieprzekraczające 0,6 $\mu\text{g/l}$, pomimo, że mineralizacja wykazała znaczną jego zawartość wynoszącą 0,375 mg/l.

Tabela 1. Zawartość srebra w próbkach

Rodzaj próbki	Próbka 1	Próbka 2	Próbka 3	Próbka 4
	$\mu\text{g/l}$			
Ekstrakt 1h	229	433	393	0,111*
Ekstrakt 2h	471	685	632	0,117*
Ekstrakt 3h	745	2442	357	0,590*
Ekstrakt 4h	977	3061	515	0,150*
Ekstrakt 5h	1419	3152	655	0,270*
Mineralizacja	1675	3990	3298	375

* próbki oznaczone metodą kuwety grafitowej

Źródło: opracowanie własne.

3. Podsumowanie

Założeniem pracy było zbadanie zawartości srebra w komercyjnie dostępnych materiałach opatrunkowych w formie naklejanych plastrów. Ilość tego pierwiastka została wyznaczona przy pomocy techniki atomowej spektroskopii absorpcyjnej. Zbadano uwalnianie srebra w czasie oraz całkowitą zawartość srebra w danym opatrunku poprzez jego mineralizację.

W każdym z badanych materiałów opatrunkowych wykryte zostało srebro. Jego ilości oraz sposób uwalniania się z opatrunku różnią się w zależności od przeznaczenia plastra. W opatrunkach, które mają długo pozostać w miejscu zranienia pierwiastek ten z uwalniał się miarowo, w niewielkich ilościach zapewniając długotrwałą ochronę antybakteryjną. W przypadku opatrunków na rany głębokie, z dużym wysiękiem widoczny szybki wzrost uwalnianej ilości srebra już w początkowej fazie użytkowania opatrunku.

Największą ilość srebra odnotowano w próbce nr 2, opatrunek ten był przeznaczony do ran pooperacyjnych, rany tego typu wymagają szczególnej opieki ze względu na swoją rozległość oraz głębokość. W próbce zmineralizowanej wykryto aż 4mg/l srebra, a w czasie ekstrakcji z badanej próbki uwolniło się ponad 3 mg/l srebra.

Najmniejsza ilość badanego pierwiastka wykryto w próbce nr 4, którą był plaster na małe zranienia. Mineralizacja wykazała zawartość jedynie 0,4 mg/l srebra, ponadto

srebro prawie wcale nie uwalniało się w czasie ekstrakcji. Może świadczyć to o złej konstrukcji opatrunku, ponieważ srebro nie jest w stanie się z niego samodzielnie uwolnić. Na zdjęciach z mikroskopu optycznego widać było, iż srebro było zatopione w tworzywie włókien, przez co miało ono mocno utrudniony kontakt z płynem Ringera podczas ekstrakcji.

Literatura

- [1] **Antonelli, P.**, *Humble masterpieces: everyday marvels of design* HarperCollins, New York 2005, page 175, ISBN 0-06-083831-0
- [2] **Staff**, *The Story Behind Band-Aid Brand, Changing Times, The Kiplinger Magazine* 1964, December, p. 32
- [3] **Leaper D.J.**, *Silver dressings: their role in wound management*, International Wound Journal 2006 vol. 3, nr 4, ss. 282-294.
- [4] Swedish Medtech, *Regarding Use of Silver in Wound Care Products*, Position Paper, January 2008.
- [5] **Słowińska M.**, *Opatrunki specjalistyczne – rodzaje, przeznaczenie*, online, <https://apteline.pl/artykuly/opatrunki-specjalistyczne-rodzaje-przeznaczenie> [dostęp: 9.11.2022]
- [6] **Johnson T.R., Gomez B.I., McIntyre M.K., Dubick M.A., Christy R.J., Nicholson S.E., Burmeister D.M.**, *The Cutaneous Microbiome and Wounds: New Molecular Targets to Promote Wound Healing*, J. Mol. Sci. 2018, vol. 19, nr 2699, doi:10.3390/ijms19092699 www.mdpi.com/journal/ijms
- [7] **Moore K.** *A new silver dressing for wounds with delayed healing*, Wounds UK 2006, vol. 2, nr 2.
- [8] **Ziegler K., Görl R., Effing J., Ellermann J., Mappes M., Otten S., Kapp H., Zoellner P., Spaeth D., Smola H.**, *Reduced cellular toxicity of a new silver-containing antimicrobial dressing and clinical performance in non-healing wounds*, Skin Pharmacol Physiol 2006, vol. 19, nr 3, ss.140-146. doi: 10.1159/000092594.Epub 2006 Apr 6.
- [9] **Leaper D.**, *Appropriate use of silver dressings in wounds. An expert working group consensus*, Int Wound J. 2012, Oct, vol. 9(5), ss. 461-464.
- [10] **Lansdown A.B.**, *Silver in health care: antimicrobial effects and safety in use*, Curr Probl Dermatol. 2006, vol. 33, ss.17-34. doi: 10.1159/000093928. PMID: 16766878.
- [11] **Wzorek Z., Konopka M.**, *Nanosrebro – nowy środek bakteriobójczy*, Czasopismo Techniczne. Chemia 2007, vol. 104, z. 1-Ch, ss. 175-181.

DOZYMETRIA 1D I 2D PROMIENIOWANIA WYSOKOENERGETYCZNEGO - PRZEGLĄD PRAC ZESPOŁU DOSLAB

Elżbieta Sasiadek

*Katedra Inżynierii Mechanicznej, Informatyki Technicznej i Chemii Materiałów
Polimerowych
Politechnika Łódzka*

1. Wstęp

Szkodliwy wpływ promieniowania UV na środowisko, ekosystem [1, 2] i zdrowie człowieka [3, 4] opisany jest w wielu źródłach literaturowych. Z uwagi na powyższe, monitorowanie promieniowania UV jest bardzo istotne [5]. Większość znanych dozymetrów do pomiarów promieniowania UV wykorzystuje w swojej strukturze bakterie, DNA grzybów, materiały nieorganiczne [6, 7] lub ciekłe kryształy [8, 9], które są używane do określania erytemy oraz do porównywania ze spektrum odpowiedzi erytemalnej [10, 11]. Ze względu na dynamiczny rozwój technik radiacyjnych, np. wykorzystujących promieniowanie jonizujące w medycynie zarówno w diagnostyce jak i planów leczenia nowotworów, poszukuje się nowych detektorów promieniowania. W przypadku zaawansowanych technik radio-terapeutycznych wykorzystujących modulowane wiązki promieniowania, konwencjonalne dozymetry mogą być nie efektywne [12]. Tym samym, uważa się, że pomiar rozkładu dawki promieniowania powinien być wykonany przy użyciu różnych detektorów [13]. W dozymetrii 1D najczęściej stosuje się dozymetry wytwarzane na bazie alaniny lub materiałów termoluminescencyjnych. W przypadku dozymetrii 2D i 3D stosuje się dozymetry wytwarzane na bazie związków czułych na promieniowanie, których nośnikiem jest matryca polimerowa.

2. Systemy dozymetryczne

Dozymetria promieniowania wysokoenergetycznego to dziedzina fizyki i metrologii zajmująca się pomiarem, obliczeniami i analizą podstawowych wielkości związanych z przekazem energii promieniowania (UV i jonizującego) do materii oraz zmienności ich wartości w czasie i przestrzeni. Dozymetry są stosowane jako część systemu kontroli procesów stosowanych w aplikacjach przemysłowych i medycznych. Gwarantują prawidłowe stosowanie procesów radiacyjnych, pozwalają na wykluczenie niewiadomych związanych z systemem pomiarowym danego źródła promieniowania, błędami wskazań instrumentów, błędami kalibracji urządzenia, itp.

Są używane także do sporządzenia dokumentacji dotyczących standardów pomiarów oraz dyrektyw dotyczących ochrony przed promieniowaniem wysokoenergetycznym.

W związku z tym, poszukuje się coraz bardziej zaawansowanych układów dozymetrycznych, pozwalających na dokładny pomiar promieniowania. Dozymetry dobierane są do danego systemu dozymetrycznego z uwzględnieniem: *i)* dawki, *ii)* mocy dawki, *iii)* zależności energii, *iv)* wpływu temperatury przed, w trakcie i po procesie napromieniania, *v)* wilgotności, *vi)* światła, *vii)* stabilności oraz *viii)* powtarzalności. Dobry dozymetr powinien charakteryzować się: *i)* dużą dokładnością i precyzją pomiaru, *ii)* liniowym zakresem pomiaru, *iii)* bezpośrednią zależnością od energii lub wielkości dawki, *iv)* rozkładem przestrzennym dawki, *v)* stabilnością fizycznego wymiaru i kształtu układu dozymetrycznego, *vi)* łatwością odczytu oraz *vii)* komfortem użytkowania. Układ dozymetryczny powinien pozwalać na pomiar dawek w możliwie szerokim zakresie, zapewniając łatwe oznaczenie analityczne produktów tworzonych w procesie radiacyjnym przy jednoczesnym zachowaniu dużej dokładności. Wraz z rozszerzaniem się możliwości wykorzystywania technik radiacyjnych, wzrasta zapotrzebowanie na dozymetry do kontroli pola radiacyjnego.

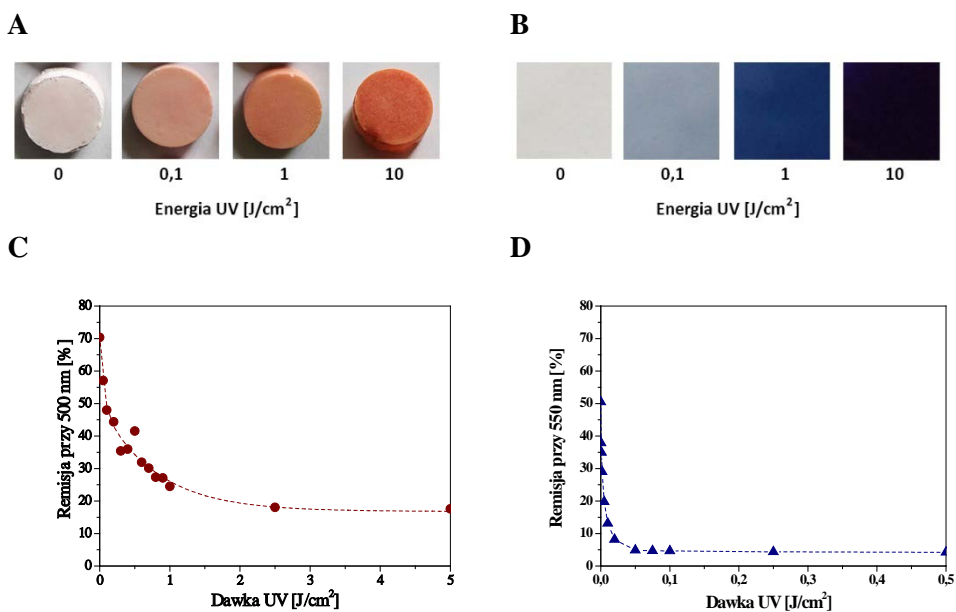
3. Dozymetria 1D i 2D – prace zespołu DosLab

Zespół DosLab działający w Katedrze Inżynierii Mechanicznej, Informatyki Technicznej i Chemii Materiałów Polimerowych Politechniki Łódzkiej zajmuje się badaniami chemicznymi m.in. w tematyce dozymetrii 1D, 2D i 3D promieniowania ultrafioletowego (UV) i jonizującego od 2007 roku. Dotychczas opracowano rozwiązania dotyczące m.in. tabletek polimerowych 1D do pomiarów promieniowania UV, płaskich dozymetrów 2D do pomiarów promieniowania UV i jonizującego na bazie folii [14] i wyrobów włókienniczych wraz z ich systemem odczytu [15-17] oraz barwnikowych i polimerowych dozymetrów 3D do zastosowania w radioterapii [18-21]. Wyniki prac zostały opublikowane w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym. W ostatnim czasie opracowano także włókna poliakrylonitrylowe domieszkowane polidiacetylenem (SMART-FIBRE), które zostały nagrodzone złotym medalem na Międzynarodowej Wystawie PRO INVENT 2019 [22]. Poniżej zaprezentowano wybrane wyniki prac własnych związanych z dozymetrią 1D i 2D.

Przy projektowaniu dozymetrów 1D i 2D należy uwzględnić kilka założeń, które są niezależnie od struktury dozymetru, m.in.: *i)* uzyskanie proporcjonalnej odpowiedzi w funkcji zaabsorbowanej dawki promieniowania jonizującego i ultrafioletowego w szerokim zakresie, *ii)* powtarzalność układu, *iii)* łatwość przygotowania układu dozymetrycznego, *iv)* stabilność układu przed i po procesie napromieniania, *v)* trwałość oraz *vi)* prosty sposób użycia. Opracowane układy zawierają w swojej strukturze lub na powierzchni związku czułe na promieniowania, które w wyniku ekspozycji na promieniowanie UV i/lub jonizujące zmieniają swoją

barwę z bezbarwnej na czerwoną, niebieską, fioletową w zależności od użytych prekursorów barwy, a intensywność tych zmian jest proporcjonalna do zaabsorbowanej dawki promieniowania. Niezależnie od budowy i struktury dozymetrów zmiany barwy były rejestrowane za pomocą spektrofotometru odbiciowego lub poprzez skanowanie próbek. Na podstawie uzyskanych danych, wyznaczono parametry kalibracyjne poszczególnych wariantów dozymetrów: *i)* zakres pomiarowy, *ii)* zakres liniowej odpowiedzi na dawkę, *iii)* dawkę progową oraz *iv)* czułość układu. Z uwagi na szeroki zakres badań prowadzonych w zespole DosLab, niniejszy przegląd dotyczy wyłącznie dozymetrów do pomiarów dawek promieniowania UV.

Dozymetry 1D w formie tabletek polimerowych lub folii wykonanej z polialkoholu winylowego (PVA) domieszkowanych związkami czułymi na promieniowanie wysokoenergetyczne w wyniku napromienienia zmieniają swoją barwę z bezbarwnej na czerwoną lub niebieską (Rys. 1A i B) w zależności od użytych prekursorów barwy.



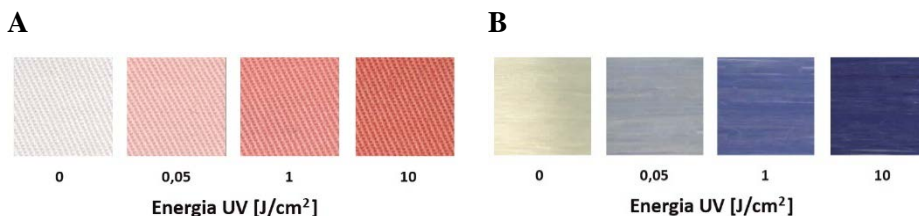
Rys. 1. Zmiana barwy oraz zależność zmiany remisji światła w funkcji zaabsorbowanej energii dla próbek tabletek polimerowych (A i C) oraz modyfikowanej folii PVA (B i D) po ekspozycji na promieniowanie UV.

Źródło: opracowanie własne.

Na Rysunku 1 przedstawiono także przykładowe charakterystyki remisji światła dla tabletek polimerowych modyfikowanych chlorkiem trifenylotetrazoliny (Rys. 1C) oraz próbek folii PVA modyfikowanej diacetylenem (Rys. 1D) w wyniku ekspozycji na promieniowanie UVC. Po napromienieniu dozymetrów zmiany barwy

rejestrowano za pomocą spektrofotometru odbiciowego w systemie barwnym CIELAB (pomiar remisji, współczynnik K/S, współrzędne barwy).

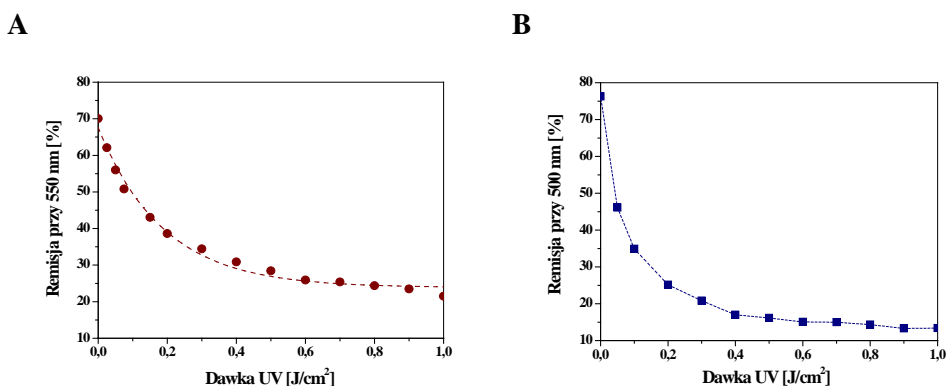
Dozymetry tekstylne 2D w formie wyrobów włókienniczych modyfikowanych powierzchniowo poprzez napawanie lub drukowanie oraz włókien domieszkowanych związkami czułymi na promieniowanie wysokoenergetyczne w wyniku napromienienia zmieniają swoją barwę z bezbarwnej na czerwoną, niebieską lub fioletową w zależności od użytych prekursorów barwy (Rys. 2).



Rys. 2. Zmiana barwy tkanin drukowanych pastą z chlorkiem trifenylotetrazoliny (A) oraz włókien modyfikowanych polidiacetylenem (B) po napromienieniu UV w zakresie 0-10 J/cm².

Źródło: opracowanie własne.

Poniżej przedstawiono przykładowe charakterystyki dla próbek modyfikowanych powierzchniowo roztworem nitro błękitu tetrazoliny (Rys. 3A) oraz włókien poliakrylonitrylowych domieszkowanych polidiacetylenem (Rys. 3B).



Rys. 3. Zależność zmiany remisji światła w funkcji zaabsorbowanej dawki promieniowania UV (0-1 J/cm²) dla próbek tkanin modyfikowanych roztworem nitro błękitu tetrazoliny (A) oraz włókien PAN domieszkowanych polidiacetylenem (B).

Źródło: opracowanie własne.

W Tabeli 1 zestawiono przykładowe parametry uzyskane dla próbek tkanin modyfikowanych powierzchniowo roztworem nitro błękitu tetrazoliny (NBT).

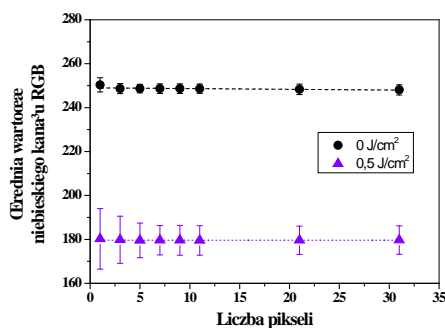
Tabela 1. Charakterystyka kalibracyjna próbek tkaniny modyfikowanej NBT po napromienieniu UV (R_0 [%] – wartość emisji światła nienapromienionej próbki, A – czułość na dawkę)

Zawartość NBT [g/dm ³]	R_0 [%]*	Zakres pomiarowy [mJ]	Zakres pseudo-prostoliniowy [mJ]	A [% cm ² /mJ]	R^2
0,1	72,48	0 – 200	0 – 140	-0,030±0,003	0,959
10,0	70,06	0 – 600	0 – 75	-0,255±0,018	0,985
20,0	66,85	0 – 600	0 – 50	-0,439±0,078	0,939

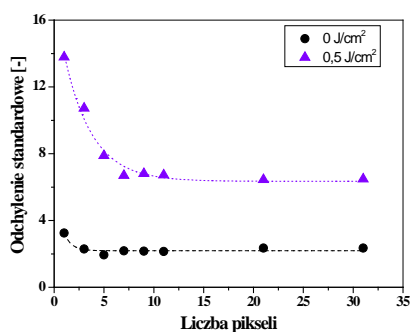
Źródło: opracowanie własne.

Po napromienieniu dozymetrów zmiany barwy rejestrowano za pomocą spektrofotometru odbiciowego w systemie barwnym CIELAB (pomiar emisji, współczynnik K/S, współrzędne barwy) a także przy użyciu skanera fotograficznego w połączeniu z prostym algorytmem do analizy kanałów przestrzeni RGB (Rys. 4), co stanowi również efektywną metodę analizy dwuwymiarowego rozkładu dawki promieniowania.

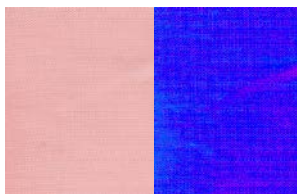
A



B



C



Rys. 4. Przykład analizy dozymetru po zeskanowaniu: A – wartość średnia wyliczona dla różnej liczby pikseli; B – zmiana odchylenia standardowego w zależności od liczby pikseli użytej do wyliczenia wartości średniej profilu; C – widok napromienionej (UVC, 500 mJ/cm²) próbki: po lewej – widziana gołym okiem; po prawej – obraz po zastosowaniu algorytmu do wizualizacji niedoskonałości rozłożenia barwy na powierzchni próbki.

Źródło: opracowanie własne.

4. Podsumowanie

Dotychczas opublikowane wyniki potwierdziły, iż zaproponowane przez nas dozymetry można stosować do pomiarów rozkładów dawki promieniowania UV oraz jonizującego. Modyfikacja struktury polimerów oraz powierzchni tekstylnych próbek jest prostym sposobem wytwarzania dozymetrów, gwarantujących równomierne rozłożenie związków aktywnych i uzyskanie gładkiej powierzchni. Zastosowanie różnych związków czułych na promieniowanie daje możliwość uzyskania szerokiej palety barw możliwość tworzenia efektów wzorniczych. Dozymetry 2D w postaci wyrobów włókienniczych mogą znaleźć zastosowanie jako: elementy o charakterze dekoracyjnym, dozymetry będące elementami odzieży ochronnej, akcesoria dołączane do kosmetyków chroniących przed promieniowaniem UV lub znaczniki oryginalności produktów. Opracowane rozwiązania zostały opublikowane w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym. Więcej szczegółów na temat publikacji i patentów związanych z tematykami badawczymi zespołu DosLab można znaleźć na stronie: <http://mkozicki-sci.eu/>

5. Literatura

- [1] **Bérces A., Fekete A., Gáspár S., Gróf P., Rettberg P., Horneck G., Rontó Gy.,** *Biological UV dosimeters in the assessment of the biological hazard from environmental radiation*, J. Photochem. Photobiol. B: Biol. 1999, vol. 53, ss. 36-43.
- [2] **Horneck G.,** *Quantification of biologically effective environmental UV irradiance*, Adv. Space Res. 2000, vol. 26, ss. 1983-1994.
- [3] **Taylor H.R.,** *The biological effects of UV-B on the eye*, Photochem. Photobiol. 1989, vol. 50, ss. 489-492.
- [4] **Urbach F.,** *Potential effects of altered solar ultraviolet radiation on human skin cancer*. Photochem, Photobiol. 1989, vol. 50, ss. 507-513.
- [5] **Rettberg P., Horneck G.,** *Biologically weighted measurement of UV radiation in space and on earth with the biofilm technique*, Adv. Space Res. 2000, vol. 26, ss. 2005-2014.
- [6] **Smith J. Gerald.** Ultraviolet radiation actinometer. United States Patent. 4763011. Opubl. 09.08.1988.
- [7] **Beaubien J. David, Beaubien F. Arthur.** Reference grade solar ultraviolet band pyranometer. United States Patent. 5331168. Opubl. 10.07.1994.
- [8] **Chanishvili A., Chilaya G., Petriashvili G., Barberi R., Bartolino R., De Santo M.P.,** *Cholesteric liquid crystal mixtures sensitive to different ranges of solar UV irradiation*, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2005, vol. 434, ss. 353-366.

- [9] **Petriashvili G., Chanishvili A., Chilaya G., Matranga M.A., De Santo M.P., Barberi, R.,** *Novel UV sensor based on a liquid crystalline mixture containing a photoluminescent dye*, Mol. Cryst. Liq. Cryst. 2009, vol. 500, ss. 82-90.
- [10] **McKinley A.F., Diffey, B.L.,** *A reference spectrum for ultraviolet induced erythema in human skin*, CIE J. 1987, nr 6, ss. 17-22.
- [11] **Suh K.-S., Roh H.-J., Choi S.-Y., Jeon Y.-S., Doh K.-S., Bae J.-H., Kim S.-T.,** *A long-term evaluation of erythema and pigmentation induced by ultraviolet radiations of different wavelengths*, Skin Res. Technol. 2007, vol. 13, ss. 360-368.
- [12] **Olding T., Holmes O., Schreiner, L.J.,** *Cone beam optical computed tomography for gel dosimetry I: scanner characterization*, Phys. Med. Biol. 2010, vol. 55, ss. 2819-2840.
- [13] **Pantelis E., Antypas C., Petrokokkinos L., Karaiskos P., Papagiannis P., Kozicki M., Georgiou E., Sakelliou L., Seimenis, I.,** *Dosimetric characterization of CyberKnife radiosurgical photon beams using polymer gels*, Med. Phys. 2008, vol. 35, pp. 2312-2320.
- [14] **Kozicki M., Szaśiadek E., Karbownik I., Maniukiewicz W.,** *Doped polyacrylonitrile fibres as UV radiation sensors*, Sensor. Actuat. B - Chem. 2015, vol. 213, ss. 234-243.
- [15] **Kozicki M., Szaśiadek E., Kadlubowski S., Dudek M., Karbownik I.,** *Radiation sensitive polyacrylonitrile microfibres doped with PDA nanoparticles*, Radiat. Phys. Chem. 2020, vol. 169, nr 107751, <https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2018.01.021>
- [16] **Kozicki M., Szaśiadek E.,** *Scanning of flat textile-based radiation dosimeters: Influence of parameters on the quality of results*, Radiat. Measur. 2013, vol. 58, ss. 87-93.
- [17] **Kozicki M., Szaśiadek E.,** *UV-assisted screen-printing of flat textiles*, Color. Technol. 2012, vol. 128, ss. 251-260.
- [18] **Kozicki M., Kwiatos K., Kadlubowski S., Dudek M.,** *TTC-Pluronic 3D radiochromic gel dosimetry of ionizing radiation*. Phys. Med. Biol. 2017, vol. 62, ss. 5668-5690.
- [19] **Kwiatos K., Maras P., Kadlubowski S., Stempień Z., Dudek M., Kozicki M.,** *Tetrazolium salts-Pluronic F-127 gels for 3D radiotherapy dosimetry*, Phys. Med. Biol. 2018, vol. 63, ss. 95012 – 95022.
- [20] **Kouvati K., Jaszczak M., Papagiannis P., Kadlubowski S., Wach R., Maras P., Dudek M., Kozicki M.,** *Leuco crystal violet-Pluronic F-127 3D radiochromic gel dosimeter*”. Phys. Med. Biol. 2019, vol. 64, ss. 175017 – 175031.

-
- [21] **Kozicki, M, Jaszczak, M, Kwiatos, K, Maras, P, Kadlubowski S., Wach R., Dudek M.**, *Three-dimensional radiochromic and polymer gel dosimeters with Pluronic F-127 matrix – a review of current research*, Journal of Physics: Conf. Series 2019, vol. 1305, no 012035.
- [22] **Stowarzyszenie Polskich Wynalazców i Racjonalizatorów**, *PRO INVENT - International Exhibition of Research, Innovations and Inventions*, online, <http://www.polskiewynalazki.pl/ex/2019/proinvent/wynalazki> [dostęp: 15.11.2022].

Rozdział II

TECHTEX i DESIGNTEX

WYBRANE ASPEKTY OCENY WŁAŚCIWOŚCI ESTETYCZNYCH SZWÓW LAMINOWANYCH W ODZIEŻY ROBOCZEJ

Halina Szafrńska

Katedra Fizykochemii i Technologii Materiałów

*Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego
w Radomiu*

1. Wstęp

W ostatnich latach obserwuje się znaczący wzrost produkcji odzieży roboczej, przeznaczonej do celów zawodowych. Określenie "odzież robocza" dotyczy bardzo szerokiego wachlarza ubrań. W zależności od wykonywanej pracy mogą to być komplety ubrań dedykowane danej grupie zawodowej np. służbie zdrowia, pracownikom usług hotelarskich, bądź pojedyncze wyroby typu fartuchy, spodnie, koszule, itp. Głównie zadanie, jakie spełnia odzież robocza, to zastępowanie ubrania pracownika lub jego zabezpieczanie przed zniszczeniami, zabrudzeniem, a także może pełnić funkcję reprezentacyjną.

Na estetyczny wygląd i wysokie walory użytkowe odzieży istotny wpływ ma nie tylko rodzaj zastosowanych materiałów podstawowych i dodatkowych (np. różnego rodzaju taśmy, klejowe wkłady odzieżowe, nici), ale również technologia wytwarzania [1-2].

Proces produkcji odzieży i obróbka jej elementów składa się z wielu operacji technologicznych, które powinny być wykonywane w określonej kolejności. Z technologicznego punktu widzenia na zapewnienie trwałości wyrobu, istotny wpływ mają strukturalne właściwości szwów. W odzieży stosuje się połączenia nitkowe, klejowe i zgrzewane [3-4,11]. Zastosowanie danej metody łączenia zależy między innymi od rodzaju materiałów z jakich wykonane są poszczególne elementy, od etapu procesu produkcyjnego, a także od wymagań wytrzymałościowych i estetycznych stawianych poszczególnym elementom odzieży lub całym wyrobom [5-6,10].

Uwzględniając wymienione właściwości, celem niniejszej pracy jest analiza właściwości estetycznych i założeń technologicznych dla trzech rodzajów utworzonych laminowanych szwów z udziałem folii transferowych w postaci taśmy o różnej szerokości. Ocenę właściwości estetycznych zaprojektowanych szwów dokonano poprzez wyznaczenie wartości wskaźnika sztywności zginania dla szwów utworzonych w kierunku nitki wątku.

Artykuł stanowi kontynuację wcześniejszych prac [5-8] dotyczących stosowania połączeń klejowych w szwach odzieży roboczej.

2. Materiały i metody badań

2.1. Materiał doświadczalny

Jako obiekt badań przyjęto:

- Materiał włókienniczy – tkanina odzieżowa
- Taśmy transferowe

Tabela 1 i tabela 2 zawiera podstawowe informacje n/t badanych materiałów.

Tabela 1. Charakterystyka materiału badawczego

Nazwa	Skład surowcowy	Masa pow. M_p , g/m ²	Grubość h, mm	Rodzaj splotu	Liczba nitok ilość/dm	Maksymalna siła zrywająca P, N	Wydłużenie względne ϵ , %
Tkanina Z	Bawełna 100%	180	0,34	Splot 1/1	osnowa: 290 wątek: 220	osnowa: 445 wątek: 408	osnowa: 7 wątek: 34

Źródło: opracowanie własne

Zastosowana do badań tkanina może być przeznaczona na odzież zawodową w szczególności dla pracowników służby zdrowia, jak również w gastronomii i hotelarstwie (np. fartuchy, koszule, bluzki). Włókno bawełny sprawia, że tkanina jest bardziej przewiewna, co zwiększa komfort użytkowania.

Tabela 2. Charakterystyka folii transferowej 8735 firmy 3M™ Scotchlite™ – zastosowanej w postaci taśmy

Oznaczenie	Skład surowcowy kleju	Masa pow. M_p , g/m ²	Grubość h, mm	Szerokość taśmy b, mm	Maksymalna siła zrywająca P, N	Wydłużenie względne ϵ , %
Taśma B	Poliester	350	0,21	10 15 20	44	770

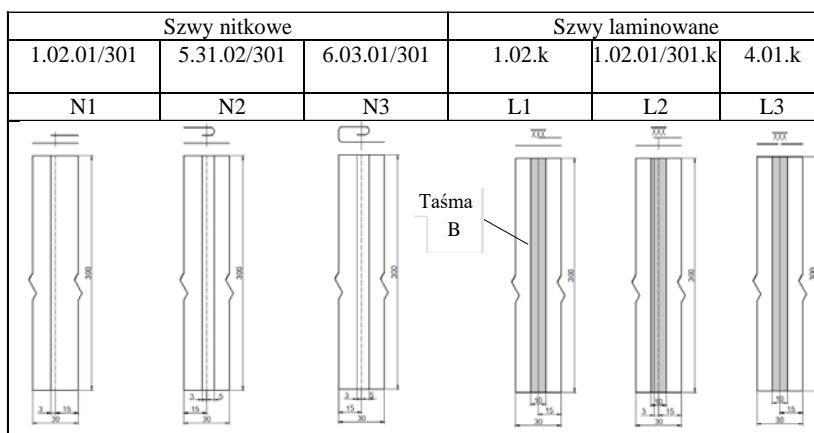
Źródło: opracowanie własne

Materiał odblaskowy 3M™ Scotchlite™ - folie transferowe są przeznaczone do stosowania w odzieży ochronnej, roboczej, sportowej, a także codziennego użytku. Podczas prawidłowego użytkowania materiały odblaskowe pomagają zwiększyć widoczność użytkownika w warunkach nocnych lub słabego oświetlenia. Materiał odblaskowy odbija jasne, białe światło kiedy zostanie oświetlony przez reflektory samochodowe, a także wtedy, gdy użytkownik będzie znajdował się na poboczu drogi. Odblaskowa folia termotransferowa jest zbudowana z odbijających światło szklanych soczewek zespolonych termicznie z aktywowanym termicznie podłożem. Folia transferowa 8735 to folia trudnopalna, i może być laminowana bezpośrednio do kompatybilnych podłoży.

2.2. Przygotowanie szwów do badań

Do badań wytypowano 3 warianty szwów laminowanych L1, L2 i L3 odpowiadające zmodyfikowanej wersji szwu zwykłego (1.02.k oraz 1.02.01/301.k), a także szwu stykowego 4.01.k składającego się z tkaniny Z i taśmy B umieszczonej na prawej stronie wyrobu. Szwy zaprojektowane są tak, aby dwie warstwy tkaniny były przesunięte względem siebie, a linia środka taśmy pokrywała się z linią łączenia obydwu warstw materiału. Dodatkowo w szwie L2 zastosowano połączenie nitkowe. Tak zaprojektowane struktury szwów zapewniają jednocześnie połączenie w szwie oraz dekorację wyrobu (rysunek 1). Proponowana struktura laminowanych szwów wpływa na mniejsze zużycie tkaniny podczas wytwarzania odzieży.

Dla analizy porównawczej badań przygotowano tradycyjne szwy nitkowe N1, N2, N3 tj. szew zwykły, nakładany i obrębający (rysunek 1).



Rys. 1. Projekt technologiczny szwów nitkowych i laminowanych w oparciu o ISO 4916. Źródło: opracowanie własne

Źródło: opracowanie własne.

Próbki szwów dla badań były utworzone wzdłuż nitki wątku tkaniny. Dla każdego szwu laminowanego L1, L2 i L3 zastosowano trzy szerokości taśmy B wynoszące odpowiednio 10 mm, 15 mm oraz 20 mm.

Warunki laminowania szwów:

Proces laminowania wykonano na prasie Schulze Airpress 4 plus automatic.



Rys. 2. Maszyna do laminowania szwów – Prasa Schulze Airpress 4 plus automatic [9]

Źródło: opracowanie własne.

Jest to automatyczna prasa transferowa z czterema płytami dolnymi i jedną płytą górną-grzewczą. Wyposażona jest w:

- elektroniczne programowanie temperatury i czasu na wyświetlaczu
- płynną regulację nacisku.

Warunki szycia:

przemysłowa maszyna szwalnicza firmy Juki

rodzaj ściegu – stębnowy 301

liczba ściągów – 3/cm

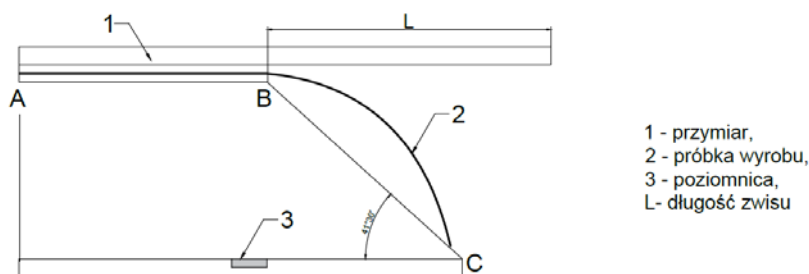
rodzaj nici szwalnych – nici firmy Coats Epic 150 - 100% PES

typ igły – Schmetz R 90, powłoka niklowa

2.3. Oznaczenie sztywności zginania metodą stałego kąta

Pomiaru sztywności zginania szwów laminowanych i szwów nitkowych dokonano metodą stałego kąta, na przyrządzie działającym w oparciu o zasadę pomiaru zmiennej długości zwisu L próbek zgiętych pod stałym kątem $41^{\circ}30'$.

Z przeznaczonych do badań materiałów i szwów wycinano próbki o wymiarach 300×30 mm i układano je na podstawce stolika przyrządu. Po obciążeniu ich przymiarem metalowym wysuwano próbki i odczytywano na przymiarze długość zwisu L w momencie, gdy zwisający koniec próbki pokrył się z płaszczyzną utworzoną pomiędzy rysą na wskaźniku, a odbiciem tej rysy w zwierciadle płaskim (rys. 3).



Rys. 3. Schemat przyrządu pomiarowego określający zmienną długość zwisu próbki

Źródło: opracowanie własne.

Dla badanych szwów wykonano po 10 pomiarów. Na podstawie tak wykonanych badań wyznaczono:

– średnią długość zwisu L :
$$\bar{L} = \frac{\sum_{i=1}^{n=5} L_i}{n} [cm] \quad (1)$$

– długość gięcia:
$$c = \frac{\bar{L}}{2} [cm] \quad (2)$$

– sztywność zginania:
$$G = 10^{-3} \cdot M_p \cdot c^3 \cdot g [N * m] \quad (3)$$

gdzie M_p to masa powierzchniowa wyrobu [g/m^2]; g to przyspieszenie ziemskie.

3. Wyniki badań i ich analiza

Program eksperymentalnych badań obejmował:

- określenie wpływu parametrów procesu laminowania: temperatura T , °C, czas t , s, ciśnienie p , N/m^2 - na wartość wskaźnika sztywności zginania G , $\mu N \cdot m$ dla szwu L1 z użyciem taśmy B o szerokości 10 mm,
- określenie wartości wskaźnika sztywności zginania G w zależności od struktury zaprojektowanych szwów.

W tym celu odpowiednio przygotowane próbki materiałów (rys. 1, szew L1) poddano procesowi laminowania (klejenia) na podstawie trójczynnиковego planu 3^3 z czynnikami wejściowymi: X_1 – temperatura T , °C, X_2 – czas t , s, X_3 – docisk p , N/m^2 . Na podstawie wstępnych badań określono zakresy zmienności czynników (tabela 3).

Skorzystanie ze standardowych planów eksperymentu poprzedzono kodowaniem czynników według reguły: *Wartość kodowa = (wartość fizyczna) – (wartość centralna) / (jednostka zmienności)*.

Tabela 3. Zakresy zmienności czynników dla szwów z użyciem taśmy B

Czynnik	Oznaczenie kodowe	Wartość centralna	Jednostka zmienności	Jednostka miary
Temperatura (T)	X_1	170	20	°C
Czas (t)	X_2	15	5	s
Docisk (p)	X_3	35	20	$10^4 N/m^2$

Źródło: opracowanie własne.

Wartości kodowe X_1 , X_2 i X_3 zmieniają się w zakresie $\langle -1,1 \rangle$. Oznacza to, że wartościom X_1 równym $-1,0,1$ odpowiada temperatura laminowania wynosząca odpowiednio 150 °C, 170 °C, 190 °C. Analogicznie wartości X_2 równe $-1,0,1$ oznaczają czas wynoszący odpowiednio 10 s, 15 s, 20 s, natomiast wartości X_3 równe $-1,0,1$ oznaczają nacisk wynoszący odpowiednio $15 \cdot 10^4 N/m^2$, $35 \cdot 10^4 N/m^2$, $55 \cdot 10^4 N/m^2$. Jako kryterium optymalizacji Y wybrano sztywność zginania G dla utworzonych szwów w kierunku nitki wątku. Program eksperymentu zawierał średnie wyniki z obliczeń.

Oszacowania funkcji regresji opisujących zależności między rozważanymi czynnikami a badanymi cechami przeprowadzono za pomocą programu komputerowego SAS.

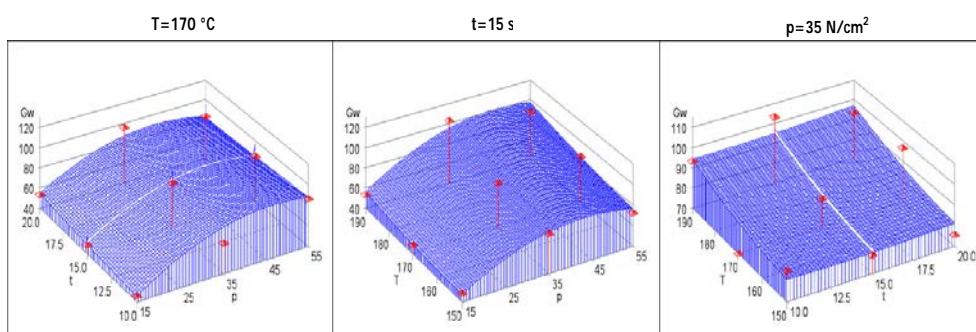
Uzyskane wyniki badań wykorzystano do przeprowadzenia analizy regresji, w rezultacie której oszacowano za pomocą wielomianów stopnia drugiego zależności między badanymi czynnikami a rozważaną cechą. Wartość współczynników regresji oceniana jest według testu t-Studenta, a adekwatność opracowanego modelu według wartości współczynnika korelacji wielokrotnej R .

Uwzględniając wartości współczynników regresji otrzymano równanie regresji drugiego stopnia, jako zależności sztywności zginania od parametrów procesu laminowania w postaci.

$$G = 147,3155 - 1,9371T - 0,5036t + 0,0058T^2 + 0,0055t*T + 0,0329t^2 + 0,0074p*T - 0,0355t^2 - 0,0457p^2 \quad R^2 0,93 \quad (4)$$

Otrzymany model adekwatnie opisuje proces laminowania o czym świadczy prezentowana wartość współczynnika korelacji R^2 .

Dzięki ustalonym analitycznym zależnościom można prognozować zmiany wartości wskaźnika sztywności zginania laminowanych szwów utworzonych w kierunku wątku.



Rys. 4. Powierzchnia odpowiedzi stanowiąca wykres funkcji regresji opisującej zależność sztywności zginania G szwów wzdłuż wątku od parametrów procesu laminowania:

- czasu t i nacisku p przy stałej temperaturze $T=170\text{ °C}$
- temperatury T i nacisku p przy stałym czasie $t=15\text{ s}$
- temperatury T i czasu t przy stałym nacisku $p=35\text{ N/m}^2$

Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku 4 przedstawiono zależności sztywności zginania G od parametrów procesu laminowania (T , t , p) dla szwów z użyciem taśmy B.

Analiza prezentowanych zależności wykazała, że dla utworzonych na termoprasie szwów zalecane najmniejsze wartości wskaźnika sztywności zginania otrzymuje się w obszarze niższych wartości temperatury i ciśnienia.

Stąd zalecane wartości analizowanych parametrów dla szwu B wynoszą:

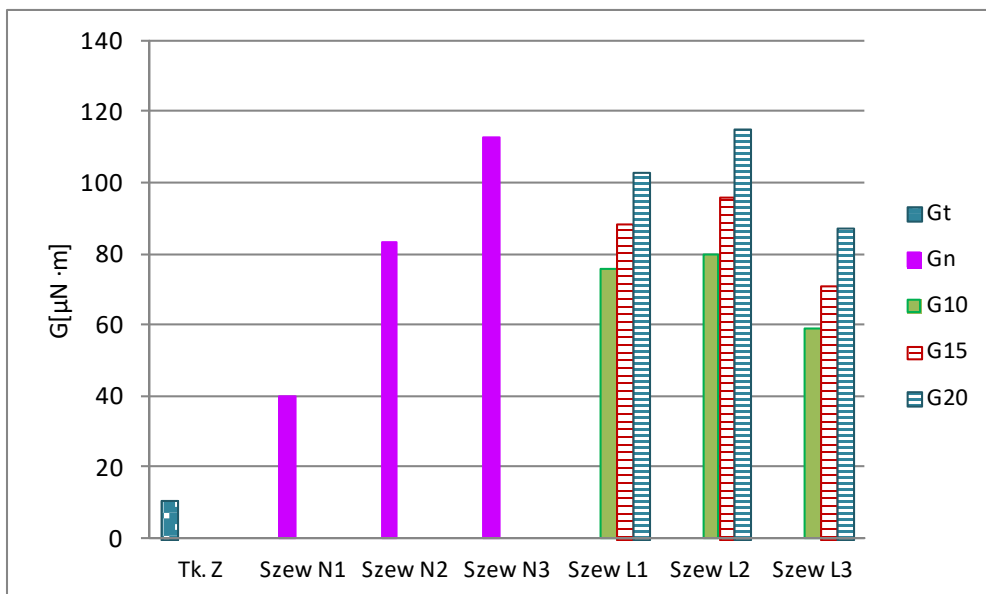
- temperatura $T=150\text{ °C}$, i 170 °C ,
- nacisk $p=15 \cdot 10^4\text{ N/m}^2$

Zauważono, że w wytypowanym obszarze nie mają znaczenia analizowane wartości parametru czasu (10-20 s). Charakter zmian prezentowanych powierzchni odpowiedzi świadczy o możliwości projektowania sztywności szwów poprzez zmianę warunków procesu laminowania. Dzięki temu możemy prognozować jakość szwu w zależności od wymagań dotyczących wyrobu i miejsca usytuowania szwu w wyrobie.

W dalszej części pracy dokonano laminowania szwów z użyciem różnej szerokości taśmy B w wytypowanych i zalecanych wyżej warunkach tj. $T=170\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t=15\text{ s}$, $p=15\cdot 10^4\text{ N/m}^2$.

Dzięki otrzymanym wynikom badań przedstawiono porównawczą analizę:

- wpływu struktury szwów laminowanych i nitkowych na wartość wskaźnika sztywności zginania dla szwów utworzonych w kierunku nitki wątku
- wpływu zmiennej szerokości taśmy B na wartość wskaźnika sztywności zginania G.



Rys. 5. Wpływ rodzaju i struktury szwu na wartość wskaźnika sztywności zginania G szwów – utworzonych wzdłuż nitki wątku.

- Gt – sztywność zginania dla tkaniny Z
 Gn – sztywność zginania dla szwów nitkowych
 G10, G15, G20 – sztywność zginania dla laminowanych szwów z użyciem zmiennej szerokości taśmy B wynoszącej odpowiednio 10 mm, 15 mm, 20 mm

Źródło: opracowanie własne.

Jak przedstawiono w literaturze [10], stosowane w odzieży połączenia nitkowe i klejowe wpływają na wzrost wartości wskaźnika sztywności zginania w porównaniu do tkaniny. Podczas produkcji odzieży szwy nitkowe N1 i N2 mogą być stosowane np. do naszywania kieszeni, do wykończenia dołu rękawa. Szew N3 - może być stosowany do wykończenia krawędzi przodu np. bluzki, fartucha, a także do wykończenia dołu spodni, fartucha, spodnicy.

Z prezentowanych badań (rys. 5) wynika, że wraz ze zmianą struktury szwów nitkowych od N1 do N3 rośnie wartość wskaźnika sztywności zginania. W porównaniu do tkaniny Z ($11\mu\text{N}\cdot\text{m}$) uzyskane wartości wskaźnika sztywności

zginania dla szwu nitkowego N1 były 4 razy większe, dla szwu N2 były 8 razy większe, a dla szwu N3 aż 10 razy większe osiągając wartość $113 \mu\text{N}\cdot\text{m}$. Najprawdopodobniej ma na to wpływ liczba i sposób ułożenia poszczególnych warstw materiału względem siebie, a także zastosowany ścieg stębnowy, co potwierdza istotny wpływ struktury szwu na wartość wskaźnika sztywności zginania.

Ułożenie warstw tkaniny w szwach L1 i L2 jest zbliżone do szwu N1, ale sposób łączenia zupełnie inny. Utworzone szwy laminowane L1 i L2 z udziałem taśmy o szerokości 10 mm charakteryzują się wzrostem wartości wskaźnika sztywności zginania o 100% w stosunku do szwu N1. W technologii odzieży również bardzo często stosuje się szwy nitkowe N2 i N3. Uzyskane wartości wskaźnika G dla szwów L1 i L2 ($80 \mu\text{N}\cdot\text{m}$), są bliskie wartościom wskaźnika G dla szwu N2 ($83 \mu\text{N}\cdot\text{m}$), i znacznie mniejsze (o 30%) od szwu N3 ($113 \mu\text{N}\cdot\text{m}$). Najmniejsze wartości wskaźnika sztywności zginania uzyskano dla szwu stykowego L3 ($59 \mu\text{N}\cdot\text{m}$), mogącego mieć zastosowanie podczas łączenia elementów odzieży np. na linii karczku. Otrzymane wyniki wskazują na możliwość zastąpienia często stosowanych podczas produkcji odzieży szwów nitkowych przez szwy laminowane L1, L2 i L3.

Na rysunku 5 zaprezentowano uzyskane podczas badań wartości wskaźnika sztywności zginania dla laminowanych szwów z użyciem zmiennej szerokości taśmy B. Przeprowadzone badania wykazały, że wraz ze wzrostem szerokości taśmy B od 10 mm do 15 mm i do 20 mm rośnie wartość wskaźnika sztywności zginania utworzonych szwów odpowiednio o 20% i o 40% niezależnie od struktury szwu laminowanego. Stanowi to cenną informację przy projektowaniu właściwości estetycznych szwów.

W porównaniu do szwu nitkowego N3 posiadającego największą wartość wskaźnika sztywności zginania ($113 \mu\text{N}\cdot\text{m}$), prawie wszystkie analizowane szwy laminowane o zmiennej szerokości taśmy B charakteryzują się mniejszymi wartościami wskaźnika sztywności zginania. Bliskie wartości stanowi szew L2 z udziałem taśmy o największej szerokości. W porównaniu do szwu L1 zastosowanie połączenia nitkowego w szwie laminowanym L2 wpłynęło w niewielkim stopniu na wzrost o (5-12%) wartości wskaźnika sztywności zginania, co świadczy o dominującym wpływie połączenia klejowego. Natomiast może mieć znaczący wpływ na zmianę właściwości wytrzymałościowych szwu.

4. Podsumowanie

Efekty przeprowadzonych badań w ramach niniejszej pracy można przedstawić w postaci następujących wniosków:

- Otrzymane analityczne zależności pozwalają prognozować zmiany właściwości laminowanych szwów w zależności od parametrów takich jak temperatura, czas i nacisk.

- Biorąc pod uwagę zalecaną miękkość szwów określono najlepsze wartości parametrów procesu laminowania tj. temperatura $T= 170\text{ }^{\circ}\text{C}$ i nacisk $p= 15\text{ N/m}^2$ dla szwów utworzonych w kierunku wątku.
- Wraz ze wzrostem szerokości taśmy B od 10 mm do 15 mm i do 20 mm rośnie wartość wskaźnika sztywności zginania odpowiednio o 20% i o 40% niezależnie od struktury szwu laminowanego.
- Dla laminowanych szwów uzyskano bliskie lub mniejsze wartości wskaźnika sztywności zginania w porównaniu do powszechnie stosowanych w wyrobach odzieżowych szwów nitkowych N2 i N3. Potwierdza to możliwość zastąpienia wybranych szwów nitkowych – szwami laminowanymi.

Literatura

- [1] **Hayes S.G., McLoughlin J.**, Welded and sewn seams: A comparative analysis of their mechanical behaviour, [in:] Ariadurai S.A., Wimalaweera W.A. (eds) The Textile Institute 85th World Conference, Sri Lanka, Colombo 2007, ss. 131–142.
- [2] **Jakubčionienė Ž., Masteikaite V.**, Investigation of textile bonded seams, Mater Sci (Medžiagotyra) 2010,16: s. 76–79.
- [3] **Jevšnik S., Vasiliadis S., Kurson Bahadir S., Grujić D., Stjepanović Z.**, Applying heat for joining textile materials [in:] Mahadzir I. (eds.) Joining Technologies, Pahang 2016, <http://www.intechopen.com/books/joining-technologies> [dostęp: 15.11.2022]
- [4] **Jevšnik S., Eryürük S.H., Kalaoğlu F., Karaguzel Kayaoğlu B., Komarkova P., Golombikova V., Stjepanović Z.**, Seam properties of ultrasonic welded multilayered textile materials, Journal of Industrial Textiles 2017, vol. 46, nr 5, ss. 1193-1211.
- [5] **Szafrńska H., Pawłowa M., Mitak K., Korycki R.**, Kształtowanie wytrzymałości połączeń szytych w wyrobach odzieżowych [w:] Zieliński R. i Żuchowski J.(eds), Ocena jakości wybranych wyrobów przemysłowych, Wyd. UTH Radom, Instytut Technologii Eksploatacji – PIB, Radom 2016, ss. 62 -70.
- [6] **Szafrńska H., Pawłowa M., Korycki R.**, Wybrane aspekty zapewnienia jakości w odzieży wodochronnej [w:] Paździor M., Żuchowski J. i in. (eds), Wybrane problemy jakości wyrobów przemysłowych, Wyd. UTH, Radom 2018, ss. 23-32.

- [7] **Szafrańska H., Pawłowa M., Korycki R.**, Analysis of The Mechanical Properties of Seams in Waterproof Clothing [w:] Frydrych I., Bartkowiak G., Pawłowa M., Innovations in Clothing 3D Design, Products, Fashion, Technologies and Testing of Clothing Materials, Wyd. Politechnika Łódzka, Łódź 2017, ss. 156 -163.
- [8] **Szafrańska H., Korycki R.**, Tests of applications of transfer films in seams lamination technology, Journal of Natural Fibers 2019, vol. 16, nr 6, ss. 898-912.
- [9] Romanik, Prasa transferowa SCHULZE Air 4, online,
<http://romanik.pl/prasy-pneumatyczne/434-prasa-transferowa-schulze-air-4-press.html>
[dostęp: 16.11.2022]
- [10] **Szafrańska H., Pawłowa M.**, Aesthetical aspects of clothing products in the context of maintenance procedures, Fibres & Textiles in Eastern Europe 2007, Vol. 15, No. 5-6(64-65), ss. 109-112.
- [11] **Vujasinovic E., Rogale D.**, Properties and performance of welded or bonded seams [in:] Jones, I., Stylios. G.K., (eds) Joining textiles. Principle and application, 1st ed., Woodhead Publishing Series in Textiles, Philadelphia 2013, ss. 435–461.

SAMOCZYSZCZĄCE WYKOŃCZENIE TKANIN BAWELNIANYCH

Edyta Matyjas-Zgondek¹, Eugeniusz Rutkowski²

¹ Katedra Inżynierii Mechanicznej, Informatyki Technicznej i Chemii Materiałów Polimerowych, Politechnika Łódzka, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź

² ZWOLTEX Sp. z o.o. ul. Spacerowa 13, 98-220 Zduńska Wola

1. Wstęp

Bawełna z uwagi na swoje dobre właściwości użytkowe oraz niską cenę znajduje szerokie zastosowanie do produkcji wyrobów włókienniczych z przeznaczeniem odzieżowym oraz na tekstylia użytku domowego: tkaniny pościelowe, obrusowe czy ściereczkowe. Ściereczki i ręczniki kuchenne użytkowane w warunkach domowych bardzo często podlegają zapłamieniu płynnymi produktami spożywczymi: napary z kawy i herbaty, soki owocowe. Usunięcie takich zabrudzeń przysparza wiele trudności i często wymaga drastycznych sposobów konserwacji, takich jak pranie w wysokich temperaturach przy zastosowaniu środków odplamiających na bazie aktywnego tlenu. Część zabrudzeń barwnych, szczególnie na wyrobach barwionych, może być niemożliwa do usunięcia [1]. Problemy związane z powstawaniem i usuwaniem zabrudzeń barwnych podczas użytkowania tekstyliów domowych można rozwiązać poprzez modyfikowanie ich powierzchni substancjami nadającymi jej właściwości samoczyszczące.

W literaturze najczęściej opisywane są fotokatalityczne wykończenia wyrobów włókienniczych przy zastosowaniu nanocząstek dwutlenku tytanu (nano TiO₂) [2-5].

Dwutlenek tytanu występuje w naturze w trzech odmianach krystalicznych: anataz, rutil i brukit [6]. Odmiana krystaliczna anataz charakteryzuje się największą aktywnością fotokatalityczną [7]. Nano TiO₂ charakteryzuje się wysoką aktywnością fotokatalityczną, wysoką absorpcją promieniowania UV oraz hydrofilowością [6]. Fotokatalizator podczas naświetlania promieniowaniem o energii większej lub równej energii przejścia półprzewodnika absorbuje foton [8, 6]. Powoduje to przeniesienie elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa z wytworzeniem dziury elektronowej [8, 6]. Wybity elektron w kontakcie z cząsteczkami tlenu tworzy anionorodnik ponadtlenkowy (O₂⁻) [8, 6].

Dodatkowo naładowana powierzchnia nano TiO₂ pozyskuje elektrony z wody zawartej w powietrzu, co przyczynia się do tworzenia rodników hydroksylowych (OH[•]) [8, 6]. Wytworzone reaktywne formy tlenu (RFT) rozkładają w procesie utleniania zanieczyszczenia organiczne, w tym zanieczyszczenia barwne. Literatura

przedmiotowa szeroko opisuje właściwości samoczyszczące fotokatalitycznych wykończeń tekstyliów w odniesieniu do zaplamień kawą [9], czerwonym winem [9], zabrudzeń sokami owocowymi [10] oraz barwnikami takimi jak Błękit Remazol B [11], Rodamina B [2].

Prezentowana praca przedstawia wyniki badań nad opracowaniem technologii produkcji tkanin bawełnianych o właściwościach samoczyszczących oraz przeciwdrobnoustrojowych, prowadzonych przez Katedrę Włókien Sztucznych Politechniki Łódzkiej wspólnie ze Zwoltex Sp. z o.o. [12-13]. Właściwości samoczyszczące wyrobów uzyskano w wyniku naniesienia na powierzchnię tkanin bawełnianych nanocząstek dwutlenku tytanu o strukturze krystalicznej anataz. Działanie przeciwdrobnoustrojowe (antybakteryjne i przeciwgrzybiczne) wykończenia uzyskano w wyniku naniesienia na powierzchnię wyrobów pirytronianu cynku.

2. Materiały i metody

Badania prowadzono na tkaninie bawełnianej wytworzonej z bielonej chemicznie i rozjaśnianej optycznie przędzy bawełnianej o splocie skośnym oraz masie powierzchniowej 200 g/m², produkcji Zwoltex Sp. z o.o. W procesie wykończenia zastosowano następujące środki pomocnicze: (1) dyspersja nanocząstek dwutlenku tytanu (nano TiO₂) produkcji Cinkarna Celje, d.d. (Słowenia) o następującej charakterystyce: struktura krystaliczna anataz, średnia wielkość krystalitów 10 nm, specyficzna powierzchnia właściwa >250 m²/g; zawartość nano TiO₂ w dyspersji 20-22% oraz (2) dyspersja wodna pirytronianu cynku (ZnP) o wysokim stopniu rozdrobnienia, zawartość ZnP w dyspersji 48%, produkcji The Thomson Research Associates Group (Kanada).

Proces wykończenia prowadzono w warunkach przemysłowych przy zastosowaniu klasycznego sposobu napawania-suszenia-dogrzewania [12-13]. Tkaninę bawełnianą napawano w szerokości w kąpeli apreterskiej zawierającej 10 g/dm³ nano TiO₂ oraz 2,9 g/dm³ ZnP. Po napawaniu tkaninę suszono w szerokości w suszarce ramowej w temperaturze 150 °C i w czasie 3 minut. Z wykończonej tkaniny bawełnianej konfekcjonowano ściereczki kuchenne. Przedstawiony sposób wykończenia został zgłoszony do Polskiego Urzędu Patentowego [13].

Ocenę właściwości samoczyszczących prowadzono w odniesieniu do zaplamień sokiem z czarnej porzeczki (nektar z czarnej porzeczki zawierający 25% soku z czarnych porzeczek, marki Hortex). Plamienie sokiem prowadzono metodą druku stemplowego, nadmiar soku po plamieniu odsączono na bibule filtracyjnej. Zaplamione ściereczki suszono w ciemności i w temperaturze otoczenia. Właściwości samoczyszczące oceniono po naświetlaniu 160W żarówką rtęciową SOLAR GLO PT2193, produkcji Exo Tera (Kanada) o emitowanym widmie światła zbliżonym do światła słonecznego. Próbkę naświetlano w czasie 2 godzin i 15 minut. Odległość źródła światła od naświetlanych próbek dobrano w taki sposób aby natężenie

promieniowania UVA/UVB wynosiło 1,4 mW/cm². Natężenie promieniowania UVA/UVB kontrolowano za pomocą miernika promieniowania UV-AB ST513 SENTRY. Przed procesem naświetlania oraz po 1 godzinie naświetlania zaplamione próbki zwilżano, przy pomocy spryskiwacza, wodą destylowaną. Zaplamione próbki przed oraz po naświetlaniu poddano instrumentalnej ocenie barwy przy zastosowaniu spektrofotometru odbiciowego Spectraflash SP 300 DataColor, Szwajcaria. Przed pomiarami spektrofotometr skalibrowano według instrukcji producenta przy wyłączonym oświetleniu próbki promieniowaniem UV w zakresie 190-400 nm.

Oceniono odporność właściwości samoczyszczących oraz aktywność przeciwdrobnoustrojową po wielokrotnych cyklach prania / suszenia. Proces prania prowadzono w temperaturze 60 °C i w czasie 30 minut przy zastosowaniu komercyjnego proszku do prania wyrobów białych (stężenie proszku do prania 5 g/dm³). Proces prania wykonano w domowej, automatycznej pralce do prania. Po każdym cyklu prania ściereczki kuchenne suszono w temperaturze otoczenia w warunkach swobodnego rozwieszenia.

Badania właściwości antybakteryjnych i przeciwgrzybiczych wykonano w Laboratorium Badań Włókienniczych Wyrobów Medycznych Instytutu Włókiennictwa. Aktywność antybakteryjną oceniono metodą absorpcyjną wg normy PN-EN ISO 20743:2013-10 „Wyznaczanie aktywności antybakteryjnej wyrobów gotowych z wykończeniem antybakteryjnym. Metoda absorpcyjna” dla bakterii: *Staphylococcus aureus* (ATCC 6538) oraz *Escherichia coli* (ATCC 11229). Właściwości przeciwgrzybicze oceniono wg metody AATCC Test Method 100-2004 w odniesieniu do *Candida albicans* (ATCC 10231).

3. Wyniki i dyskusja

W tabeli 1 zastawiono wyniki badań spektrofotometrycznych w świetle odbitym zaplamionych sokiem z czarnej porzeczki próbek przed oraz po naświetlaniu światłem UV/VIS. Zaplamione próbki naświetlano zgodnie z procedurą opisaną w rozdziale 2. Dla każdej próbki oznaczono wartość emisji światła w zakresie 400-700 nm. Różnice barwy zaplamionych próbek przed oraz po procesie naświetlania określono na podstawie wskaźnika K/S oraz różnicy barwy ΔE^* . Procentową różnicę pomiędzy wskaźnikami K/S przed i po procesie naświetlania obliczono według wzoru:

$$\Delta K / S(\%) = \frac{K / S_0 - K / S_{2h}}{K / S_0} \cdot 100\%$$

gdzie:

K / S_0 – wartość wskaźnika K/S przed procesem naświetlania,

K / S_{2h} – wartość wskaźnika K/S po 2 godzinach i 15 minutach naświetlania.

Tabela 1. Wyniki badań spektrofotometrycznych zaplamionych próbek przed oraz po naświetlaniu światłem UV/VIS

Oznaczenie próbek	K/S ($\lambda=540$ nm)		$\Delta K/S$ (%)	ΔE^*
	Przed naświetlaniem	Po naświetlaniu		
Bez wykończenia	0,40	0,38	5	1,8
Wykończona przed procesem prania	0,26	0,14	46,1	14,5
Wykończona po 5 praniach	0,36	0,11	69,4	14,8
Wykończona po 10 praniach	0,39	0,18	53,8	10,5
Wykończona po 20 praniach	0,42	0,15	64,3	13,6
Wykończona po 30 praniach	0,38	0,17	55,3	11,9

Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników badań spektrofotometrycznych.

Wartość parametru Kubelka-Munka (K/S) jest wprost proporcjonalna do stężenia substancji barwnej we włóknie. Dla zaplamionych sokiem wykończonych tkanin bawełnianych po procesie naświetlania wartość wskaźnika K/S zmniejsza się, co świadczy o obniżeniu stężenia substancji barwnej we włóknie. Wysoka wartość parametru $\Delta K/S$ (od 46,1% wykończonej, niepranej ściereczki do 55,3% dla ściereczki po procesie prania) prania dla wykończonych próbek potwierdza fotodestrukcję substancji barwnej plam pod wpływem utleniającego działania RFT powstających w procesie fotokatalizy. Zestawione w Tabeli 1 różnice barwy (ΔE^*) wskazują na dużą zmianę barwy wykończonych i zaplamionych sokiem próbek po naświetlaniu promieniowaniem UV/VIS o widmie zbliżonym do światła słonecznego. Wartości ΔE^* wynoszą od 14,5 dla wykończonej, niepranej ściereczki do 11,9 dla ściereczki po 30 cyklach prania / suszenia. W przypadku ściereczki konfekcjonowanej z tkaniny bez wykończenia obserwuje się małą zmianę barwy miejsca zaplamionego wynoszącą 1,8 po naświetlaniu promieniowaniem UV/VIS. Świadczy to o znikomej destrukcji barwników pod wpływem działania promieniowania UV/VIS oraz braku właściwości fotokatalitycznych.

Na rysunku 1 przedstawiono zdjęcia wykończonych fotokatalitycznie ściereczek bawełnianych po wielokrotnych cyklach prania / suszenia (do 50 cykli prania). Do wizualnej oceny właściwości samoczyszczących zastosowano 5 stopniową szarą skalę do oceny zmiany barwy próbki barwnej. W celu wyeliminowania niedokładności oceny organoleptycznej, stopnie zmiany barwy obliczono na podstawie pomiarów spektrofotometrycznych. Do oceny właściwości samoczyszczących

zastosowano następujące kryteria oceny: ocena 5 brak właściwości samoczyszczących, ocena 1 – bardzo dobre właściwości samoczyszczące.



* Zmianę barwy próbki barwnej (wg szarej skali) oznaczono metodą spektrofotometryczną w skali od 1 do 5, gdzie 1- bardzo duża zmiana, 5 – brak zmiany barwy

Rys. 1. Zdjęcia zaplamionych próbek przed i po procesie naświetlania

Źródło: opracowanie własne na podstawie wykonanych badań.

Zaplamione, apretowane ściereczki bawełniane charakteryzują się po procesie naświetlania ocenioną organoleptycznie dużą zmianą barwy. Stopień zmiany barwy po procesie naświetlania oceniono według szarej skali na 1 przed procesem prania oraz na 1-2 po 50 cyklach prania / suszenia. Oznacza to bardzo dobre właściwości samoczyszczące. Stopień zmiany barwy po naświetlaniu dla ściereczki bez wykończenia wynosi 4 według szarej skali, co oznacza brak właściwości samoczyszczących. Ściereczki bawełniane, konfekcjonowane z tkaniny bawełnianej wykończonej według opisanej technologii charakteryzują się bardzo dobrymi właściwościami samoczyszczącymi, wynikającymi z dużej aktywności fotokatalitycznej powierzchni wyrobu. Właściwości samoczyszczące wykazują odporność na co najmniej 50 cykli prania / suszenia w warunkach domowych.

Ocenę działania przeciwdrobnoustrojowego prowadzono w odniesieniu do bakterii Gram+ (*Staphylococcus aureus*), Gram- (*Escherichia coli*) oraz drożdży *Candida albicans*. Według kryteriów oceny zgodnych z EN ISO 20743:2013 (Załącznik F) przyjmuje się, że wyroby włókiennicze wykazują następującą aktywność antybakteryjną:

- brak aktywności gdy wartość parametru A jest mniejsza od 0,5
- niewielką aktywność gdy A zawiera się w granicach $\leq 0,5; 2 >$
- znaczącą aktywność gdy A zawiera się w granicach $\leq 2, 3 >$,
- silną aktywność gdy wartość parametru A jest większa od 3.

Wyniki badań właściwości przeciwbakteryjnych i przeciwgrzybiczych zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki badań aktywności przeciwdrobnoustrojowej przed i po procesie prania

Próba	Liczba prań	Wartość aktywności antybakteryjnej A		
		<i>Staphylococcus aureus</i>	<i>Escherichia coli</i>	<i>Candida albicans</i>
Wykończona	0	7,23	3,78	5,5
	30	2,76	0,69	3,9
	50	2,97	1,27	3,5

Źródło: opracowanie własne na podstawie raportów z badań¹⁸.

Ściereczka kuchenna konfekcjonowana z wykończonej tkaniny charakteryzuje się przed procesem prania silną aktywnością antydrobnoustrojową w odniesieniu do wszystkich testowanych mikroorganizmów. Wykończone ściereczki bawełniane wykazują po 50 cyklach prania / suszenia, silną aktywność antydrobnoustrojową w odniesieniu do drożdży *Candida albicans*, znaczącą aktywność antybakteryjną w odniesieniu do bakterii *Staphylococcus aureus* oraz niewielką aktywność w odniesieniu do bakterii *Escherichia coli*. Właściwości przeciwdrobnoustrojowe wykazują odporność na 50 cykli prania / suszenia.

4. Podsumowanie

Wykończona według przedstawionej technologii tkanina bawełniana charakteryzuje się bardzo dobrymi, odpornymi na 50 cykli prania / suszenia, właściwościami samoczyszczącymi wynikającymi z fotokatalitycznych właściwości nanocząstek dwutlenku tytanu (nano TiO₂).

Wykończona tkanina charakteryzuje się odpornymi na 50 cykli prania / suszenia aktywnością przeciwdrobnoustrojową w odniesieniu do szczepów bakterii *Staphylococcus aureus* i *Escherichia coli* oraz drożdży *Candida albicans*.

Podziękowania

Wyniki badań przedstawione w niniejszej pracy zostały sfinansowane przez Zwoltex Sp. z o.o. w ramach prac badawczych realizowanych przez Katedrę Włókien Sztucznych oraz Zwoltex Sp. z o.o. na podstawie Umowy Nr 1/01/2018.

¹⁸ Raporty z badań wyznaczania aktywności antydrobnoustrojowej: Nr 65/1-3/BME/2018; Nr 65a/1-3/BME/2018; Nr 87/1/BME/2018; Nr 87a/1/BME/2018; Nr 97/1/BME/2018; Nr 97a/1/BME/2018;

Literatura

- [1] **Rybicki E.**, Problemy konserwacji wyrobów włókienniczych, PWN, Łódź 2008.
- [2] **Landi Jr. S., Corneiro J., Ferdov S., Fronces A.M., Neves I.C., Ferreira M., Parpot P., Soares O.S.G.P., Pereira M.F.R.**, Photocatalytic degradation of Rhodamine B dye by cotton coated with SiO₂-TiO₂ and SiO₂-TiO₂-XY composites, *Journal of Photochemistry and PhotobiologyA: Chemistry* 2017, Vol. 346, s. 60.
- [3] **Chaudhari S.B., Mandot A.A., Patel B.H.**, Effect of nano TiO₂ pretreatment on functional properties of cotton fabric, *International Journal of Engineering Research and Development* 2012, Vol. 1, No. 1, s. 24.
- [4] **Chaudhari S.B., Mandot A.A., Patel B.H.**, Effect of nano TiO₂ pretreatment on functional properties of cotton fabric, *International Journal of Engineering Research and Development* 2012, Vol. 1, No. 1, s. 24.
- [5] **Norouzi M., Malekina L.**, Photocatalytic Effects of nanoparticles of TiO₂ in Order to Design Self-Cleaning Textiles, *Asian Journal of Chemistry* 2010, Vol. 22, No. 8, s. 5930.
- [6] **Kosmala K., Szymańska R.**, Nanocząsteczki tlenku tytanu (IV). Otrzymywanie, właściwości i zastosowanie, *Kosmos Problemy Nauk Biologicznych* 2016, Vol. 65, Nr 2, s. 235.
- [7] **Luttrell T., Halpegamage S., Tao J., Kramer A., Sutter E., Batzill M.**, Why is anatase a better photocatalyst than rutile? - Model studies on epitaxial TiO₂ films, *Scientific Reports* 2014, Vol. 4, s. 4043.
- [8] **Krishna M.G., Vinjanampati M., Purkayastha D.D.**, Metal Oxide Tin films and nanostructures for self-cleaning applications: current status and future prospects, *Eur. Phys. J. Appl. Phys* 2013, Vol. 62, s. 30001.
- [9] **Wang R., Wang X., Xin J.H.**, Advanced Visible-Light-Driven Self-Cleaning Cotton by Au/TiO₂/SiO₂ Photocatalysts, *Applied Materials & Interfaces* 2010, Vol. 2, No. 1, s. 82.
- [10] **Montazer M., Harifi T.**, Nanofinishing of Textile Materials. The Textile Institute Book Series, Woodhead Publishing, Cambridge 2018.
- [11] **Acayanka E., Tarkwa J-B., Nchimi K.N., Voufouo S.A.Y., Tiya-Djowe A., Kamgang G.Y., Laminsi S.**, Grafting of N-doped titania nanoparticles synthesized by the plasma-assisted method on textile surface for sunlight photocatalytic self-cleaning applications, *Surfaces and Interfaces* 2019, vol. 17, no 100361.

-
- [12] **Matyjas-Zgondek E.**, Opracowanie technologii wytwarzania wyrobów włókienniczych o właściwościach aktywności przeciwdrobnoustrojowej oraz samoczyszczących, praca nie publikowana, Katedra Włókien Sztucznych Politechniki Łódzkiej, Łódź 2018.
- [13] **PL.427632**. Sposób wytwarzania kolorowych wyrobów włókienniczych tkanych o właściwościach samoczyszczących oraz biobójczych. Opubl. 2.11.2018.

KWANTYFIKACJA EFEKTU GOFROWANIA TKANIN GOFROWANYCH

Małgorzata Matusiak

*Instytut Architektury Tekstyliów
Politechnika Łódzka*

1. Wstęp

Tkaniny gofrowane charakteryzują się występowaniem regularnych wypukłości na powierzchni. Wypukłości te mają kształt pasów ułożonych w kierunku osnowy [1]. Przykładową tkaninę gofrowaną przedstawiono na zdjęciu poniżej (rys. 1).



Rys. 1. Przykładowa tkanina gofrowana kolorowo tkana

Źródło: opracowanie własne.

Profesor Janusz Szosland zaliczył tkaniny gofrowane do grupy tkanin z reliefem, które zdefiniował jako tkaniny charakteryzujące się występowaniem na ich powierzchni wypukłości i wklęsłości, a więc odznaczające się znaczną plastyką. [2]. Do tkanin z reliefem Janusz Szosland zaliczył również: boucle, krepy, rypsy sztruksy, tkaniny wafłowe, piki i *qloué*. Tkaniny gofrowane mogą być wytwarzane różnymi metodami. Jedną z nich jest metoda tkacka. Jest to metoda mechaniczna, w której efekt gofrowania, uzyskuje się poprzez odpowiednią technologię tkania. Polega ona na wytwarzaniu tkaniny z dwóch osnów o zróżnicowanym napięciu. Różnica napięć osnowy dolnej i górnej powoduje zróżnicowane wrobienie osnów. W wyniku tego efekt gofry powstaje już w procesie tkania.

W chwili obecnej nie ma uznanych w świecie metod badawczych, pozwalających ocenić wielkość efektu gofrowania w tkaninach gofrowanych. Jedyną miarą, która umożliwia ocenę efektu gofrowania jest wrobienie osnowy tworzącej paski gofrowane. Zazwyczaj wrobienie osnowy gofrującej wynosi 50 % i więcej. Pojawiły się próby skwantyfikowania efektu gofrowania w oparciu o wyniki trójwymiarowego skanowania laserowego tkanin gofrowanych [3, 4]. W oparciu o wyniki skanowania

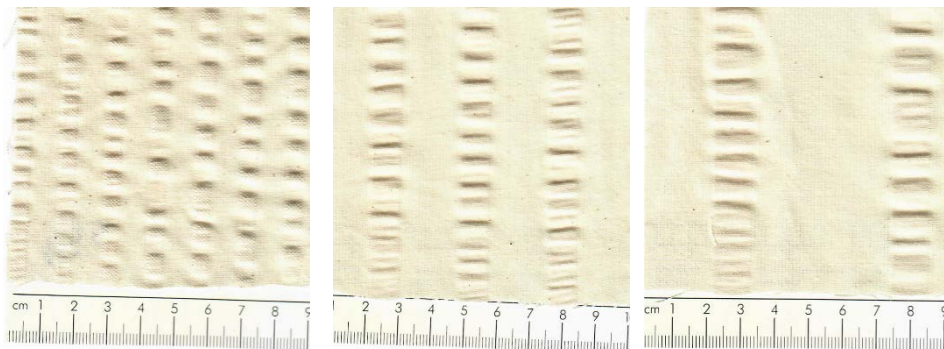
wyznaczono chropowatość powierzchni tkanin w miejscach gładkich i gofrowanych, maksymalną wysokość profilu oraz mapy hipsometryczne.

Celem prezentowanych badań była ocena efektu gofrowania tkanin gofrowanych o zróżnicowanej strukturze. W ramach niniejszej pracy przeprowadzono badania topografii powierzchni tkanin gofrowanych za pomocą profilometru *MicroSpy*[®] *Profile* [5]. W oparciu o wyniki uzyskane za pomocą profilometru wyznaczono szereg parametrów charakteryzujących topografię powierzchni badanych tkanin.

2. Materiały i metody badawcze

Badaniom topografii powierzchni poddano 3 warianty tkanin gofrowanych bawełnianych. Tkaniny różniły się między sobą raportem pasków gofrowanych. Osnowy we wszystkich wariantach były jednakowe. W obu osnowach, tj. tworzącej tło i tworzącej paski gofrowane, jak również jako wątek, zastosowano przędzę bawełnianą skręcaną 20 tex x 2. W badanych tkaninach zastosowano trzy rodzaje raportów pasków gofrowanych różniące się szerokością pasków gofrowanych oraz odstępami między paskami gofrowanymi (rys. 2). Zastosowano następujące warianty raportu gofrowania:

- wariant MM1 – szerokość pasków gofrowanych i odległość między paskami odpowiednio: 5 mm i 8 mm,
- wariant MM2 – szerokość pasków gofrowanych i odległość między paskami odpowiednio: 9 mm i 18 mm,
- wariant MM3 – szerokość pasków gofrowanych i odległość między paskami odpowiednio: 11 mm i 41 mm.



Rys. 2. Zdjęcia tkanin gofrowanych poddanych badaniom

Źródło: opracowanie własne.

Badaniom poddano tkaniny surowe. W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry strukturalne tkanin gofrowanych poddanych badaniom w zakresie parametrów charakteryzujących topografię powierzchni.

Tabela 1. Podstawowe parametry tkanin gofrowanych poddanych badaniom w zakresie topografii powierzchni

Parametr	Jednostka	Wartość		
		MM1	MM2	MM3
Splot – osnowa I	-	płótno		
Splot – osnowa II	-	ryps 2/2 (2)		
Liczność osnowy	cm ⁻¹	12,7	12,6	11,4
Liczność wątku	cm ⁻¹	11,4	11,5	11,4
Masa powierzchniowa	g m ⁻²	2129	207,8	1928
Wrobienie osnowy I	%	8,3	6,0	5,2
Wrobienie osnowy II	%	49,8	48,8	49,7
Wrobienie wątku	%	7,1	6,4	9,2

Źródło: opracowanie własne.

Badania wykonano za pomocą profilometru *MicroSpy® Profile* (rys. 3) firmy *FRT GmbH*.

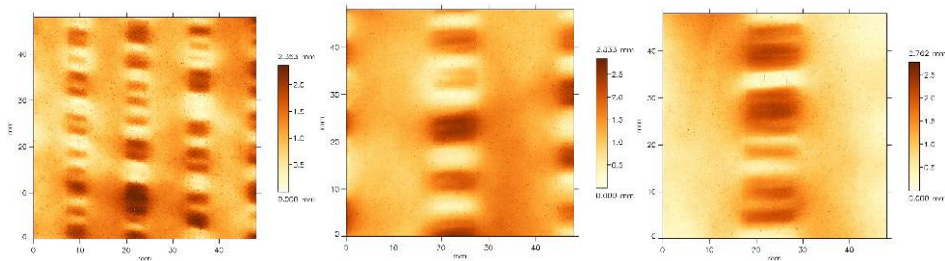


Rys. 3. Profilometr *MicroSpy® Profile* firmy *FRT GmbH*;
Źródło: *Operating Manual FRT MicroSpy® Profile*.

Czujnik FRT CWL zastosowany w profilometrze *MicroSpy*[®] opiera się na opatentowanej metodzie, która wykorzystuje aberrację chromatyczną (w zasadzie współczynnik załamania światła zależny od długości fali) soczewek optycznych. Dla każdego wariantu tkanin gofrowanych wykonano skanowanie 5 próbek. Powierzchnia skanowania była tak dobrana, żeby objąć przynajmniej 1 raport efektu gofrowania. W oparciu o uzyskane wyniki skanowania przeanalizowano topografię powierzchni badanych tkanin stosując specjalistyczne oprogramowanie Mark III [6] współpracujące z profilometrem.

3. Wyniki badań

Rysunek 4 przedstawia przykładowe skany badanych tkanin gofrowanych wykonane za pomocą profilometru *MicroSpy*[®].



Rys. 4. Skany tkanin gofrowanych wykonane za pomocą profilometru *MicroSpy*[®] Profile firmy FRT: od lewej MM1, MM2, MM3

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie wyników z profilometru wyznaczono szereg wskaźników charakteryzujących geometryczną strukturę powierzchni tkanin. Pomiary wykonano dla całej zeskanowanej powierzchni tkanin oraz osobno dla powierzchni gładkiej i gofrowanej. W niniejszym opracowaniu przedstawiono tylko wybrane wyniki, które odzwierciedlają zróżnicowanie powierzchni pasków gofrowanych i pasków gładkich. Wartości wybranych parametrów powierzchni przedstawiono w tabeli 2. Dla całej zeskanowanej powierzchni oraz dla pasków gładkich i gofrowanych wyznaczono wartości następujących parametrów:

R_a – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości [7],

R_q – średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości [7],

V_{vv} – objętość pustek dolin [8],

V_{vc} – objętość pustek rdzenia [8].

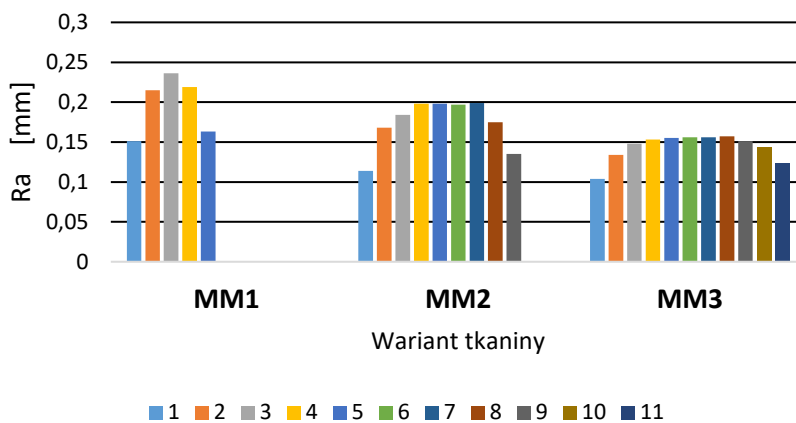
Stwierdzono wyraźne zróżnicowanie wartości ww. parametrów w zależności od tego, czy były one wyznaczane dla całej zeskanowanej powierzchni tkaniny gofrowanej, czy dla jej faz: płaskiej i gofrowanej. Najwyższe wartości, zgodnie z oczekiwaniem, odnotowano dla pasków gofrowanych, najniższe – dla pasków gładkich.

Tabela 2. Wartości parametrów charakteryzujących geometryczną strukturę powierzchni tkanin gofrowanych

Parametr	Jednostka	Wartość		
		Cała powierzchnia	Pasek gofrowany	Pasek gładki
R_a	mm	0,0184	0,033	0,010
R_q	mm	0,0404	0,043	0,020
V_{vv}	mm^3/mm^2	5,3508	6,401	1,058
V_{vc}	mm^3/mm^2	24,3516	44,038	12,236

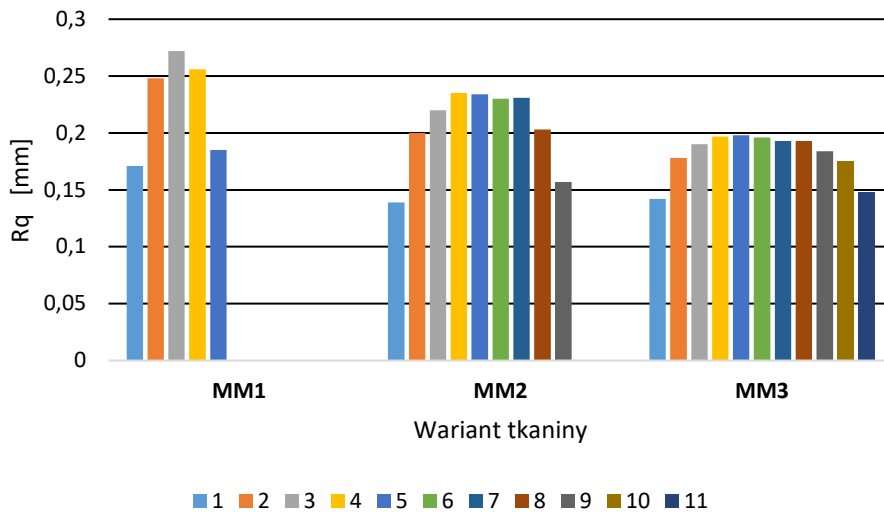
Źródło: opracowanie własne.

Obliczono również parametry R_a i R_q dla profili wyznaczonych wzdłuż pasków gofrowanych w odstępach co 1 mm na całej szerokości paska. Z uwagi na fakt, że szerokość pasków gofrowanych w poszczególnych wariantach badanych tkanin jest różna, również liczba profili wyznaczonych dla poszczególnych wariantów jest różna. Uzyskane wyniki przedstawiono na wykresach (rys. 5 i 6).



Rys. 5. Wartości parametru R_a dla profili wyznaczonych co 1 mm wzdłuż pasków gofrowanych badanych tkanin

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 6. Wartości parametru R_q dla profili wyznaczonych co 1 mm wzdłuż pasków gofrowanych badanych tkanin

Źródło: opracowanie własne.

W obu przypadkach, tj. parametru R_a i R_q , odnotowano różnice pomiędzy wariantami badanych tkanin w zakresie liczby profili oraz wartości parametrów R_a i R_q dla poszczególnych profili. Liczba profili odzwierciedla szerokość pasków gofrowanych. Wyniki są zgodne z założeniami projektowymi i bezpośrednimi pomiarami szerokości pasków. Jeśli chodzi o wartość parametrów charakteryzujących chropowatość wzdłuż wyznaczonych profili stwierdzono, że najwyższe wartości występują dla wariantu MM1, czyli tkaniny o najwęższych paskach gofrowanych, natomiast najmniejsze wartości – dla wariantu MM3, czyli o największej szerokości pasków gofrowanych (rys. 2). Najwyższe wartości parametrów R_a i R_q odnotowano dla profili wyznaczonych po środku pasków gofrowanych. Profile brzegowe charakteryzują się najniższą wartością obu wymienionych parametrów. Należy także zauważyć, że dla wariantu MM1 odnotowano największe zróżnicowanie wartości parametrów R_a i R_q pomiędzy profilem środkowym i profilami brzegowymi, natomiast najmniejsze zróżnicowanie wystąpiło dla wariantu MM3.

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły, że istnieje możliwość oceny efektu gofrowania tkanin gofrowanych poprzez pomiary parametrów charakteryzujących geometryczną strukturę powierzchni tkanin. Do tych badań może być zastosowany profilometr *MicroSpy® Profile* firmy FRT wraz z odpowiednim oprogramowaniem do przetwarzania danych z profilometru. Do oceny efektu zgofrowania mogą być

wykorzystane takie parametry jak: średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości R_a , średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości R_q , objętość pustek dolin V_{vv} oraz objętość pustek rdzenia V_{vc} . Istnieje możliwość wyznaczenie szeregu innych parametrów topografii powierzchni tkanin, które również mogą być wykorzystane do oceny efektu zgefrowania tkanin gofrowanych. Będą one opisanych w dalszych publikacjach.

Badania finansowane przez Narodowe Centrum Nauki w ramach projektu badawczego pt.: „Geometryczna, mechaniczna i biofizyczna parametryzacja trójwymiarowych struktur tkanych”; nr projektu: 2016/23/B/ST8/02041

Literatura

- [1] **Matusiak M.**, *Tkaniny gofrowane. Właściwości biofizyczne*, Wydawnictwa Politechniki Łódzkiej, Łódź 2020.
- [2] **Szosland J.**, *Struktury tkaninowe*, Polska Akademia Nauk, O/Łódź, Łódź 2007.
- [3] **Frączzak Ł., Domagała R., Zgórnjak P., Matusiak M.**, *Parameterization of Seersucker Woven Fabrics Using Laser Techniques*, *Autex Research Journal* 2019, Vol. 19, No. 3, ss. 243-249.
- [4] **Matusiak M., Frączzak Ł.**, *Investigation of 3D woven fabric topography using laser-scanning*, *Fibres and Textiles in Eastern Europe* 2018, vol. 26, nr 1, ss. 81-88.
- [5] FRT GmbH, *Operating Manual FRT MicroSpy® Profile*, Version 2.104, Germany, Bergisch Gladbach 2016.
- [6] FRT GmbH, *Manual Mark III. Version 3.11 R2T1*, Germany, Bergisch Gladbach 2018.
- [7] Biuro Naukowo-Techniczne SIGMA, *Usługa Pomiaru chropowatości powierzchni*, online, <https://www.bnt-sigma.pl/pomiar-chropowatosci-powierzchni> [dostęp: 22.04.2020]
- [8] **Wieczorowski M.**, *Trójwymiarowa analiza nierówności powierzchni*, online, https://www.ita-polska.com.pl/article_bw/83/trojwymiarowa-analiza-nierownosci-powierzchni, [dostęp: 22.04.2020]

MODEL ANALITYCZNY DLA DUŻYCH UGIĘĆ PŁASKIEJ STRUKTURY TEKSTYLNEJ O ZMIENNEJ SZTYWNOŚCI ZGINANIA I JEGO WERYFIKACJA Z WYKORZYSTANIEM SYMULACJI MES

Piotr Szablewski

*Katedra Inżynierii Mechanicznej, Informatyki Technicznej i Chemii Materiałów
Polimerowych
Politechnika Łódzka*

1. Wstęp

Badanie ugięć elementów wspornikowych wykonanych z różnych materiałów było dotychczas przedmiotem wielu analiz. Przykłady belki wspornikowej poddanej pionowej sile skupionej działającej na swobodnym końcu można znaleźć m. in. w pracy [1], a także w wielu innych podręcznikach z zakresu fizyki i mechaniki. Jednak w wyżej wymienionym podręczniku dyskusja dotyczy tylko elementów poddanych niewielkim ugięciom. Gdy ugięcia są duże, i założenie małego kąta przestaje być aktualne, problem staje się bardziej skomplikowany, a rozwiązanie analityczne staje się niemożliwe do uzyskania.

Lee [2] badał duże ugięcia liniowej sprężystej belki wspornikowej o zmiennym przekroju pod obciążeniem za pomocą metody Runge-Kutta-Falsi. Baker [3] uzyskał duże profile ugięcia liniowych sprężystych belek wspornikowych przy dowolnych rozkładach obciążeń za pomocą ważonego rozwiązania resztkowego równania momentu zginającego Bernoulliego-Eulera. Dado i AL-Sadder [4] przedstawili nową technikę analizy dużych ugięć niepryzmatycznych belek wspornikowych w oparciu o zintegrowany błąd najmniejszych kwadratów nieliniowego równania różniczkowego, w którym kąt obrotu jest reprezentowany poprzez wielomian. Shvartsman [5] zbadał duże ugięcia belki wspornikowej poddanej obciążeniu śledzącemu, redukując dwupunktowy nieliniowy problem brzegowy do zagadnienia początkowego poprzez zamianę zmiennych, a następnie rozwiązując go bez iteracji. Badane były również belki wspornikowe wykonane z materiałów nieliniowych. Lewis i Monasa [6] zbadali numerycznie duże ugięcia belek wspornikowych wykonanych z materiałów nieliniowych poddanych pionowemu skupionemu obciążeniu na swobodnym końcu, stosując metodę Runge-Kutty czwartego rzędu. Lee [7] zbadał duże ugięcia belek wspornikowych wykonanych z nieliniowego sprężystego materiału, poddanych obciążeniu złożonemu, stosując metodę Runge-Kutt'a piątego rzędu wg Butchera.

Antman [8] badał duże wyboczenia nieliniowo-sprężystych belek poddanych zginaniu, skręcaniu, rozciąganiu i ścinaniu. Seames i Conway [9] przedstawili

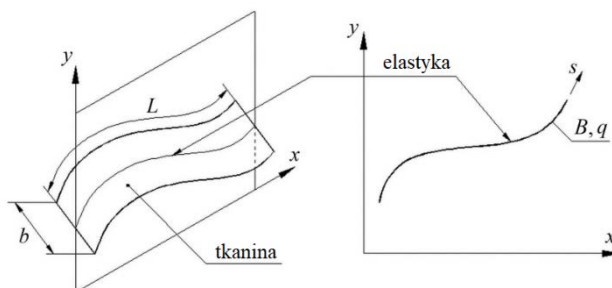
numeryczną metodę obliczania dużych ugięć belek wspornikowych poddanych równomiernemu obciążeniu. W tej metodzie numerycznej założono, że sprężysta oś belki może być aproksymowana przez pewną liczbę łuków okręgu, stycznych do siebie. Do określenia promienia każdego łuku kołowego wykorzystano równanie Bernoulliego-Eulera. Frisch-Fay [10] podał rozwiązanie dla dużego ugięcia belki wspornikowej za pomocą całek eliptycznych. Bisshopp i Drucker [11] rozwiązali problem dużego ugięcia belki wspornikowej poddanej pojedynczemu obciążeniu skupionemu, działającemu pionowo w dół na swobodny koniec belki, wykorzystując również całki eliptyczne. Prace [10] i [11] opierają się na podstawowym twierdzeniu Bernoulliego-Eulera, które stwierdza, że krzywizna jest proporcjonalna do momentu zginającego.

W niniejszym opracowaniu przeanalizowano duże ugięcia struktury tekstylnej o zmiennej sztywności na zginanie poddanej stałemu obciążeniu skupionemu, przyłożonemu na swobodnym końcu. Zagadnienie rozwiązano numerycznie z wykorzystaniem metody Eulera oraz metody strzału (*ang.* shooting method) do rozwiązania brzegowego. Wykorzystano oprogramowanie Mathematica w celu znalezienia kształtu ugiętej struktury. Charakterystycznym dla tej pracy jest to, że ta analiza obejmuje obciążenie struktury stałą, skupioną siłą przyłożoną na swobodnym końcu pod określonym kątem oraz ciężarem własnym badanego obiektu, nie ograniczając w ten sposób analizy tylko do siły skupionej, działającej pionowo do dołu. Ze względu na występowanie w analizie zależności nieliniowych, dokładne rozwiązanie analityczne nie istnieje. Konieczne zatem było opracowanie programu komputerowego, wykorzystującego metodę numeryczną Eulera w celu rozwiązania kształtu ugiętej struktury i przeprowadzenie serii eksperymentów numerycznych. Uzyskane wyniki zostały następnie zweryfikowane przy użyciu oprogramowania wykorzystującego metodę elementów skończonych (MES).

2. Numeryczne rozwiązanie problemu

2.1. Model numeryczny badanego obiektu

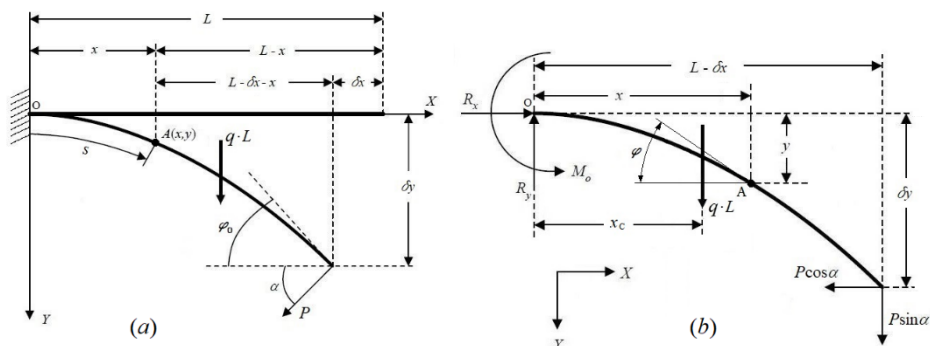
W pracy założono, że podczas przebiegu zginania płaski pas tkaniny będzie reprezentowany poprzez jego przekrój podłużny. Płaski wyrób tekstylny o określonej długości L i szerokości b poddany został zginaniu. Warunki zginania są takie same w całym wyrobie. W ten sposób problem przestrzenny zredukowano do odpowiedniego problemu płaskiego. Zamiast badania paska tkaniny, analiza numeryczna dotyczyć będzie ugięć ciężkiej elastyki o zadanej sztywności zginania B i odpowiednim ciężarze liniowym q , jak pokazano na rysunku 1. Każdy punkt o współrzędnej łukowej s , mierzonej wzdłuż elastyki, zdefiniowany jest poprzez współrzędne kartezjańskie $x(s)$, $y(s)$. Współrzędne x i y są funkcjami zmiennej s .



Rys.1. Model płaskiego wyrobu tekstylnego aproksymowanego elastyką

Źródło: opracowanie własne

Ponadto założono, że elastyka jest nierozciągliwa. Należy zauważyć, że założenie nierozciągliwości jest w pewnym stopniu ograniczające. Jednak takie założenie często pojawia się w analizie dużych ugięć. Oprócz ciężaru liniowego elastyka obciążona jest siłą skupioną. Następnie założono, że obowiązuje twierdzenie Bernoulliego-Eulera, które stwierdza, że krzywizna elastyki jest proporcjonalna do momentu zginającego.



Rys.2. Model płaskiego wyrobu tekstylnego aproksymowanego elastyką

Źródło: opracowanie własne.

Rys.2a pokazuje badany obiekt o długości L obciążony siłą skupioną P przyłożoną na swobodnym końcu. Na tym rysunku δx i δy oznaczają odpowiednio przemieszczenia poziome i pionowe swobodnego końca, a φ_0 maksymalny kąt nachylenia elastyki. Kąt przyłożenia siły skupionej reprezentowany jest przez α . Współrzędna łukowa s mierzona jest od utwierdzonego końca O do punktu A .

Rys.2b przedstawia obiekt uwolniony z więzów i uwzględnia siły działające na ugięty obiekt. W opisie przyjęta, że $x(s)$ i $y(s)$ będą reprezentowane jako x i y . Na utwierdzonym końcu, oznaczonym jako O , M_0 jest momentem reakcji, a R_x i R_y są siłami reakcji. Siłę P rozłożono na składową 0 poziomą i pionową (P_x , P_y).

Należy zauważyć, że współrzędna środka ciężkości x ugiętej krzywej o długości L wynosi $x_c = \left(\int_0^L x ds\right) \cdot L^{-1}$. Momentem reakcji M_O wynosi

$$M_O = P \sin \alpha (L - \delta x) + P \cos \alpha \delta y + qL \cdot \left(\int_0^L x ds\right) \cdot L^{-1}. \quad (1)$$

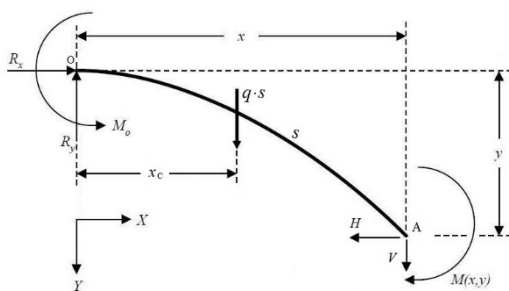
Warunki równowagi są następujące

$$\begin{aligned} R_x &= P \cos \alpha, \quad R_y = P \sin \alpha + qL, \\ M_O &= P \sin \alpha (L - \delta x) + P \cos \alpha \delta y + q \int_0^L x ds. \end{aligned} \quad (2)$$

Równanie Bernoulliego-Eulera dla jednorodnego przekroju prostokątnej belki ma postać $EI \cdot (d\varphi/ds) = M(x, y)$, gdzie $M(x, y)$ jest momentem zginającym w funkcji x i y , φ reprezentuje kąt nachylenia stycznej do elastyki, E to sprężystości, a I jest momentem bezwładności przekroju elastyki wokół osi zginania. Oznaczmy sztywność zginania jako B .

$$B \frac{d\varphi}{ds} = M(x, y). \quad (3)$$

$B=B(s)$ to zmienna sztywność zginania jako funkcja zmiennej s . Należy znaleźć moment M jako funkcję x i y , aby uzyskać moment w dowolnym punkcie na długości elastyki. Można to zrobić, analizując przekrój w dowolnym punkcie A na osi elastyki.



Rys.3. Elastyka uwolniona z więzów

Źródło: opracowanie własne.

Rys.3 pokazuje wycinek elastyki wraz z działającymi na nią siłami reakcji i momentami. Długość łuku elastyki, mierzona między utwierdzonym końcem O i punktem A , jest reprezentowana przez s .

W punkcie A $M(x,y)$ to moment zginający jako funkcja x i y , natomiast V i H reprezentują siły wewnętrzne. Współrzędna środka ciężkości x ugiętej krzywej o długości s wynosi $x_C = [\int_0^s x(\tau)d\tau] \cdot s^{-1}$. Po zsumowaniu momentów względem punktu A otrzymujemy

$$M_O - R_x y - R_y x + qs \{x - [\int_0^s x(\tau)d\tau] \cdot s^{-1}\} - M(x, y) = 0. \quad (4)$$

Wykorzystując równania (2) i (3) otrzymujemy

$$B \frac{d\varphi}{ds} = P \sin \alpha (L - \delta x - x) + P \cos \alpha (\delta y - y) - qLx + \\ + q \int_0^L x ds + qsx - q \int_0^s x(\tau) d\tau. \quad (5)$$

Różniczkując równanie (5) względem s i uwzględniając, że L , δx i δy są stałymi, otrzymujemy następującą zależność

$$\frac{dB}{ds} \frac{d\varphi}{ds} + B \frac{d^2\varphi}{ds^2} = -P \sin \alpha \frac{dx}{ds} - P \cos \alpha \frac{dy}{ds} - qL \frac{dx}{ds} + q[x + \frac{dx}{ds} s] - qx. \quad (6)$$

W równaniu (6) wykorzystano to, że jeżeli $F(s) = \int_a^s f(t)dt$, to $\frac{dF(s)}{ds} = f(s)$ (podstawowe twierdzenie rachunku całkowego). Wykorzystując trygonometrię można ustalić następujące zależności

$$\frac{dx}{ds} = \cos \varphi, \quad \frac{dy}{ds} = \sin \varphi. \quad (7)$$

Ostatecznie otrzymujemy

$$B \frac{d^2\varphi}{ds^2} = -P \sin \alpha \cos \varphi - P \cos \alpha \sin \varphi - qL \cos \varphi + qs \cos \varphi - \frac{dB}{ds} \frac{d\varphi}{ds}. \quad (8)$$

Równanie (8) jest nieliniowym równaniem różniczkowym opisującym krzywą ugięcia elastyki obciążonej siłą skupioną i ciężarem własnym, jak pokazano na rys. 2. Ponieważ dokładne rozwiązanie analityczne nie istnieje, opracowane zostanie rozwiązanie numeryczne zadanego problemu.

2.2. Numeryczne rozwiązanie problemu

Metodą Eulera nieliniowe równanie różniczkowe rzędu drugiego (8) można zredukować do dwóch równań różniczkowych nieliniowych pierwszego rzędu. Krzywiznę elastyki, oznaczoną jako κ , można zapisać jako

$$\kappa(s) = \frac{d\varphi}{ds}. \quad (9)$$

Podstawiając równanie (9) do równania (8) otrzymujemy

$$\frac{d\kappa}{ds} = -\frac{P}{B} \sin \alpha \cos \varphi - \frac{P}{B} \cos \alpha \sin \varphi - \frac{qL}{B} \cos \varphi + \frac{q}{B} s \cos \varphi - \frac{dB(s)/ds}{B} \kappa. \quad (10)$$

Aby rozwiązać ten problem numerycznie, zastosowany zostanie układ czterech równań różniczkowych zwyczajnych pierwszego rzędu z czterema niewiadomymi. Układ równań jest następujący

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\varphi}{ds} = \kappa, \\ \frac{dx}{ds} = \cos \varphi, \\ \frac{dy}{ds} = \sin \varphi, \\ \frac{d\kappa}{ds} = -\frac{P}{B} \sin \alpha \cos \varphi - \frac{P}{B} \cos \alpha \sin \varphi - \frac{qL}{B} \cos \varphi + \frac{q}{B} s \cos \varphi - \frac{dB/ds}{B} \kappa. \end{array} \right. \quad (11)$$

Z uwagi na fakt, że mamy do czynienia z typowym zagadnieniem brzegowym (nie wszystkie wartości początkowe badanych zmiennych są znane), w celu uzyskania prawidłowej krzywizny na utwierdzonym końcu zostanie wykorzystana metoda strzału (*ang.* shooting method).

W celu rozwiązania problemu, wykorzystano program Mathematica z odpowiednią funkcją do rozwiązania zagadnienia brzegowego z wykorzystaniem metody strzału. Na utwierdzonym końcu znane są $x=0$, $y=0$ i $\varphi=0$. Krzywizna κ jest nieznana. Na wolnym końcu krzywizna κ jest znana ($\kappa=0$), a x , y i φ są nieznane. Ideą metody strzału jest zastosowanie metody Newtona-Raphsona do znalezienia takiej początkowej wartości krzywizny, aby na swobodnym końcu krzywizna miała wartość $\kappa=0$.

3. Wyniki i dyskusja

3.1. Modelowanie zmiennej sztywności zginania

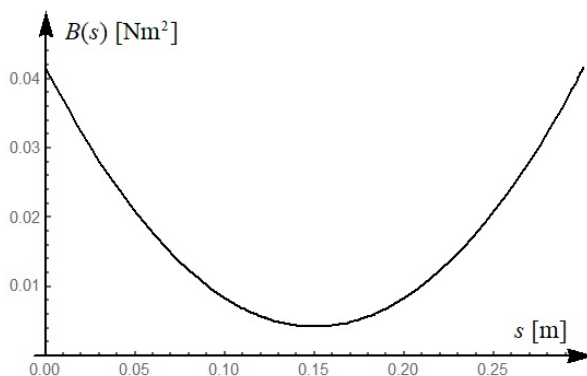
Do analizy numerycznej przyjęto następujące dane opisujące badany obiekt. Długość obiektu $L=0,3\text{m}$. Wymiary przekroju w punkcie utwierdzenia i na swobodnym końcu: szerokość $b=0,02\text{m}$, wysokość $h_0=0,005\text{m}$. Moment bezwładności przekroju: $I_0 = (bh_0^3)/12$. Moduł Younga $E=2 \cdot 10^8\text{N/m}^2$. Ciężar liniowy $q=1\text{N/m}$. Ważnym elementem analizy jest uwzględnienie zmiennej sztywności zginania B badanej struktury tekstylnej na całej jej długości, co często występuje w elementach kompozytowych. Funkcję zmiennej sztywności zginania założono z góry. Przyjęto rozkład sztywności zginania według wielomianu drugiego stopnia. Funkcję $B(s)$ założono następująco:

$$B(s) = \frac{B_0}{L^2} [L^2 + 4Ls(\xi - 1) - 4s^2(\xi - 1)] . \quad (12)$$

Funkcja $B(s)$ jest paraboliczna. Zgodnie z równaniem (12) w punkcie utwierdzenia i w punkcie swobodnym sztywność zginania ma maksymalną wartość $B_0=E \cdot I_0$. W środkowym punkcie elastyki sztywność zginania ma wartość minimalną $\xi \cdot B_0$, gdzie $\xi < 1$. Dla powyższych danych i $\xi=0,1$ mamy, że $B_0=0,0416667\text{Nm}^2$ i wtedy

$$B(s) = 0,462963 \cdot (0,09 - 1,08 \cdot s + 3,6 \cdot s^2), \quad [\text{Nm}^2]. \quad (13)$$

Wykres $B(s)$ przedstawiono na rys.4.



Rys.4. Wykres zmian sztywności zginania wzdłuż badanego obiektu

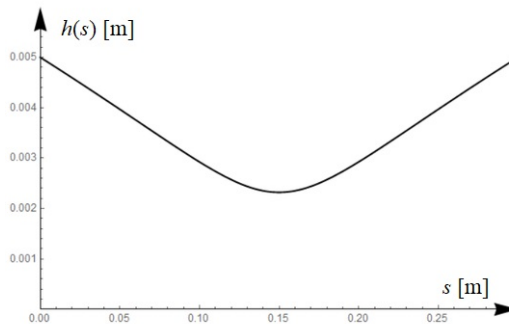
Źródło: opracowanie własne.

W odniesieniu do długości gięcia (zgodnie z testem Peirce'a) mamy:

- maksymalna długość gięcia dla B_0 : $D_{\max}=0,346681$ m,
- minimalna długość gięcia dla $\xi \cdot B_0$: $D_{\min}=0,160915$ m, gdzie $D = \sqrt[3]{B/q}$

Ważnym elementem przeprowadzonej analizy było potwierdzenie poprawności uzyskanych wyników. W celu weryfikacji został utworzony model obiektu do analizy MES za pomocą oprogramowania SolidWorks. Zmienną sztywność zginania uzyskano poprzez zmianę wysokości przekroju $h(s)$ wzdłuż długości obiektu jak niżej.

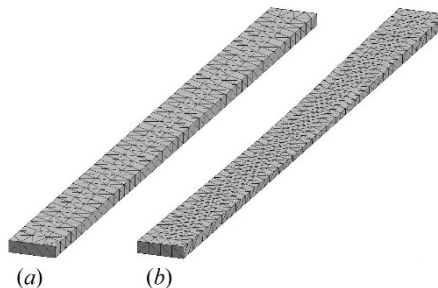
$$h(s) = \sqrt[3]{\frac{12B(s)}{Eb}} = \sqrt[3]{\frac{12B_0[L^2 + 4Ls(\xi - 1) - 4s^2(\xi - 1)]}{EbL^2}} \quad (14)$$



Rys.5. Wykres zmian wysokości przekroju wzdłuż badanego obiektu

Źródło: opracowanie własne.

Rys.6 pokazuje badaną strukturę tekstylną modelowaną w programie SolidWorks.



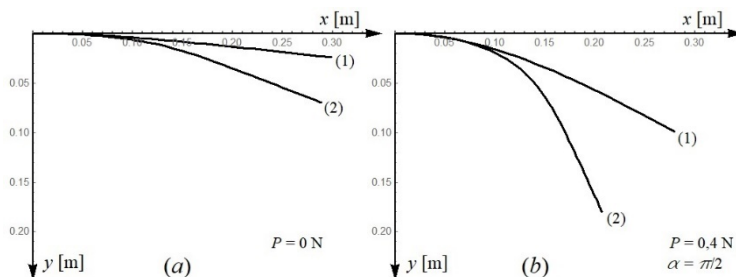
Rys.6. Badana struktura tekstylna modelowana w programie SolidWorks:

(a) stała sztywność zginania, (b) zmienna sztywność zginania

Źródło: opracowanie własne.

3.2. Wyniki obliczeń

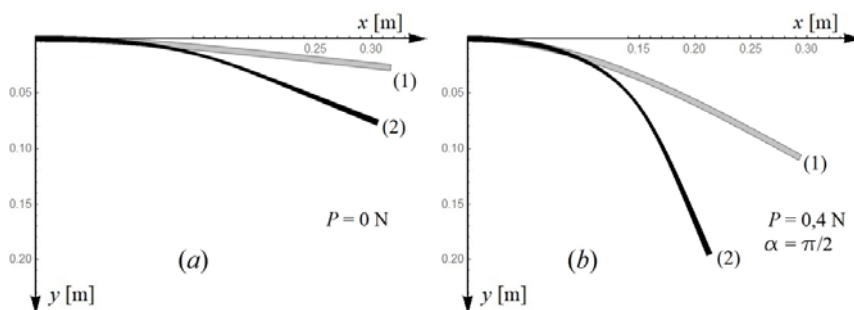
Obliczenia przeprowadzono najpierw dla obciążenia tylko ciężarem własnym q ($P=0$), a następnie razem z siłą działającą na swobodny koniec obiektu ($P \neq 0$). Wyniki obliczeń dla opisanego modelu analitycznego przedstawiono na rys.7. Wartość siły skupionej P przyłożonej do swobodnego końca przyjęto jako $P=0,4\text{N}$. Stały kąt, pod którym przyłożono siłę skupioną wynosił $\alpha=\pi/2$.



Rys.7. Wyniki obliczeń dla modelu analitycznego:
 (a) obciążenie tylko ciężarem własnym ($P=0\text{N}$),
 (b) obciążenie ciężarem własnym i siłą skupioną ($P=0,4\text{N}$),
 (1) stała sztywność zginania B_0 , (2) zmienna sztywność zginania $B(s)$

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki dla modelu MES przedstawiono na rys.8. Obliczenia przeprowadzono dla tych samych danych, co dla modelu analitycznego. W celu utrzymania tych samych warunków obciążenia, model MES musi być poddany oddziaływaniu pionowej siły powierzchniowej o wartości: $Q=q/b=50\text{Nm}^{-2}$.



Rys.8. Wyniki obliczeń dla modelu MES:
 (a) obciążenie tylko ciężarem własnym ($P=0\text{N}$),
 (b) obciążenie ciężarem własnym i siłą skupioną ($P=0,4\text{N}$),
 (1) stała sztywność zginania B_0 , (2) zmienna sztywność zginania $B(s)$

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie analizy wykresów (rys.8 i 9) można stwierdzić, że kształty ugiętej struktury zarówno dla modelu analitycznego, jak i modelu MES są identyczne. Potwierdza to również analiza wartości przemieszczeń swobodnego końca dla obu modeli. Wartości przemieszczeń poziomych i pionowych δx i δy przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości przemieszczeń poziomych i pionowych swobodnego końca dla modelu analitycznego i modelu MES dla wybranych warunków obciążenia

			Model analityczny	Model MES	Błąd względny modelu analitycznego w porównaniu do modelu MES ϵ [%]
Stała sztywność zginania $B_0 = \text{const.}$	$P=0N$	δx [mm]	1,115	1,113	0,180
		δy [mm]	24,174	24,148	0,108
	$P=0,4N$ $\alpha=\pi/2$	δx [mm]	20,088	20,269	0,893
		δy [mm]	98,906	99,286	0,383
Zmienna sztywność zginania $B(s)$	$P=0N$	δx [mm]	11,210	11,430	1,925
		δy [mm]	69,778	69,910	0,189
	$P=0,4N$ $\alpha=\pi/2$	δx [mm]	93,081	94,900	1,917
		δy [mm]	180,205	180,100	0,058

Źródło: opracowanie własne.

4. Podsumowanie

W pracy przedstawiono model analityczny do analizy dużych ugięć płaskiej struktury tekstylnej obciążonej ciężarem własnym i siłą skupioną, przyłożoną na swobodnym końcu. Dla takiego obiektu dokładne rozwiązanie analityczne na współrzędne x i y nie istnieje. Przeprowadzono zatem analizę numeryczną w oparciu o zbudowany model obliczeniowy. W tym celu opracowano dedykowany program komputerowy, pracujący w środowisku Mathematica. Program ten w oparciu o metodę Eulera, wspieraną metodą strzału (*ang. shooting method*) i metodą

Newtona-Raphsona, wykorzystano do znalezienia ugiętego kształtu badanego obiektu, dla zadanej geometrii, materiału i warunków obciążenia.

Następnie przeprowadzono analizę deformacji obiektu metodą elementów skończonych (MES). Analiza MES była rodzajem eksperymentu i została wykorzystana do weryfikacji wyników uzyskanych na podstawie modelu analitycznego. Analiza kształtów ugiętego obiektu, przedstawionych na rysunkach 7 i 8, wykazała wysoką zgodność przedstawionego modelu analitycznego z modelem MES. Dodatkowo wskazuje na to analiza wyników przedstawionych w tabeli 1. Przedstawiony w pracy przypadek zginania płaskiej struktury tekstylnej został pomyślnie rozwiązany z wykorzystaniem metod numerycznych. Praca niniejsza może być punktem wyjścia do tak zwanej analizy odwrotnej, w której ustala się sztywność zginania obiektu w celu uzyskania określonego kształtu dla zadanych warunków obciążenia.

Literatura

- [1] **Gere J.M.**, *Mechanics of Materials*, 6th ed., Brooks/Cole Thomson Learning, Belmont 2004.
- [2] **Lee B.K., Wilson J.F., Oh S.J.**, *Elastica of cantilevered beams with variable cross sections*, International Journal of Non-Linear Mechanics 1993, Vol. 28, ss. 579-589.
- [3] **Baker G.**, *On the large deflections of non-prismatic cantilevers with a finite depth*, Computers & Structures 1993, Vol. 46, nr 2, ss.365-370.
- [4] **Dado M., AL-Sadder S.**, *A new technique for large deflection analysis of non-prismatic cantilever beams*, Mech. Res. Commun. 2005, vol. 32, nr 6, ss. 692-703.
- [5] **Shvartsman B.S.**, *Large deflections of a cantilever beam subjected to a follower force*, Journal of Sound and Vibration 2007, Vol. 304, nr 3-5, ss. 969-973.
- [6] **Lewis G., Monasa F.**, *Large deflections of cantilever beams of nonlinear materials*, Computers & Structures 1981, vol. 14, nr 5-6, ss. 357-360.
- [7] **Lee K.**, *Large deflections of cantilever beams of non-linear elastic material under a combined loading*, International Journal of Non Linear Mechanics 2002, vol. 37, nr 3, ss. 439-443.
- [8] **Antman S.**, *Large lateral buckling of nonlinearly elastic beams*, Archive for Rational Mechanics and Analysis 1984, vol. 84, nr 4, ss. 293-305.
- [9] **Seames A.E., Conway H.D.**, *A numerical procedure for calculating the large deflections of straight and curved beams*, Journal of Applied Mechanics 1957, vol. 24, ss. 289-294.

- [10] **Frisch-Fay R.**, *Large deflections of a cantilever beam under two concentrated loads*, Journal of Applied Mechanics 1962, vol. 29, nr 1 ss. 200-201.
- [11] **Bisshopp K.E., Drucker D.C.**, *Large deflections of cantilever beams*, Quarterly of Applied Mathematics 1945, vol. 3, ss. 272-275.

TERMOWIZJA JAKO OCENA SPOSOBU WYKORZYSTANIA METODY NIR W CELU POPRAWY JAKOŚCI WYROBÓW HAFTOWANYCH

Jakub Kosmol, Izabella Krucińska

*Instytut Materiałoznawstwa, Tekstyliów i Kompozytów Polimerowych
Politechnika Łódzka*

1. Wstęp

Celem niniejszego opracowania jest przedstawienie wyników badań termowizyjnych, które stanowią integralną część pracy doktorskiej skupionej na ocenie wpływu ciepła (temperatury komory termicznej) na efektywne usuwanie zbędnych składników po procesie haftowania na wyrobach tekstylnych, z wykorzystaniem metody spektroskopii absorpcyjnej w bliskiej podczerwieni (NIR) i techniki odbiciowej.

Problem naukowy został zidentyfikowany podczas pracy w przedsiębiorstwie produkcyjnym na oddziale hafciarni, zlokalizowanym we Wrocławiu. Proces produkcyjny, stosowany w firmie HFT71 Sp. z o.o. został zaprezentowany na Rys. 1:



Rys. 1. Identyfikacja problemu naukowego – *opracowanie własne*

Źródło: opracowanie własne.

Elementem podlegającym identyfikacji w procesie produkcyjnym firmy HFT71 Sp. z o.o. jest obszar kontroli jakości, zwany inaczej procesem wykończenia. Obszar ten jest bezpośrednim następstwem produkcji masowej i każdy półprodukt (tak

nazywany jest produkt, który „nie przeszedł” pomyślnie przez kontrolę jakości) musi zostać gruntownie sprawdzony przez pracownika działu kontroli jakości, zarówno pod kątem estetycznym, jak i funkcjonalnym (np. czy produkt nadaje się do użytkowania). W ramach procesu kontroli jakości, każdy pracownik działu wykonuje następujące czynności:

- eliminacja flizeliny (materiał stanowiący podkład pod haft) – obecnie czynność jest wykonywana w sposób manualny z wykorzystaniem następujących narzędzi: nożyczki krawieckie i pęsety,
- eliminacja warstwy pianki polietylenowej – obecnie czynność jest wykonywana w sposób manualny z wykorzystaniem tych samych narzędzi co w przypadku eliminacji flizeliny,
- eliminacja nici poliestrowych – obecnie czynność jest wykonywana w sposób manualny z wykorzystaniem tych samych narzędzi co w przypadku eliminacji flizeliny,
- obróbka termiczna pianki polietylenowej oraz nici poliestrowych – obecnie czynność jest wykonywana w sposób manualny, z wykorzystaniem ręcznej opalarki termicznej. Pianka (oraz drobne pozostałości po niciach) ulegają natychmiastowemu stopieniu pod wpływem gorącego powietrza – stopione elementy zostają usunięte za pomocą szczotki,
- wykończenie haftu – obecnie czynność jest wykonywana w sposób manualny, z wykorzystaniem następujących narzędzi: nożyczki krawieckie, pęseta, gąbka do kąpieli, szczotka do butów, woda w sprayu.

Czynności podlegające automatyzacji w ramach obszaru kontroli jakości to:

- obróbka termiczna pianki polietylenowej i nici poliestrowych,
- wykończenie haftu.

Automatyzacja odbywa się w oparciu o:

- przygotowanie biblioteki widm absorpcyjnych w bliskiej podczerwieni,
- zaprojektowanie i budowę komory termicznej,
- zaprojektowanie i budowę systemu sterowania procesem obróbki termicznej (system SZOT), uwzględniający algorytm identyfikacyjny.

2. Obróbka termiczna – dane literaturowe

Na podstawie zidentyfikowanych włókien z jakich wyprodukowane zostało podłoże czapek oraz surowce pianki i nici, zakwalifikowanych do obróbki termicznej, wyznaczono temperatury nagrzewnicy w komorze termicznej, przy których wyrób nie ulegnie degradacji, poprzez wybór najniższej możliwej temperatury spośród wymienionych poniżej, które odpowiadają temperaturom topnienia/degradacji poszczególnych włókien na podstawie [8, 9]:

- Poliamid alifatyczny PA6 – 220 °C,
- Poliester aromatyczny – 380 °C,
- Wełna – 135 °C,
- Bawełna – 150 °C,
- Poliakrylonitryl – 300 °C

Z racji, iż czapka obejmowała kilka surowców (podłoże, nić, pianka), należało zastosować odpowiednią logikę przy wyborze temperatury końcowej, która mówi, iż przy zidentyfikowaniu więcej niż jednego surowca, należy wybrać najniższą możliwą temperaturę, celem uniknięcia ewentualnej degradacji materiału czapki lub nici lub pianki w skutek zbyt wysokiej temperatury obróbki dla pozostałych surowców. Minimalne temperatury dla każdego z zakwalifikowanych modeli czapek zostały zaprezentowane poniżej:

- Czapka w kolorze czarnym o składzie surowcowym 60% bawełna/40% poliester aromatyczny z haftem wypukło-płaskim (na czarnej piance polietylenowej) *Linie* wykonanym wielokolorową nicią z *poliestru aromatycznego* – temperatura nagrzewnicy 150 stopni Celsjusza,
- Czapka w kolorze białym o składzie surowcowym 80% poliakrylonitryl/20% wełna z haftem wypukłym (na białej piance polietylenowej) *SIXX PAXX* wykonanym różową nicią z *poliestru aromatycznego* – temperatura nagrzewnicy 135 stopni Celsjusza,
- Czapka w kolorze różowym o składzie surowcowym 60% bawełna/40% poliester aromatyczny z haftem wypukłym (na białej piance polietylenowej) *VP* wykonanym białą nicią z *poliestru aromatycznego* – temperatura nagrzewnicy 150 stopni Celsjusza,
- Czapka w kolorze czarnym o składzie surowcowym 80% poliakrylonitryl/20% wełna z haftem wypukłym (na czarnej piance polietylenowej) *SENSI SEEDS* wykonanym czarną nicią z *poliestru aromatycznego* – temperatura nagrzewnicy 135 stopni Celsjusza,
- Czapka w kolorze czarnym o składzie surowcowym bawełna 100%, z haftem płaskim *Snipes* w kolorze białym wykonanym nicią z *poliestru aromatycznego* – temperatura nagrzewnicy 150 stopni Celsjusza.

Wyniki badań obróbki termicznej z wykorzystaniem danych literaturowych zostały zaprezentowane na Rys. 2:



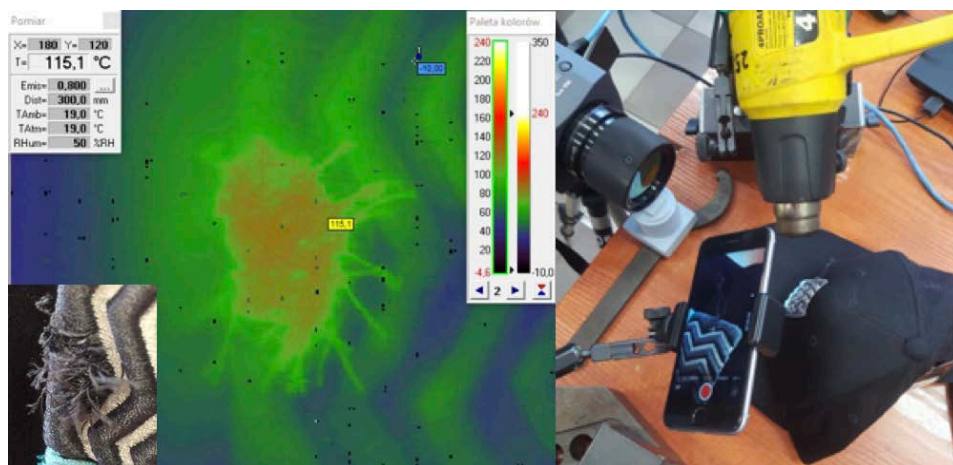
Rys. 2. Wyniki obróbki termicznej dla danych literaturowych – *opracowanie własne*
Źródło: opracowanie własne.

Wniosek z obserwacji:

Brak zauważalnych zmian z wykorzystaniem temperatur literaturowych, zarówno jeśli chodzi o materiał czapek, jak i włókna poliestrowe / polietylenowe. W celu znalezienia optymalnej temperatury nagrzewnicy, przy której obróbka termiczna mogła zostać zakończona sukcesem, wykorzystano proces termowizji.

3. Badania termowizyjne

Badania z wykorzystaniem strumieni ciepła powodującym wzrost temperatury odpowiadający temperaturom przedstawionych w literaturze nie przyniosły oczekiwanych rezultatów w postaci poprawnej obróbki termicznej nici i pianek. W związku z tym wykorzystano technikę termowizji, celem przebadania przy jakiej temperaturze nagrzewnicy, nici poliestrowe/pianki polietylenowe zaczną ulegać topnieniu przy nienaruszonym podłożu czapki. Badania termowizyjne zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu kamery termowizyjnej VIGOCam V50. Stanowisko badawcze oraz przykładowe badanie termowizyjne zostały zaprezentowane na rys. 3:



Rys. 3. Stanowisko badawcze / kamera optyczna vs termowizyjna – *opracowanie własne*
Źródło: opracowanie własne.

Zestawienie średnich temperatur panujących na podłożu czapki (z uwzględnieniem nici oraz pianek), w zależności od temperatury nagrzewnicy i składu surowcowego wyrobu tekstylnego (czapki), zostały zaprezentowane poniżej (Tab. 1):

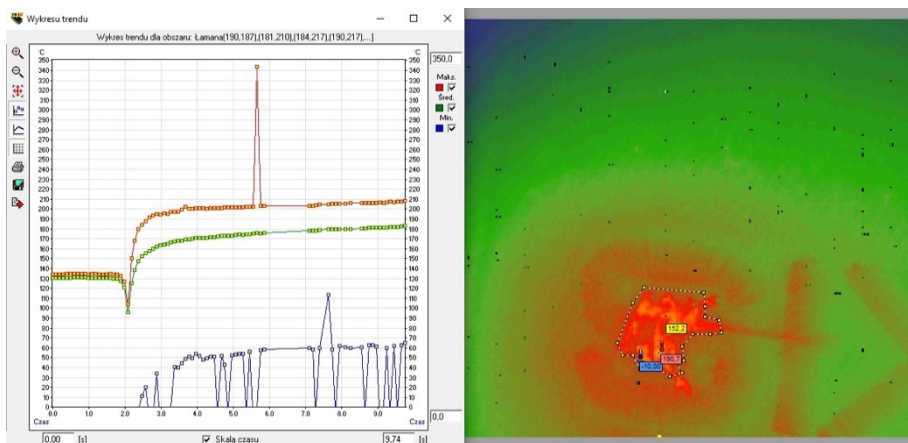
Tabela 1. Zestawienie temperatur średnich wyrobu (czapki) – *opracowanie własne*

Skład surowcowy Temp. nagrzewnicy	60% bawełna 40% wełna (czapka <i>Linie</i>)	80% poliakrylonitryl 20% wełna (czapka <i>SIXX PAXX</i>)	60% bawełna 40% wełna (czapka <i>VP</i>)	80% poliakrylonitryl 20% wełna (czapka <i>SENSI SEEDS</i>)	100% bawełna (czapka <i>Snipes</i>)
140 °C	72,57 °C (1)		79,79 °C		63,67 °C (1)
180 °C	89,06 °C (1)	92,63 °C	99,36 °C		76,36 °C (1)
220 °C	114,1 °C (1)	107,8 °C	119,6 °C		88,68 °C (1)
260 °C	132,4 °C (1) 124,3 °C (2)	134,0 °C	140,8 °C	130,9 °C	109,2 °C (1) 104,8 °C (2)
280 °C	133,5 °C (2)	143,2 °C	150,3 °C	153,0 °C	110,7 °C (1) 132,0 °C (2)
300 °C	150,9 °C (1) 147,9 °C (2)	152,1 °C	167,0 °C	159,3 °C	123,1 °C (1) 145,1 °C (2)
320 °C	161,0 °C (2)	159,6 °C	170,7 °C	169,7 °C	126,1 °C (1) 147,2 °C (2)
340 °C	162,4 °C (1) 158,2 °C (2)	162,9 °C	175,7 °C		133,2 °C (1) 162,9 °C (2)
360 °C		170,6 °C			137,2 °C (1) 153,7 °C (2)
380 °C					150,0 °C (1)
400 °C					160,6 °C (1)

Źródło: opracowanie własne.

Dla dwóch składów surowcowych zrealizowano dwie serie badań – stąd oznaczenia 1 i 2. Moment pomiaru dla każdego z wyrobów i dla każdej temperatury nagrzewnicy był taki sam dla każdego pomiaru i był ustawiony na drugą sekundę od momentu ustawienia docelowej temperatury nagrzewania.

Dla każdego z wyrobów zostały wyznaczone trendy temperatury, tak jak to zostało zaprezentowane na Rys. 4:



Rys. 4 Trend składu III (temp. nagrzewnicy: 300 °C) – *opracowanie własne*
Źródło: *opracowanie własne.*

4. Podsumowanie

Analizując wyniki badań termowizyjnych można wysnuć następujące wnioski:

- Ustawianie temperatury nagrzewnicy powinno uwzględniać barwę podłoża, nici oraz pianki (jeśli użyta) a nie tylko ich rodzaj, gdyż do rozpoczęcia procesu topnienia wymagana była niższa temperatura nagrzewnicy dla materiałów ciemniejszych niż dla jaśniejszych.
- Na podstawie przeprowadzonych badań obejmujących dwa składy surowcowe: 60% bawełna/40% poliester oraz 80% poliakrylonitryl/20% wełna zauważono, iż temperatura nagrzewnicy musi zostać ustawiona tak samo dla obu składów surowcowych: 280 stopni Celsjusza dla czapek ciemnych i 300 stopni Celsjusza dla czapek jasnych.
- Dla każdego z badanych składów surowcowych zauważono dużą utratę ciepła pomiędzy temperaturą nagrzewnicy a temperaturą panującą na czapce, dochodzącą nawet do 150 stopni Celsjusza, które ulega znaczącemu rozproszeniu przy stosunkowo niewielkiej odległości (3 cm) pomiędzy wylotem nagrzewnicy a frontem czapki.

Literatura

- [1] **Sztajnowski S.**, Metoda spektroskopii absorpcyjnej w podczerwieni w badaniach budowy polimerowych materiałów włókienniczych. Monografia, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2016.
- [2] **Wrosz P.**, Zastosowanie spektroskopii bliskiej podczerwieni i klasycznej podczerwieni w analizie jakościowej i ilościowej surowców w przemyśle farmaceutycznym i kosmetycznym, Niepublikowana rozprawa doktorska, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2012.
- [3] **Czarnecka-Komorowska D.**, Recykling niskoudarowego polistyrenu (GPPS): struktura, właściwości, Przetwórstwo Tworzyw 2013, nr 5.
- [4] **Czarnecka-Komorowska D., Ciesielska D.**, Wpływ liczby obiegów na właściwości recyklatów polimerowych, Wydawnictwo Czasopism i Książek Technicznych 2005, nr 3, ss. 16-17.
- [5] **Vilaplana F., Ribes-Greus A., Karlsson S.**, Degradation of recycled high-impact polystyrene. Simulation by reprocessing and thermooxidation, Polymer Degradation and Stability 2006, nr 91.
- [6] **Masek A.**, Recykling materiałów polimerowych – laboratorium, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2009.
- [7] **Biniaś W., Włochowicz A.**, Wykorzystanie spektrofotometrii fourierowskiej w zakresie bliskiej podczerwieni do analizy składu surowcowego wyrobów włókienniczych, Przegląd Włókienniczy 2002, nr 6.
- [8] **Urbańczyk G.**, Fizyka włókna, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2002.
- [9] **Mark E. J.**, Polymer Data Handbook, Oxford University Press, Oxford 1999.

IDENTYFIKACJA WSPÓLCZYNNIKÓW SPRĘŻYSTOŚCI W PROBLEMIE ZGINANIA PŁASKICH WYROBÓW WŁÓKIENNICZYCH

Elżbieta Radaszewska, Piotr Szablewski

*Katedra Inżynierii Mechanicznej, Informatyki Technicznej i Chemii Materiałów
Polimerowych
Politechnika Łódzka*

1. Wstęp

Sztywność zginania tkanin jest właściwością istotną z punktu widzenia walorów estetycznych. Same włókna są ciałami elastoplastycznymi. W tkaninach występują one w postaci zespolonej – w pierwszym rzędzie w przędzy, następnie wskutek związania splotem. Ugięcia tkanin są stosunkowo duże, przeto przekroczone jest w wielu przypadkach granica proporcjonalności. Z tego powodu uzyskanie ścisłych zależności między geometrią ugięcia a wielkościami mechanicznymi jest bardzo trudne i wymaga skomplikowanych rozważań teoretycznych popartych materiałem doświadczalnym.

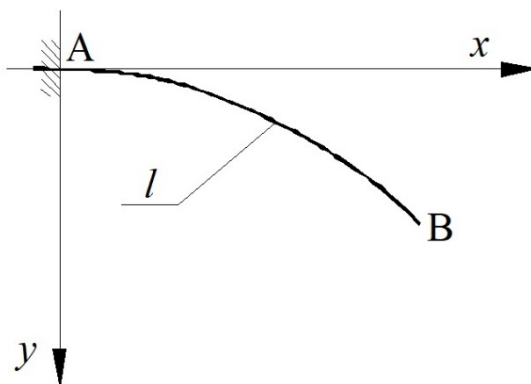
Analiza sztywności zginania tkanin nawiązuje zawsze do wyników otrzymywanych w czasie doświadczenia. Metody badania sztywności zginania można podzielić na dwie grupy: grawitacyjne i rotacyjne. Wspólną cechą większości tych metod jest to, że w ich wyniku uzyskuje się doświadczalne zależności pomiędzy geometrią ugięcia (promień krzywizny) a momentem gnącym, wywołującym zginanie. Metody te wymagają przeprowadzenia szeregu pomiarów dla różnych wartości momentu gnącego i odpowiedniego opracowania wyników.

Praca ma na celu zidentyfikowanie zjawiska zginania wyrobów włókienniczych. Identyfikacja ta dotyczy będzie związku fizycznego pomiędzy momentem gnącym M a krzywizną $1/\rho$. Jak pokazują wyniki doświadczalne związek ten w ogólności nie jest liniowy i może przedstawiać się bardziej złożoną zależnością. W pracy założono, że badania eksperymentalne dotyczą klasycznego testu wspornikowego Peirce'a (rys.1), wykorzystywanego do określania sztywności zginania wyrobów włókienniczych, a opisanego m.in. w pracach [1], [2] i [3].

Główną ideą pracy jest to, że w celu określenia związku pomiędzy geometrią a momentem gnącym wystarczy przeprowadzić tylko jedno doświadczenie, w wyniku którego uzyska się ugięty kształt wyrobu, a co za tym idzie wartości współrzędnych

(x,y) odpowiednich punktów osi ugiętej próbki o długości l dla kolejnych wartości współrzędnej łukowej s mierzonej wzdłuż osi począwszy od punktu A.

Oczywiście w celu weryfikacji można przeprowadzić kilka eksperymentów, porównując otrzymane wyniki. Dla celów niniejszej pracy został opracowany program komputerowy, który na podstawie obrazu ugiętego wyrobu, zapisanego w formacie pliku bmp (mapa bitowa), dokonuje analizy i oblicza z zadany krokami poszczególne współrzędne (x,y) osi ugiętej próbki.



Rys.1. Test Peirce'a

Źródło: opracowanie własne.

2. Numeryczne rozwiązanie problemu

Przed rozpoczęciem właściwej analizy należy się zastanowić nad tym, która z metod matematycznych będzie w tym przypadku najodpowiedniejsza. Należy mieć na uwadze fakt, iż wartości współrzędnych (x,y) otrzymane na drodze eksperymentalnej obciążone są błędem. Błąd ten wynika zarówno z samej metody pomiaru, jak również z procesu uzyskiwania na podstawie eksperymentu wartości współrzędnych. Współrzędne te mogą być otrzymane przykładowo na podstawie analizy obrazu uzyskanego poprzez wykonanie zdjęcia ugiętej próbki.

Ze względu na to, że różniczkowanie w niektórych przypadkach może być obciążone dużym błędem i wręcz uniemożliwić uzyskanie poprawnych wyników, w pracy postanowiono wykorzystać metodę opartą na całkowaniu momentu gnącego M .

2.1. Identyfikacja związku fizycznego między momentem gnącym a krzywizną

Opisany zostanie obecnie sposób podejścia do analizy związku fizycznego pomiędzy krzywizną ugiętej próbki $1/\rho = d\varphi/ds$ a momentem gnącym M , który to

związek opisuje zjawisko zginania płaskiego wyrobu włókienniczego. Jak pokazują wyniki doświadczalne związek ten w ogólności nie jest liniowy.

Poszukiwana jest zatem ogólna zależność w postaci:

$$\frac{d\varphi}{ds} = a_1 M + a_2 M^2 + a_3 M^3 + \dots, \quad (1)$$

gdzie M - moment gnący, φ - kąt nachylenia stycznej do osi próbki.

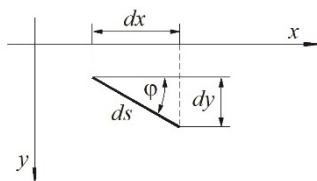
Występujące we wzorze (1) nieznanne chwilowo współczynniki a_1, a_2, a_3, \dots są współczynnikami sprężystości dla problemu zginania. Dla potrzeb niniejszego opracowania analiza ograniczona będzie do wielomianu najwyżej drugiego stopnia, czyli zgodnie ze wzorem (1) do wyrażenia zawierającego moment gnący w kwadracie.

$$\frac{d\varphi}{ds} = a_1 M + a_2 M^2. \quad (2)$$

Stąd

$$\varphi = \int (a_1 M + a_2 M^2) ds. \quad (3)$$

Kąt φ nachylenia stycznej do osi próbki w dowolnym punkcie określonym współrzędną s jest w tym przypadku funkcją trzech zmiennych $\varphi(s, a_1, a_2)$.



Rys.2. Elementarny wycinek ds

Źródło: opracowanie własne.

Zgodnie z rys.2 otrzymuje się: $dx = \cos(\varphi)ds$, $dy = \sin(\varphi)ds$.

Zatem współrzędne x i y uzyskać można poprzez całkowanie

$$x = \int \cos(\varphi)ds, \quad y = \int \sin(\varphi)ds. \quad (4)$$

Podobnie jak kąt φ współrzędne x i y są również funkcjami trzech zmiennych.

$$x(s, a_1, a_2), \quad y(s, a_1, a_2). \quad (5)$$

Mając zatem otrzymaną na podstawie współrzędnych x i y , które uzyskano doświadczalnie na podstawie testu Peirce'a, zależność na moment gnący, można wychodząc z zależności (2) uzyskać teoretyczne współrzędne x i y , które są jej rozwiązaniem analitycznym.

Na etapie identyfikacji chodzi o to, aby różnica pomiędzy współrzędnymi doświadczalnymi, które niech będą oznaczone przez (\tilde{x}, \tilde{y}) , a współrzędnymi uzyskanymi analitycznie (x, y) , była możliwie najmniejsza dla całej długości próbki l . Zależy to oczywiście od odpowiedniego doboru współczynników sprężystości a_1, a_2 występujących we wzorze (2). Miarą takiego dopasowania parametrów może być na przykład funkcja

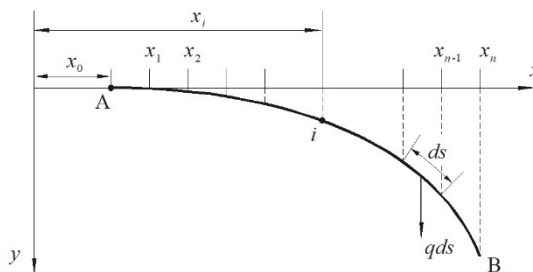
$$H = \int_0^l [(x - \tilde{x})^2 + (y - \tilde{y})^2] ds. \quad (6)$$

Poszukiwane są zatem takie parametry a_1, a_2 , dla których funkcja (6) osiąga minimum $H = \min$.

Po znalezieniu tych parametrów można twierdzić, że zależność (2) w miarę dokładnie opisuje zjawisko zginania badanej próbki. Ze względu na to, że problem rozwiązywany jest numerycznie poprzez podział próbki na n punktów, występujące we wzorach całki zastąpić należy sumami w odpowiednich granicach.

2.2. Wyznaczenie momentu gnącego

Na etapie identyfikacji zjawiska zginania dużą rolę odgrywa poprawne i w miarę dokładne określenie wartości momentu gnącego M w każdym punkcie pomiarowym. Moment ten należy określić na podstawie wartości współrzędnych, czyli na podstawie geometrii kształtu ugiętej próbki. Oczywiście trzeba dysponować jeszcze jedną daną jaką jest ciężar liniowy próbki q , który jest z założenia stały dla całej jej długości. Współrzędne (x, y) punktów, na które podzielono próbkę będą w tym przypadku funkcjami zmiennej łukowej s , która mierzona jest wzdłuż osi próbki począwszy od punktu A ($s=0$).



Rys.3. Dyskretyzacja próbki

Źródło: opracowanie własne.

Na rys.3 przedstawiono sposób podziału próbki na n punktów począwszy od punktu A, dla którego przyjęto indeks „0”.

Po przeprowadzonej analizie geometrii kształtu próbki dysponujemy wartościami współrzędnych:

$$x_i(s), y_i(s) \text{ dla } i=0,1,2,\dots,n.$$

Moment gnący w dowolnym punkcie i liczony jest jako algebraiczna suma momentów względem tego punktu wszystkich sił ciężkości poszczególnych odcinków elementarnych ds , działających po jednej stronie rozpatrywanego punktu (licząc od punktu B do i). Poszczególne siły ciężkości $q \cdot ds$ przyłożone są w środku odcinka ds . Zgodnie z powyższym wzór na moment gnący w dowolnym punkcie i przedstawia się następująco

$$M_i = q ds \left[\left(\sum_{j=i+1}^n \frac{x_j + x_{j-1}}{2} \right) - (n-i)x_i \right]. \quad (7)$$

Wzór (7) wyprowadzono przy założeniu stałego podziału próbki na elementarne odcinki $ds = \text{const}$.

Na ogół jednak podział próbki nie będzie równomierny. Poszczególne odcinki ds będą różne, a ich długość zależec będzie od współrzędnych punktów podziału. W tym przypadku moment gnący wyraża się zależnością

$$M_i = q \sum_{j=i+1}^n \left[\left(\frac{x_j + x_{j-1}}{2} - x_i \right) \sqrt{(x_j - x_{j-1})^2 + (y_j - y_{j-1})^2} \right]. \quad (8)$$

3. Przykłady liczbowe

Dla ilustracji powyższych rozważań rozpatrzono kilka przykładów liczbowych, dla których znana była postać zależności pomiędzy krzywizną a momentem gnącym. Chodziło o to, czy uzyskana na podstawie analizy postać związku fizycznego będzie możliwie dokładnie przedstawiać jego postać właściwą. Aby przetestować poprawność analizy bez wykonywania czasochłonnego eksperymentu zginania próbki, jej fotografowania i w końcu analizy obrazu dla uzyskania współrzędnych ugiętej osi, postanowiono przeprowadzić eksperyment wirtualny według następującego schematu.

Znając postać związku pomiędzy krzywizną a momentem gnącym, rozwiązano równanie zginania (2). Ponieważ jest to typowy problem brzegowy, do jego rozwiązania wykorzystano metodę strzału, opisaną m.in. w pracy [2]. Uzyskano w ten

sposób zbiór dokładnych wartości współrzędnych (x,y) . Aby mieć do czynienia z wartościami eksperymentalnymi, które obarczone są zwykle błędami pomiarowymi, dokładne wartości współrzędnych zaburzono błędem, poprzez dodanie do nich losowych wartości odchyłek. Tak uzyskane wartości współrzędnych potraktowano jako wartości doświadczalne (\tilde{x}, \tilde{y}) .

Przykład 1

Niech dana będzie próbka płaskiego wyrobu włókienniczego, dla której związek pomiędzy krzywizną a momentem gnącym jest dokładnie liniowy $\frac{d\varphi}{ds} = \frac{M}{C}$.

Dla tej próbki przyjęto następujące dane:

- długość próbki $l=0,1\text{m}$,
- stała sztywność zginania $C=10^{-5}\text{ Nm}^2$ (długość gięcia $D=0,046\text{ m}$),
- ciężar liniowy $q=0,1\text{ N/m}$.

Dokładna zależność pomiędzy krzywizną a momentem gnącym po uwzględnieniu danych liczbowych jest $\frac{d\varphi}{ds} = a_1 M$, gdzie $a_1=10^5\text{ (Nm}^2\text{)}^{-1}$.

Numeryczne rozwiązanie problemu przeprowadzono z wykorzystaniem programu Mathematica 12.0 firmy Wolfram Research (www.wolfram.com), układając odpowiedni program obliczeniowy. Minimalizacja funkcji H według zależności (6) przeprowadzona została w oparciu o standardową procedurę minimalizacyjną FindMinimum pakietu Mathematica [4]. Poszukiwano rozwiązania dla współczynnika a_1 występującego w liniowej zależności $\frac{d\varphi}{ds} = a_1 M$.

Dodatkowo na uzyskane współrzędne (x,y) narzucono przypadkowy błąd pomiarowy o wartości maksymalnej 5%.

Po przeprowadzonej minimalizacji funkcji H uzyskano następujące wyniki:

- $a_1=99501\text{ (Nm}^2\text{)}^{-1}$,
- wartość funkcji celu $H=4,07336 \cdot 10^{-5}\text{ m}^3$,

Błąd obliczeniowy niewielki ok. $\varepsilon=0,5\%$.

Przykład 2

Rozważono próbkę, dla której związek pomiędzy krzywizną a momentem gnącym jest dokładnie kwadratowy $\frac{d\varphi}{ds} = a_1 M + a_2 M^2$. Dla tej próbki przyjęto następujące dane:

- parametry $a_1=10^5\text{ (Nm}^2\text{)}^{-1}$, $a_2=2 \cdot 10^8\text{ (N}^2\text{m}^3\text{)}^{-1}$, pozostałe dane jak poprzednio.

Współrzędne (x,y) obarczono przypadkowym błędem pomiarowym o wartości maksymalnej 5%.

Poszukiwano rozwiązania dla współczynników a_1, a_2 występujących w zależności

$$\frac{d\varphi}{ds} = a_1 M + a_2 M^2.$$

Po przeprowadzonej minimalizacji funkcji H uzyskano następujące wyniki:

- $a_1 = 99956 \text{ (Nm}^2\text{)}^{-1}$,
- $a_2 = 1,99 \cdot 10^8 \text{ (N}^2\text{m}^3\text{)}^{-1}$,
- wartość funkcji celu $H = 3,15646 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3$,

W porównaniu z wartościami dokładnymi błędy są minimalne $\varepsilon_{a1} = 0,044 \%$, $\varepsilon_{a2} = 0,5 \%$.

4. Podsumowanie

Przeprowadzona w pracy próba identyfikacji zjawiska zginania wyrobów włókienniczych w oparciu o uzyskane na drodze eksperymentalnej wartości współrzędnych (x, y) osi ugiętej próbki okazała się skuteczna. Identyfikacja ta dotyczyła głównie związku fizycznego pomiędzy momentem gnący M a krzywizną $1/\rho$. Podczas analizy uwzględniono fakt, iż wartości współrzędnych mogą być obciążone błędem pomiarowym i z tego powodu przydatność metody jest bardziej satysfakcjonująca. Wykorzystany w pracy program obliczeniowy Mathematica 12.0 do minimalizacji funkcji celu okazał się dobrym i szybkim narzędziem.

Ze względu na to, że współrzędne pomiarowe obciążone są błędami, stwierdzono, że zastosowanie zależności matematycznych, w których występuje różniczkowanie tych współrzędnych staje się zawodne. Natomiast wykorzystanie całkowania podczas analizy daje wyniki z zadowalającą dokładnością.

W pracy ograniczono się do badania zależności pomiędzy krzywizną a momentem gnącym co najwyżej stopnia drugiego, co nie oznacza, że w praktyce nie można tą metodą badać zależności stopnia wyższego niż drugi.

5. Literatura

- [1] **Peirce F.T.**, *The „Handle” of Cloth as a Measurable Quality*, Journal of the Textile Institute Transactions 1930, Vol. 21, ss. T377-T416.
- [2] **Szablewski P., Kobza W.**, *Numerical analysis of Peirce’s cantilever test for the bending rigidity of textiles*, Fibres & Textiles in Eastern Europe 2003, Vol. 11, nr 4, ss. 54-57.
- [3] **Żyliński T.**, *Metrologia włókiennicza*. Tom 2, WPLiS, Warszawa 1965.
- [4] **Wolfram Research, Inc.**, *Mathematica*, Version 12.0., Wolfram Research, Inc., Champaign Illinois 2019.

BADANIA NAD MOŻLIWOŚCIĄ ZASTOSOWANIA WŁÓKIEN COOLMAX W INNOWACYJNYM OBUWNICTWIE

Wioleta Serweta, Barbara Wionczyk, Justyna Wójcik, Beata Szalek

Sieć Badawcza Łukasiewicz – Instytut Przemysłu Skórzanego

1. Wstęp

Zapewnienie odpowiednich właściwości higienicznych wyrobom włókienniczym, wykorzystywanym w obuwnictwie, jest jednym z najważniejszych zagadnień, związanych z projektowaniem innowacyjnych rozwiązań technologicznych. Kreowanie optymalnych warunków funkcjonowania stopy wewnątrz objętości obuwia, zależy przede wszystkim od warunków jego użytkowania oraz właściwości biofizycznych zestawu materiałów pozostających w bezpośrednim sąsiedztwie stopy¹⁹. Zagadnienie związane z doбором materiałów obuwniczych, wspomagających wymianę mediów biofizycznych, takich, jak ciepło, para wodna, czy powietrze, między stopą i otoczeniem (i odwrotnie), stanowią jeden z najważniejszych nurtów badań prowadzonych w tej tematyce. Jest ono skomplikowane z uwagi na fakt, iż przestrzenny układ stopa – obuwie charakteryzuje się wysokim stopniem niestacjonarności²⁰. W chwili obecnej istnieje wiele rozwiązań, opracowanych przez znane ośrodki badawcze, które poprawiają komfort fizjologiczny użytkowanego obuwia. Przykładowo, w pracy²¹, zaproponowano użycie w obuwiu strażackim, kompozytowych wkładek na bazie włókniny poliwęglanowej. Badania wskazały na istnienie silnej korelacji między kinetyką sorpcji a strukturą morfologiczną badanych materiałów ocenianą jakościowo za pomocą parametru porowatości, a także ilości porów o najmniejszej średnicy przypadającej na powierzchnię badanego materiału. W pracy²² zbadano wpływ rodzaju dzianin dystansowych na zjawisko odprowadzania

¹⁹ Pinar A., Mielicka E., *Charakterystyka wyrobów w technologii seamless*, Przegląd Włókienniczy – Włókno, Odzież i Skóra 2010, nr10, ss. 39 – 41.

²⁰ Irzmańska E., *Termiczny model stopy – próba aplikacji w badaniach obuwia ochronnego*, Pomiary Automatyka Kontrola 2012, vol. 58, nr 12, ss. 1076 – 1081.

²¹ Irzmańska E., Brochocka A., *Wpływ właściwości fizykochemicznych kompozytowych wkładek do obuwia ochronnego na poprawę mikroklimatu*, Fibres and Textiles in Eastern Europe 2014, nr 5 (107), ss. 89 – 95.

²² Serweta W., Olejniczak Z., Matusiak M., *Improve of footwear comfort sensation with material packages and knitted fabrics*, Fibres and Textiles in Eastern Europe 2019, nr 3 (135), ss. 85 – 90.

potu z powierzchni skóry stopy podczas badań symulowanego wysiłku. Wykazano, że zastosowanie w bliskim sąsiedztwie stopy materiałów o strukturach przestrzennych, pozwoliło na poprawę wskaźników komfortu użytkowania obuwia i obniżyło w sposób istotny statystycznie wartości współczynnika dyskomfortu. Badania te były następstwem wcześniejszych prac realizowanych w Instytucie Przemysłu Skórzanego^{23,24}, skoncentrowanych na zagadnieniach innowacyjnego obuwnictwa w ujęciu poprawy właściwości higienicznych. Badania symulacyjne z użyciem modelu sztucznej stopy potwierdziły, że dzianiny wielowarstwowe, w tym te o strukturze przestrzennej, mogą w sposób istotny poprawiać higieniczność obuwia. Uzyskane w tych pracach wyniki dają gwarancję, że kontynuowanie wskazanego kierunku badań jest zasadne i może wskazać nowe obszary implementacji innowacyjnych rozwiązań, opartych o stosowanie struktur tekstylnych o charakterze przestrzennym.

Włókna coolmax ze względu na swoje właściwości są znane i stosowane. Za pomocą dodatku tych włókien, możliwa jest poprawa komfortu fizjologicznego dla różnych elementów odzieży i innych materiałów (np. materacy). Przykładowo w pracy²⁵ przedstawiono badania, w których wykazano, że zastosowanie w strukturze skarpety włókien coolmax w ilości 50%, powoduje poprawę transportu wilgoci w formie ciekłej i przyspiesza schnięcie materiału już po zawilgoceniu. Podobne analizy przeprowadzono w pracy²⁶, gdzie porównano dzianiny z włóknami coolmax oraz outlast w odniesieniu do takich parametrów, jak przewodnictwo cieplne, opór cieplny i absorpcyjność cieplna, a także przepuszczalność powietrza.

Dzianina z włóknami coolmax zapewniała lepszą izolacyjność, objawiającą się wyższymi wartościami oporu cieplnego, niższymi wartościami przewodnictwa cieplnego i absorpcyjności. Również badania w stanie mokrym potwierdziły podwyższone właściwości w ujęciu komfortu fizjologicznego dla materiałów zawierających w swojej strukturze włókna coolmax. Innym rodzajem znanego zastosowania włókien coolmax jest ich obecność w materiałach przeznaczonych na materace, której wpływ zbadano w pracy²⁷. Dzięki takiemu rozwiązaniu osiągnięto bardzo dobre efekty w ujęciu zdolności do odprowadzania wilgoci i transferowania jej ku kolejnym warstwom materaca. W efekcie wspomagane jest tworzenie

²³ Woźniak B., *Funkcjonalność dzianin w układzie stopa – obuwie oceniana na modelu sztucznej stopy z funkcją ruchu i wydzielania wilgoci*, Politechnika Łódzka, Łódź 2011.

²⁴ Olejniczak Z., *Wpływ dzianin wielowarstwowych na mikroklimat w obuwiu*, Politechnika Łódzka, Łódź 2008.

²⁵ Komarkowa P., Glombikowa V., Havelka A., *Head and moisture transport of socks*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 254, 2017, ss. 1 - 6

²⁶ Onofrei E., Rocha A.M., Catarino A., *Investigating the effect of moisture on the thermal comfort properties of functional elastic fabrics*, Journal of Industrial Textiles 2012, vol. 42, nr 1, ss. 34 - 51

²⁷ Terliksiz S., Kalaoglu F., Eryuruk S.H., *Moisture transport properties of double jersey mattress ticking fabrics*, Journal of Textiles and Engineer 2012, vol.19, nr 85, ss. 15 - 19

optymalnego mikroklimatu wokół skóry w oparciu o zapewnianie ciągłego przepływu powietrza przez powierzchnię kontaktową. Również w odniesieniu do obuwia, znane są sposoby poprawiania właściwości higienicznych poprzez zastosowanie włókien funkcjonalnych. Przykładowo w pracy²⁸ przedstawiono analizę porównawczą materiałów znanych pod komercyjnymi nazwami, jako: coolpass, coolmax, dri – release oraz outlast w ujęciu właściwości mechanicznych związanych z podatnością na mechacenie i odpornością na tarcie. Przeprowadzone badania potwierdziły, że zastosowanie materiałów z włókien funkcjonalnych – w tym coolmax, może być również ukierunkowane na zwiększenie trwałości poszczególnych elementów obuwia – w szczególności wyściółek. Analogiczne badania materiałów przeznaczonych na skarpetki sportowe, ale w ujęciu właściwości higienicznych takich, jak czas nasiąkania, ilość zaabsorbowanej wody, czy szybkość zwilżania powierzchniowego przeprowadzono i opisano w pracy²⁹. Jedną z najlepszych kombinacji włókien, w ujęciu zarządzania wilgocią były te, które zawierały w swojej strukturze włókna coolmax.

Celem prezentowanej pracy jest zbadanie właściwości higienicznych trójwarstwowych pakietów materiałowych, w których jedną z warstw stanowi dzianina dystansowa wykonana na bazie włókien coolmax. Z uwagi na unikalną czterokanałową budowę włókna elementarnego, dzianiny takie zapewniają bardzo dobre odprowadzanie wilgoci z powierzchni skóry, a dodatkowo zapewniają bardzo dobrą oddychalność. Z uwagi na duże powinowactwo do pillingu oraz mniejszą niż inne materiały odporność na ścieranie³⁰, dzianinę tę zastosowano w warstwie środkowej, nienarażonej bezpośrednio na działanie sił destrukcyjnych o charakterze ścierającym. Próbkę skomponowaną na bazie dzianiny z włókien coolmax porównano z tymi, które zostały wytworzone przez zastosowanie dzianiny dystansowej na bazie włókien poliestrowych oraz pianki poliuretanowej.

2. Materiały i metodyka

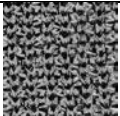
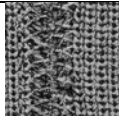
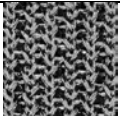
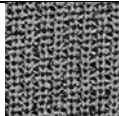
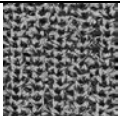
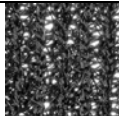
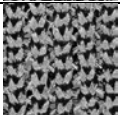
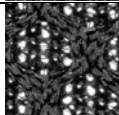

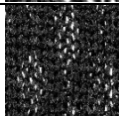
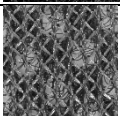
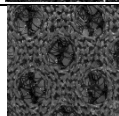
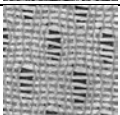
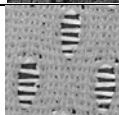
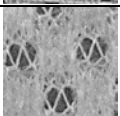
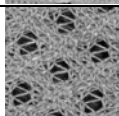
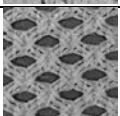
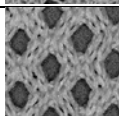
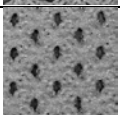
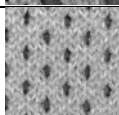
Badania przeprowadzono w grupie włókienniczych materiałów polimerowych (poliestrowych i poliamidowych) o płaskiej oraz przestrzennej strukturze o właściwościach opisanych w tabeli 1.

²⁸ Icin A.A., Kumaslar F.O., *Functional knitted fabrics for footwear linings*, *Textil ve Konfeksiyon* 2011, nr 1, ss. 30 - 35

²⁹ Siddique H.F., Mazari A., Tanveer M., *Sweat – management poroperties of semi bleached socks using different main yarn and plating yarn combinations*, *Vlakna a Textil* 2020, nr 1, ss. 69 - 75

³⁰ Blaga M., Marmarali A., Mihai A., *Functional knitted fabrics for footwear linings*. *Tekstil ve Konfeksiyon* 2011n nr 1, ss. 30-35.

Tabela 1. Charakterystyka materiałów zastosowanych w badanych układach włókienniczych.


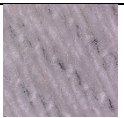
Nazwa próbki	Skład surowcowy	Masa pow. [g/m ²] ±5%	Grubość [mm] ±6%	Ścisłość rządkowa (liczność rządków/dm)	Ścisłość kolumnkowa (liczność kolumniek/dm)	Obraz dzianiny (strona lewa x20)	Obraz dzianiny (strona prawa x20)
D1	100% PES	317	2,7	240	100		
D2	100% PES	306	3,1	190	110		
D3	100% PES	265	2,3	180	100		
D4	100% PES	361	2,5	142,5	107,5		
D5-C	100% PES	287	2,3	182,5	170		
P2	100% PES	263	1,2	170	100		
P3	100% PA	163	0,6	160	100		
P4	100% PA	110	0,8	250	130		
P5	100% PA	148	0,4	170	150		
P6	100% PA	213	0,6	170	150		

Źródło: opracowanie własne.

Materiałami o strukturze przestrzennej są dzianiny dystansowe (D) poliestrowe, oznaczone kolejno, jako: D1, D2, D3, D4. W roli materiałów płaskich (P) zastosowano warianty poliamidowe (P3 – P6) oraz poliestrowy (P2). Materiał łączący stanowił przestrzenny materiał poliestrowy z włókien funkcjonalnych coolmax (D5-C) oraz dzianina D1 i pianka poliuretanowa PU grubości 2 mm i masie powierzchniowej 313 g/m². Charakterystykę tkaniny bawełnianej B1, zamieszczono w tabeli 2.

W pierwszej kolejności wykonano badania higieniczne wszystkich pojedynczych materiałów. Badania obejmowały oznaczanie przepuszczalności pary wodnej (PPW) i absorpcji pary wodnej (APW) według normy³¹. Następnie takie same badania wykonano dla materiałów trójwarstwowych. W roli materiału zewnętrznego (leżącego najdalej od powierzchni stopy) w każdym z układów zastosowano materiał bawełniany B1. Z kolei, w bezpośrednim sąsiedztwie stopy, zastosowano materiały D1 – D4 oraz P2 - P6. Jako łącznik zastosowano dzianiny D5-C oraz D1 oraz piankę poliuretanową PU.

Tabela 2. Charakterystyka materiału bawełnianego zastosowanego na warstwę zewnętrzną

Nazwa próbki	Skład surowcowy	Masa pow. [g/m ²] ±5%	Grubość [mm] ±6%	Zagęszczenie tkaniny nitkami (liczność nitok/100 mm)		Obraz tkaniny (strona lewa x20)	Obraz tkaniny (strona prawa x20)
				wątek	osnowa		
B1	100% bawełna	230	0.48	190	320		

Źródło: opracowanie własne.

³¹ PN-EN ISO 20344:2012. Środki ochrony indywidualnej. Metody badania obuwia p. 6.6, 6.7.

3. Rezultaty i ich omówienie

Wyniki oznaczania PPW i APW otrzymane dla pojedynczych materiałów zamieszczono w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki oznaczania przepuszczalności i absorpcji pary wodnej pojedynczych materiałów.

Lp.	Materiał	PPW	APW
1.	D1	42,6	0,12
2.	D2	39,1	0,04
3.	D3	42,6	0,05
4.	D4	44,3	0,05
5.	D5-C	32,8	0,38
6.	P2	34,7	0,04
7.	P3	41,4	0,19
8.	P4	38,3	0,02
9.	P5	33,6	0,02
10	P6	37,9	0,03
11	B1	35,8	2,99
12	PU	29,1	0,19

Źródło: opracowanie własne.

Analiza uzyskanych wyników oznaczania przepuszczalności oraz absorpcji pary wodnej wykazała, że poprawę właściwości higienicznych pakietów obuwniczych można uzyskać poprzez odpowiednie ich ułożenie względem siebie. Innymi słowy, właściwości higieniczne pakietów materiałowych ściśle zależą od właściwości pojedynczych materiałów, użytych do ich skonfigurowania (Tab. 3).

Badania przeprowadzone dla materiałów pojedynczych (Tab. 3) wskazują, że najlepsze właściwości przepuszczalności pary wodnej otrzymano w grupie dzianin o strukturze przestrzennej (D), gdzie najwyższą wartość równą 44,3 mg/(cm²h) osiągnięto dla materiału D4. Jednak, różnice pomiędzy wartościami PPW wyznaczonymi dla tych materiałów są niewielkie, na co wskazuje wartość obliczonego współczynnika zmienności wewnątrzgrupowej równa 11%. Wśród materiałów o strukturze płaskiej, największą wartość PPW, równą 41,4 mg/(cm²h) osiągnięto dla materiału P3. Z drugiej zaś strony, obliczona wartość współczynnika zmienności wewnątrzgrupowej jest niska i równa 8%, co może świadczyć o podobnych zdolnościach tych materiałów pod względem PPW. W przypadku APW największe wartości wśród dzianin dystansowych otrzymano dla D5-C (0,38 mg/cm²), a wśród materiałów płaskich dla P3 (0,19 mg/cm²). Ponadto, porównując wyniki otrzymane w poszczególnych grupach materiałów (Tab. 3), można zauważyć, duże zróżnicowanie pod względem zdolności do absorbowania pary wodnej.

W tabeli 4 przedstawiono wyniki oznaczania przepuszczalności i absorpcji pary wodnej dla badanych pakietów materiałowych.

Na podstawie uzyskanych wyników (Tab. 4), można stwierdzić, że zastosowanie, jako materiału łączącego, dzianiny poliestrowej D5-C z włóknami funkcjonalnymi coolmax zamiast standardowej dzianiny dystansowej D1, spowodowało poprawę właściwości przepuszczalności pary wodnej w przypadku materiałów P2, P4, P5 i P6 odpowiednio o około 13%, 5%, 28% i 9%, natomiast w przypadku materiału P3 zdolność do przepuszczania pary wodnej pogorszyła się o około 8%.

Tabela 4. Wyniki oznaczania PPW i APW otrzymane dla materiałów połączonych w różnych konfiguracjach.

Lp.	Układ materiałowy			PPW			APW		
	Materiały łączące								
	D1	D5-C	PU						
1.	B1+D1+P2	B1+ D5-C +P2	B1+ PU +P2	14.9	17.1	10.6	1.2	0.6	1.2
2.	B1+D1+P3	B1+ D5-C +P3	B1+ PU +P3	15.3	14.1	11.3	1.4	1.0	1.5
3.	B1+D1+P4	B1+ D5-C +P4	B1+ PU +P4	17.8	18.8	15.1	1.7	0.8	2.4
4.	B1+D1+P5	B1+ D5-C +P5	B1+ PU +P5	18.2	25.4	15.2	1.5	0.7	2.2
5.	B1+D1+P6	B1+ D5-C +P6	B1+ PU +P6	16.1	17.6	13.7	1.1	0.7	1.9
6.	B1+D1+D1	B1+ D5-C+D1	B1+ PU +D1	16.3	15.0	9.5	1.3	1.3	1.3
7.	B1+D1+D2	B1+ D5-C+D2	B1+ PU +D2	17.0	13.8	9.4	1.8	1.3	1.7
8.	B1+D1+D3	B1+ D5-C+D3	B1+ PU +D3	18.2	18.0	10.2	1.4	1.4	2.1
9.	B1+D1+D4	B1+ D5-C+D4	B1+ PU +D4	17.4	16.6	11.3	1.2	0.6	2.0

Źródło: opracowanie własne.

Jednak, porównując wyniki PPW otrzymane dla układów, w których zastosowano dwie standardowe dzianiny dystansowe (łączącą D1 i brzegowe D1-D4) z podobnymi układami, w których materiałem łączącym jest dzianina poliestrowa D5-C z włóknami funkcjonalnymi coolmax, można stwierdzić, że w tym przypadku zastosowanie dzianiny D5-C spowodowało pogorszenie wyników PPW.

Dzieje się tak, ponieważ dodanie warstwy materiału przestrzennego bardzo dobrze przepuszczającego parę wodną, powoduje poprawę jej cyrkulacji przez otwarte pory obydwu materiałów przestrzennych wchodzących w skład pakietu.

Najniższe wartości przepuszczalności otrzymano dla pakietów, gdzie w roli łącznika między warstwami zewnętrzną i wewnętrzną zastosowano piankę poliuretanową o niskiej gęstości (Tab. 4). Obniżona przepuszczalność pianki poliuretanowej, osiągająca wartość 29,1 mg/(cm²h) (Tab. 3), wynika z litej struktury materiału powodującej powstanie bariery, ograniczającej przepływ pary wodnej. W tym przypadku uzyskane wartości przepuszczalności kształtowały się w granicach między 9,4 mg/(cm²h) dla D2 a 15,2 mg/(cm²h) dla P5 (Tab. 4). Ponadto, można zauważyć, że nieco gorsze właściwości PPW zaobserwowano dla układów z pianką PU połączonych z materiałami o strukturze przestrzennej (D1 – D4) niż z materiałami o strukturze płaskiej (P2 – P6). Widoczne jest również, że zastąpienie litego materiału

piankowego, dzianinami dystansowymi w roli łącznika, poprawiło zdolność transmisji pary wodnej.

Zastosowanie w pakietach materiału zawierającego włókna funkcjonalne coolmax (D5-C), spowodowało w większości efekt obniżenia absorpcji pary wodnej w stosunku do pakietów z zastosowaniem jako łącznika dzianin o strukturze płaskiej i strukturze przestrzennej (Tab. 4). Zdolność materiałów do absorbowania pary wodnej ma szczególnie znaczenie przy projektowaniu układów obuwniczych, gdyż materiały pozostające w bezpośrednim sąsiedztwie stopy, powinny charakteryzować się jak najlepszą przepuszczalnością pary wodnej, przy minimalnym jej absorbowaniu. Taki układ zmniejsza prawdopodobieństwo „więzienia” wilgoci w układach materiałów, co stanowi bardzo ważny aspekt dla oceny higieniczności obuwia.

W celu zidentyfikowania różnic jakościowych pomiędzy uzyskanymi parametrami określającymi higieniczność pakietów materiałowych, przeprowadzono analizę statystyczną metodą ANOVA. Na poziomie ufności α równym 0,05 zweryfikowano hipotezę H_0 , mówiącą o braku zróżnicowania pomiędzy przepuszczalnością pary wodnej poszczególnych badanych układów materiałowych ze względu na rodzaj zastosowanej bariery, wobec alternatywnej H_1 , orzekającej o występowaniu takich różnic. Analizę przeprowadzono w dwóch grupach obejmujących dzianiny o strukturze płaskiej (P2 – P6) i przestrzennej (D1 – D4). Istnienie zróżnicowania międzygrupowego, spowodowanego rodzajem zastosowanej bariery zaobserwowano w każdej z badanych grup zarówno w odniesieniu do przepuszczalności pary wodnej (Tab. 5), jak i jej absorpcji (Tab. 6). Najsilniejsze statystycznie istotne różnice są widoczne dla absorpcji pary wodnej.

Tabela 5. Wyniki analizy ANOVA dla zróżnicowania przepuszczalności pary wodnej ze względu na rodzaj bariery w grupie płaskich i przestrzennych wyrobów włókienniczych

Grupa dzianin o strukturze płaskiej (P2 – P6)						
Źródło wariancji	SS	df	MS	F	p	Test F
<i>pomiędzy grupami</i>	75	2	37,5	4,62	0,03000	3,89
<i>w obrębie grup</i>	97	12	8,1			
<i>razem</i>	172	14				
Grupa dzianin o strukturze przestrzennej (D1-D4)						
<i>pomiędzy grupami</i>	114	2	57,1	36,11	0,00005	4,26
<i>w obrębie grup</i>	14	9	1,6			
<i>razem</i>	128	11				

SS – suma kwadratów odchyłeń od średniej, df – liczba stopni swobody,

MS – średni kwadrat, F – wartość statystyki empirycznej,

Test F – wartość statystyki krytycznej

Źródło: opracowanie własne.

Tabela 6. Wyniki analizy ANOVA dla zróżnicowania absorpcji pary wodnej ze względu na rodzaj bariery w grupie płaskich i przestrzennych wyrobów włókienniczych.

Grupa dzianin o strukturze płaskiej (P2– P6)						
Źródło wariancji	SS	df	MS	F	p-value	Test F
<i>pomiędzy grupami</i>	29912	3	9971,7	223,91	0,00002	3,24
<i>w obrębie grup</i>	712	16	45,5			
<i>razem</i>						
Grupa dzianin o strukturze przestrzennej (D1-D4)						
<i>pomiędzy grupami</i>	35042	3	11680,8	503,67	0,00007	3,49
<i>w obrębie grup</i>	278	12	23,2			
<i>razem</i>	35320	15				

- SS – suma kwadratów odchyłeń od średniej,
df – liczba stopni swobody,
MS – średni kwadrat,
F – wartość statystyki empirycznej,
p – wartość prawdopodobieństwa testowego,
Test F – wartość statystyki krytycznej

Źródło: opracowanie własne.

W zbadanych grupach wartość statystyki empirycznej (F) była wyższa od wartości krytycznej (Test F). Dodatkowo, oszacowane prawdopodobieństwo testowe plasuje się poniżej wartości przyjętej, jako poziom ufności. Oznacza to, że na zadanym poziomie ufności nie ma podstaw do przyjęcia hipotezy H_0 , orzekającej o braku zróżnicowania wartości przepuszczalności pary wodnej ze względu na rodzaj bariery (D1, D5-C, PU). W celu uzyskania jakościowej oceny istniejącego zróżnicowania, przeprowadzono test porównań wielokrotnych Tukey'a. W tabeli 7 zamieszczono wyniki testu post-hoc dla badanych układów materiałowych. Efektem wykonanego testu Tukey'a jest wskazanie grup materiałów, w których zróżnicowanie ze względu na rodzaj przegrody ma charakter istotny statystycznie. Wyniki otrzymane (Tab. 7) dla różnych materiałów łączących (D1, D5-C, PU) skonfigurowanych z materiałami o strukturze płaskiej (P2 – P6) jak i o strukturze przestrzennej (D1 – D4) wskazują, że różnice w wartościach przepuszczalności pary wodnej zależą od rodzaju materiału łączącego i są istotne statystycznie.

W przypadku płaskich materiałów włókienniczych (P2 – P6) istotne statystycznie zróżnicowanie przepuszczalności pary wodnej wystąpiło między grupami, w których jako warstwę łączącą zastosowano odpowiednio dzianinę z włókien funkcjonalnych coolmax (D5-C) lub piankę poliuretanową (PU). W przypadku dzianin o strukturze przestrzennej (D1 – D4), obie dzianiny dystansowe (D1, D5-C), stanowiące warstwę łączącą, uzyskały istotną przewagę nad pianką poliuretanową.

Tabela 7. Wyniki testu Tukey'a dla badanych grup materiałów zróżnicowanych ze względu na warstwę łączącą

Porównywane grupy materiałów ze względu na rodzaj bariery	HSD-F*	p	Istotność
test post – hoc dla absorpcji pary wodnej w grupie płaskich wyrobów włókienniczych			
(D1) z (D5-C)	0,568	0,0400	TAK
(D5-C) z (PU)	1,062	0,0005	TAK
test post – hoc dla przepuszczalności pary wodnej w grupie płaskich wyrobów włókienniczych			
(D5-C) z (PU)	5,438	0,0300	TAK
test post – hoc dla przepuszczalności pary wodnej w grupie przestrzennych wyrobów włókienniczych			
(D1) z (PU)	7,125	0,0001	TAK
(D5-C) z (PU)	5,738	0,0003	TAK

HSD-F* – wartość statystyki Tukey'a,

p – prawdopodobieństwo testowe

Źródło: opracowanie własne.

W odniesieniu do absorpcji pary wodnej (Tab. 7) zaobserwowano przewagę układów z dzianiną łączącą (D5-C) nad klasyczną dzianiną dystansową (D1) z włókien poliestru bez udziału włókien coolmax oraz nad pianką poliuretanową, które skonfigurowano z materiałami o strukturze płaskiej. Natomiast, w przypadku zastosowania tych materiałów łączących w konfiguracji z materiałami o strukturze przestrzennej różnice w absorpcji pary wodnej są nieistotne statystycznie.

Uzyskane wyniki absorpcji pary wodnej (Tab. 4) pozwalają stwierdzić, że wartości tego parametru mają przebieg bardziej korzystny z higienicznego punktu widzenia dla układów, w których zastosowano dzianinę dystansową z włókien coolmax D5-C. Widoczna poprawa właściwości higienicznych, świadczy o zasadności implementacji materiału z włókien funkcjonalnych coolmax.

4. Podsumowanie

Właściwości higieniczne materiałów i układów materiałowych, stosowanych w produkcji obuwia determinują komfort jego użytkowania. Ogólnie wiadomo, że właściwości higieniczne, liczba warstw oraz sposób konfiguracji poszczególnych materiałów obuwniczych wchodzących w skład cholewki, mają znaczący wpływ na procesy wymiany ciepła i wilgoci pomiędzy stopą a otoczeniem a konsekwencji na komfort użytkowania obuwia.

Wykonane badania wykazały, że zastosowanie dzianiny z włókien funkcjonalnych coolmax powoduje poprawę właściwości higienicznych badanych pakietów materiałowych pod względem zarówno przepuszczalności, jak i absorpcji pary wodnej. W stosunku do układów, w których materiałem łączącym jest przestrzenna dzianina dystansowa D1, zmiany poprawiające przepuszczalność pary wodnej, zaobserwowano dla następujących układów materiałowych: B1+D5-C+(P2, P4, P5, P6). Dzieje się tak, ponieważ połączenie warstwy (D5-C) bardzo dobrze przepuszczającej parę wodną z płaskim materiałem włókienniczym (P), powoduje pojawienie się dodatkowej przestrzeni przepływu pary wodnej, bez wydłużenia drogi transmisji, dzięki niewielkiej grubości uzyskanego pakietu. Ponadto, obecność przewężeń w przekroju włókien coolmax sprawia, że ilość przetransferowanej pary wodnej jest wyższa, aniżeli w przypadku standardowego włókna poliestrowego, które stanowiło budulec dzianiny D1. Porównując, obie dzianiny o strukturze przestrzennej – D1 i D5-C – można zauważyć, że ich obecność spowodowała istotną poprawę przepuszczalności pary wodnej w porównaniu z wariantem, w którym w roli warstwy łączącej zastosowano popularną, często wykorzystywaną w układach obuwniczych, piankę poliuretanową PU.

Zastosowanie dzianiny D5-C jako materiału łączącego powoduje, na ogół, redukcję ilości zaabsorbowanej pary wodnej w porównaniu do pakietów, w których materiałem łączącym jest dzianina D1 lub pianka PU.

Zredukowanie ilości absorpcji pary wodnej, przy jednoczesnym zwiększeniu jej przepuszczalności, sprawia, że walory higieniczne badanego układu materiałów ulegają poprawie i dzięki temu można prognozować skuteczność danej konfiguracji materiałów w redukowaniu dyskomfortu podczas użytkowania obuwia. Zastosowanie w bliskim sąsiedztwie stopy materiałów bardzo dobrze przepuszczających parę wodną, a przy tym hydrofobowych, powoduje, że w realnych warunkach użytkowania stopa pozostanie sucha, zaś materiał z nią sąsiadujący nie ulegnie zawilgoceniu.

Na podstawie otrzymanych wyników badań można stwierdzić, że parametry opisujące warunki wilgotności we wnętrzu obuwia zależą w głównej mierze od zdolności do przepuszczania i absorbowania pary wodnej materiałów obuwniczych znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie stopy. W związku z tym, zasadnym jest ukierunkowanie badań w taki sposób, aby rozszerzać gamę materiałów i sposobów ich konfiguracji w celu uzyskania oczekiwanych efektów poprawy parametrów higienicznych. Ma to szczególne znaczenie, np. dla obuwia zamkniętego typu kalosze, śniegowce, lub wellingtony, gdzie jedyna droga dyfuzji pary wodnej biegnie wzdłuż krzywizny kończyny okrytej cholewką, wyznaczonej od tylnej części łoża stopy do zakończenia cholewki.

5. Literatura

- [1] **Pinar A., Mielicka E.**, *Charakterystyka wyrobów w technologii seamless*, Przegląd Włókienniczy - Włókno, Odzież, Skóra 2010, nr 10, ss. 39 – 41.
- [2] **Irzmańska E.**, *Termiczny model stopy – próba aplikacji w badaniach obuwia ochronnego*, Pomiary Automatyka Kontrola 2012, vol. 58, nr 12, ss. 1076 – 1081.
- [3] **Irzmaska E., Brochocka A.**, *Wpływ właściwości fizykochemicznych kompozytowych wkładek do obuwia ochronnego na poprawę mikroklimatu*, Fibres and Textiles in Eastern Europe 2014, vol. 5 (107), ss. 89 – 95.
- [4] **Serweta W., Olejniczak Z., Matusiak M.**, *Improve of footwear comfort sensation with material packages and knitted fabrics*, Fibres and Textiles in Eastern Europe 2019, vol. 3 (135), ss. 85 – 90.
- [5] **Woźniak B.**, *Funkcjonalność dzianin w układzie stopa – obuwie oceniana na modelu sztucznej stopy z funkcją ruchu i wydzielania wilgoci*, Politechnika Łódzka, Łódź 2011
- [6] **Olejniczak Z.**, *Wpływ dzianin wielowarstwowych na mikroklimat w obuwiu*, Politechnika Łódzka, Łódź 2008
- [7] **Komarkowa P., Glombikowa V., Havelka A.**, *Head and moisture transport of socks*, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 254, 2017, ss. 1 - 6
- [8] **Onofrei E., Rocha A. M., Catarino A.**, *Investigating the effect of moisture on the thermal comfort properties of functional elastic fabrics*, Journal of Industrial Textiles 2012, vol. 42, nr 1, ss. 34 – 51
- [9] **Terliksiz S., Kalaoglu F., Eryuruk S.H.**, *Moisture transport properties of double jersey mattress ticking fabrics*, Journal of Textiles and Engineer 2012, vol. 19, nr 85, ss. 15 - 19
- [10] **Icin A.A., Kumaslar F.O.**, *Functional knitted fabrics for footwear linings*, Textil ve Konfeksiyon 2011, nr 1, ss. 30 - 35
- [11] **Siddique H. F., Mazari A., Tanveer M.**, *Sweat – management poroperties of semi bleached socks using different main yarn and plating yarn combinations*, Vlakna a Textil 2020, nr 1, ss. 69 - 75
- [12] **Blaga M., Marmarali A., Mihai A.**, *Functional knitted fabrics for footwear linings*, Tekstil ve Konfeksiyon 2011, nr 1, ss. 30-35.
- [13] PN-EN ISO 20344:2012. Środki ochrony indywidualnej. Metody badania obuwia. p. 6.6, 6.7.

ANALIZA PARAMETRÓW CHARAKTERYZUJĄCYCH STRUKTURĘ GEOMETRYCZNĄ POWIERZCHNI TKANIN

Gabriela Kosiuk, Małgorzata Matusiak

*Instytut Architektury Tekstyliów
Politechnika Łódzka*

1. Wstęp

Istnieje wiele cech, które charakteryzują jakość tkanin Żyliński [1] podzielił je na 3 zasadnicze grupy:

- cechy istotne z punktu widzenia możliwości sformatowaniażądanego wyrobu,
- cechy wpływające na właściwości użytkowe wytwarzanego wyrobu,
- cechy stanowiące o trwałości (czasie użytkowania) wyrobu.

W grupie cech stanowiących o trwałości materiałów i wyrobów włókienniczych Żyliński wymienia cechy powierzchniowe związane z odpornością tkanin na czynniki zewnętrzne. Tymczasem, z punktu widzenia jakości i funkcjonalności tkanin istotną rolę odgrywa topografia, czyli mikrostruktura geometryczna powierzchni.

W przypadku materiałów włókienniczych, w tym tkanin, jedynym parametrem, który wyznaczany jest w celu oceny jakości powierzchni tkanin jest chropowatość powierzchni. Jest to cecha powierzchni ciała stałego, oznaczająca rozpoznawalne optycznie, choć niekoniecznie gołym okiem, lub wyczuwalne mechanicznie nierówności powierzchni. Do pomiaru chropowatości powierzchni materiałów włókienniczych stosuje się najczęściej przyrząd KES – FB 4. Jest to moduł systemu KES (Kawabata Evaluation System) stosowanego do oceny parametrów chwytu materiałów włókienniczych [2,3].

Moduł pomiarowy KES – FB 4 przeznaczony jest do wyznaczenia właściwości powierzchniowych, takich jak: współczynnik tarcia statycznego, kinetycznego oraz chropowatości. Pomiar obu wielkości odbywa się jednocześnie w ramach jednego testu, przy czym oba parametry wyznaczane są osobno dla kierunku wzdłużnego i poprzecznego.

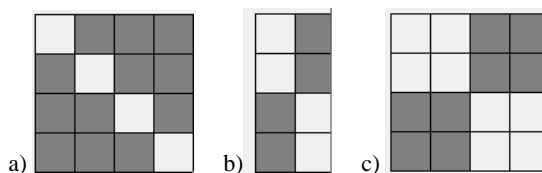
W inżynierii materiałowej do oceny jakości powierzchni materiałów stosuje się znacznie więcej parametrów, co pozwala na scharakteryzowanie powierzchni badanego materiału w sposób kompleksowy. Parametry te zostały opisane w odpowiedniej normie [4].

Celem prezentowanych badań była analiza parametrów charakteryzujących topografię powierzchni tkanin o zróżnicowanej strukturze. W ramach niniejszej pracy

przeprowadzono badania topografii powierzchni tkanin bawełnianych o różnych splotach: skośnym, rypsowym i panama. Pomiary topografii powierzchni wykonano za pomocą profilometru MicroSpy® Profile [5]. W oparciu o wyniki uzyskane za pomocą profilometru wyznaczono szereg parametrów charakteryzujących topografię powierzchni badanych tkanin.

2. Materiały i metody badawcze

Badaniom topografii powierzchni poddano 3 warianty wykończonych tkanin bawełnianych. Tkaniny te wykonane zostały na bazie jednej osnowy z przędzy bezwzrzcionowej o masie liniowej 50 tex. Jako wątek zastosowano przędzę bezwzrzcionową o masie liniowej 100 tex. Na rys. 1 przedstawiono rysunki splotów zastosowanych w badanych tkaninach.



Rys. 1. Rysunki splotów tkanin poddanych badaniom:
a) splot skośny 3/1S, b) ryps 1/1 (010), c) panama 2/2 (020)

Źródło: opracowanie własne.

W tabeli 1 przedstawiono podstawowe parametry strukturalne tkanin poddanych badaniom w zakresie parametrów struktury geometrycznej powierzchni.

Tabela 1. Podstawowe parametry tkanin bawełnianych poddanych badaniom w zakresie topografii powierzchni

Parametr	Jednostka	Wartość		
		Skośny	Ryps	Panama
Liczność osnowy	cm ⁻¹	31,7	31,7	31,6
Liczność wątku	cm ⁻¹	11,6	11,9	11,7
Masa powierzchniowa	g m ⁻²	292	284	287
Wrobienie osnowy	%	7,9	7,3	6,4
Wrobienie wątku	%	3,3	1,2	2,3

Źródło: opracowanie własne.

Badania wykonano za pomocą profilometru *MicroSpy® Profilometer* (rys. 2) firmy *FRT the art of technology™*.



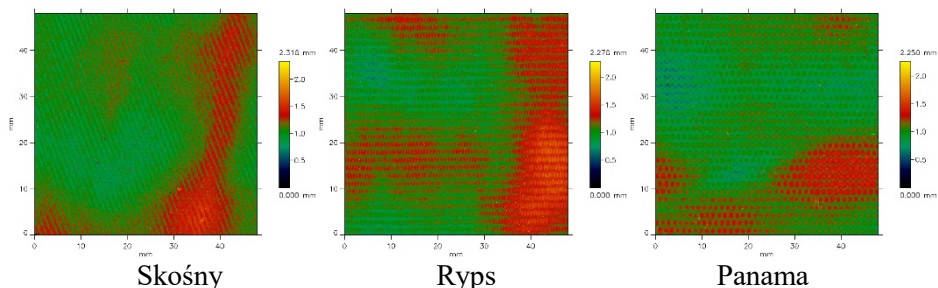
Rys. 2. Profilometr *MicroSpy®* firmy FRT

Źródło :*Operating Manual FRT MicroSpy® Profile.*

Dla każdego wariantu tkanin wykonano skanowanie 5 próbek. Powierzchnia skanowania wynosiła 5 cm x 5 cm. W oparciu o uzyskane wyniki skanowania przeanalizowano topografię powierzchni badanych tkanin stosując specjalistyczne oprogramowanie Mark III [6] współpracujące z profilometrem.

3. Wyniki badań

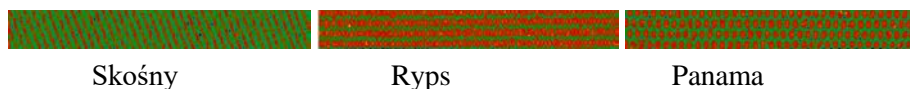
Rysunek 3 przedstawia przykładowe skany badanych tkanin uzyskane za pomocą profilometru *MicrSpy®*.



Rys. 3. Obrazy topografii powierzchni tkanin uzyskane za pomocą profilometru *MicroSpy®* firmy FRT

Źródło: *opracowanie własne.*

Obrazy tkanin zostały przetworzone w celu wyeliminowania efektu falistości. Przetworzone obrazy tkanin pokazano na rys. 4.

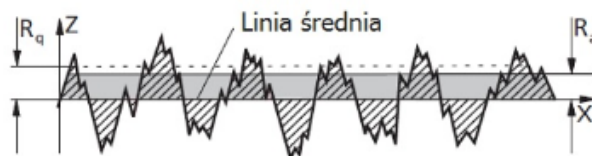


Rys. 4. Obrazy topografii powierzchni tkanin uzyskane za pomocą profilometru MicroSpy® firmy FRT po wyeliminowaniu efektu falistości

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie wyników z profilometru wyznaczono szereg wskaźników charakteryzujących geometryczną strukturę powierzchni tkanin, m.in., takich jak:

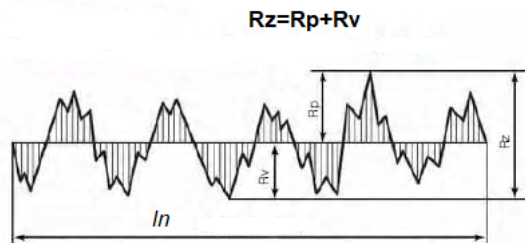
- R_a – średnia arytmetyczna rzędnych profilu chropowatości [7]; jest to wartość średnia arytmetyczna odchylenia powierzchni resztkowej w obrębie obszaru próbkowania (rys. 5),
- R_q – średnia kwadratowa rzędnych profilu chropowatości [7]; stanowi wartość średnią kwadratową odchylenia chropowatości powierzchni w obrębie obszaru próbkowania (rys. 5),



Rys. 5. Interpretacja parametrów R_a i R_q

Źródło: opracowanie własne na podstawie [8].

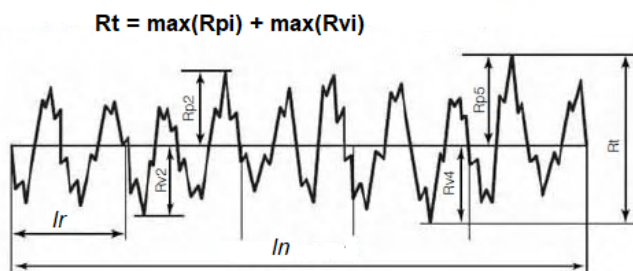
- R_z – najwyższa wysokość profilu chropowatości; jest to suma wysokości najwyższego wzniesienia profilu R_p i głębokości najniższego wgłębienia profilu R_v wewnątrz odcinka elementarnego (rys. 6).



Rys. 6. Interpretacja parametru R_z

Źródło: opracowanie własne na podstawie [8].

R_t – całkowita wysokość profilu. Suma wysokości najwyższego wzniesienia profilu R_p i największej głębokości wgłębienia profilu R_v wewnątrz odcinka pomiarowego l_n . Wartość najwyższa i najniższa mogą znajdować się więc w tych samych lub różnych odcinkach elementarnych (rys. 7).



Rys. 7. Interpretacja parametru R_t

Źródło: opracowanie własne na podstawie [8].

Wartości obliczonych parametrów powierzchni przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wartości parametrów charakteryzujących geometryczną strukturę powierzchni badanych tkanin

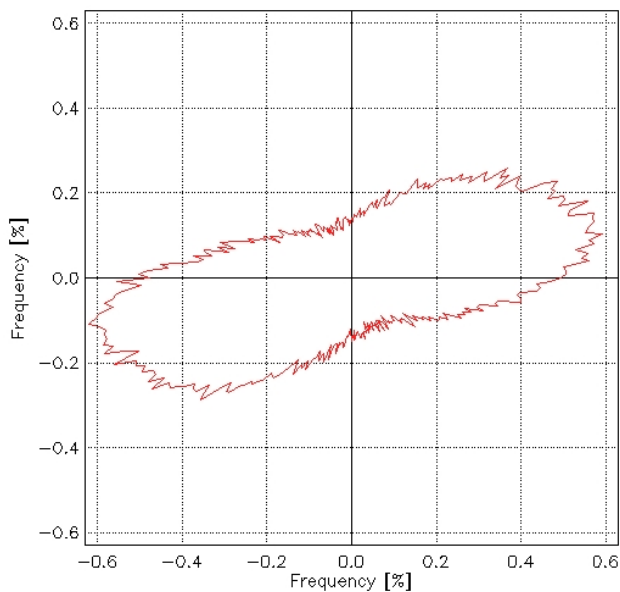
Parametr	Jednostka	Wartość		
		Splot skośny	Ryps	Panama
R_a	mm	0,033	0,026	0,028
R_q	mm	0,038	0,032	0,034
R_z	mm	0,250	0,281	0,284
R_t	mm	0,465	0,366	0,348

Źródło: opracowanie własne.

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że tkaniny o różnych splotach różnią się pod względem wartości ww. parametrów charakteryzujących strukturę geometryczną powierzchni. Najwyższe wartości parametrów R_a , R_q i R_z odnotowano dla tkaniny o splotcie skośnym 3/1 S, najniższe – dla tkanin o splotcie panama. W przypadku parametru R_t relacja jest odwrotna. Tkanina o splotcie rypсовym charakteryzuje się pośrednimi wartościami wszystkich ww. parametrów.

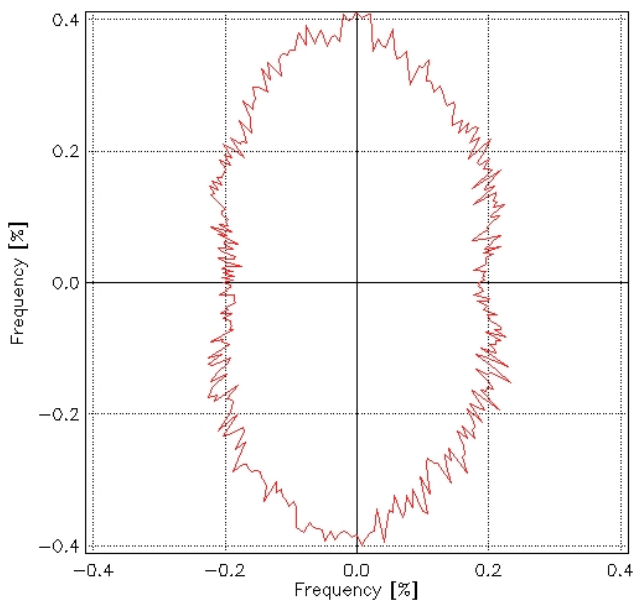
Przeanalizowano również rozkład kątów na powierzchni badanych tkanin. Rozkład kątów określa kierunki nachyleń powierzchni badanych tkanin. Te kierunki są pokazane na wykresie $R-\varphi$ (współrzędne biegunowe). Kąt φ opisuje kierunek

normalny do powierzchni i jest zdefiniowany przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, zaczynając od dodatniej osi x (rys. 8 – 10).



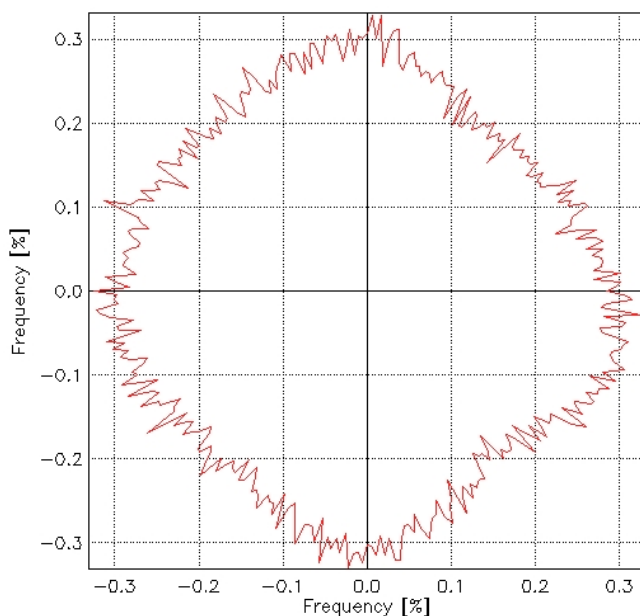
Rys. 8. Rozkład kątów nachyleń powierzchni dla tkaniny o splocie skośnym

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 9. Rozkład kątów nachyleń powierzchni dla tkaniny o splocie rypsowym

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 10. Rozkład kątów nachyleń powierzchni dla tkaniny o splotcie panama

Źródło: opracowanie własne.

Promień R opisuje częstotliwość (w procentach) krawędzi w kierunku φ . Wykresy rozkładu kątów dla badanych tkanin wykazały, że najbardziej równomierny rozkład nachylenia powierzchni w zależności od kierunku występuje dla tkaniny o splotcie panama (rys. 10).

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdziły, że istnieje możliwość kompleksowej analizy topografii powierzchni tkanin w oparciu o wyniki uzyskiwane za pomocą profilometru MicroSpy[®] firmy FRT. Oprogramowanie współpracujące z profilometrem umożliwia obliczenie szeregu wskaźników charakteryzujących chropowatość powierzchni tkanin. Uzyskane wyniki wykazały, że badane tkaniny bawełniane o różnych splotach charakteryzują się różnymi wartościami parametrów chropowatości. Stwierdzono także różny rozkład kątów nachylenia powierzchni tkanin w zależności od splotu.

Literatura

- [1] **Żyliński T.**, *Metrologia włókiennicza III*, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1969.
- [2] **Krucińska I., Konecki W., Michalak M.**, *Systemy pomiarowe we włókiennictwie*, Wydawnictwa Politechniki Łódzkiej, Łódź 2006.
- [3] **Behery H.M.**, *Effect of mechanical and physical properties on fabric hand*, The Textile Institute; Woodhead Publishing Limited, Cambridge 2005.
- [4] PN-EN ISO 4287:1999/A1:2010. Specyfikacje geometrii wyrobów - Struktura geometryczna powierzchni: metoda profilowa - Terminy, definicje i parametry struktury geometrycznej powierzchni.
- [5] FRT the art of technology™, *Operating Manual FRT MicroSpy® Profile*, Version 2.104, Bergisch Gladbach 2016.
- [6] FRT the art of technology™, *Manual Mark III*, Version 3.11 R2T1, Bergisch Gladbach 2018.
- [7] Biuro Naukowo-Techniczne SIGMA, *Pomiar chropowatości powierzchni*, online, <https://www.bnt-sigma.pl/pomiar-chropowatosci-powierzchni>, [dostęp: 22.04.2020]
- [8] Keyence, *Surface Roughness Parameters*, online, <https://www.keyence.com>, [dostęp: 22.04.2020]
- [9] **Wieczorowski M.**, *Trójwymiarowa analiza nierówności powierzchni*, online, https://www.ita-polska.com.pl/article_bw/83/trojwymiarowa-analiza-nierownosci-powierzchni, [dostęp: 22.04.2020]

WPLYW PRZEPUSZCZALNOŚCI POWIETRZA TKANINY POKRYCIA NA ROZKŁAD CIŚNIENIA W SKRZYDLE PARALOTNI

Paulina Maślanka

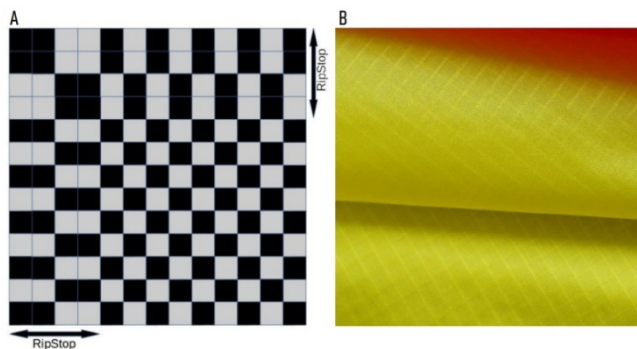
*Katedra Inżynierii Mechanicznej, Informatyki Technicznej i Chemii
Materiałów Polimerowych; Interdyscyplinarna Szkoła Doktorska,
Politechnika Łódzka*

1. Wstęp

Płat nośny paralotni w całości pokryty jest tkaniną, bez usztywnień konstrukcji. Lot następuje dzięki nadciśnieniu w profilu skrzydła o kształcie aerodynamicznym i powietrzu dostającemu się przez wloty na krawędzi natarcia. Stabilność i bezpieczeństwo lotu zapewniają określone własności materiałów pokrycia: niska masa powierzchniowa, duża wytrzymałość, odporność na odkształcenia, minimalna przepuszczalność powietrza. Podstawowy parametr materiałowy to przepuszczalność powietrza, co zapewnia zadowalające charakterystyki podczas lotu. Obliczenia numeryczne zostały wykonane metodą objętości skończonych. Analiza zagadnienia wymagała skorelowania problematyki włókienniczej z aerodynamiczną.

2. Właściwości materiałów oraz ich dobór do dalszej analizy

Materiały pokrycia skrzydła paralotni muszą spełniać pewne wymagania. Podstawowe to minimalna przepuszczalność powietrza, duża wytrzymałość, lekkość, odporność na promieniowanie UV i znaczna sztywność. Tkaniny wykonane są z Nylonu (PA 6.6). Dziesięciofilamentowe nitki o masie 3.3 *dtex* przeplatane są według schematu płóciennego, wykorzystując technikę wzmocnienia *Rip-Stop* (rys. 1a); na 1 m szerokości tkaniny przypada 6500-7000 nitek osnowy [6], co zapewnia dużą wytrzymałość przy zachowaniu małej masy powierzchniowej.



Rys. 1. Uproszczonego schemat splotu tkaniny stosowanej do produkcji skrzydła paralotni – A, przykład tkaniny stosowanej do produkcji skrzydła paralotni – B.

Źródło: opracowanie własne.

Stosowane jest również pokrycie materiału impregnatem, który zmniejsza przepuszczalność powietrza. Warstwa apretury jest równomierna a jej masa powierzchniowa nie przekracza $10g/m^2$ (w zależności od modelu tkaniny grubość może być niższa) [6]. Główny składnik mieszanek impregnatów to żywice poliuretanowe. Możliwe jest stosowanie różnych proporcji izocyjanów z poliolami oraz innych, dodatkowych składników, w zależności od wymagań stawianych gotowemu produktowi (np. różna sztywność) [5]. Dokładne składy i proporcje mieszanek w apreturze nie są podawane przez producentów.

Przeanalizowano trzy tkaniny o różnych wartościach przepuszczalności powietrza (tab. 1). Materiał o minimalnej przepuszczalności powietrza jest stosowany obecnie, dwa kolejne to materiał używany ponad 20 lat temu i poddany degradacji hydrolityczno-mechanicznej.

Tabela 1. Wybrane parametry tkanin wyselekcjonowanych do dalszej analizy

Tkanina	Przepuszczalność powietrza $\left[\frac{1}{m^2 \cdot min}\right]$ pod ciśnieniem 2000 Pa	Masa powierzchniowa [g/m ²]	Zapełnienie nitkami (w obu kierunkach) [l. nitek/cm]
SKYTEX 27 CLASSIC 2	3	29	70
PORCHER MARINE 9017 PU E38A	40	40	60
SKYTEX 36 po degradacji hydrolityczno-mechanicznej	200	34	65

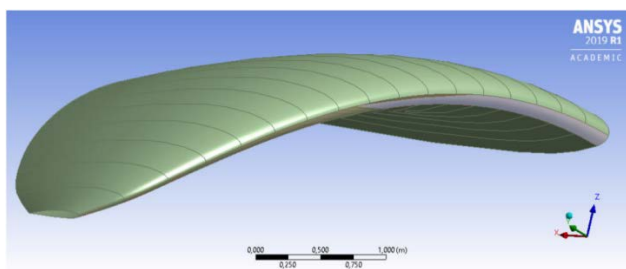
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z porcher.eu

Przedstawiono także model opływu paralotni pokrytej materiałem teoretycznym, o zerowej przepuszczalności powietrza. Wyniki tego przypadku mogą być

referencyjne i ułatwić ocenę charakterystyk aerodynamicznych pozostałych przypadków [4].

5. Przygotowanie geometrii oraz siatki obliczeniowej

Producenci nie podają pełnych danych obecnie produkowanych skrzydeł. Użytkownik może znaleźć informacje dotyczące jedynie powierzchni skrzydła, jego rozpiętości, czy promienia ugięcia parolotni napełnionej powietrzem. Stąd samodzielnie zwymiarowano profil lotniczy i dodatkowe parametry obrysu. Na podstawie zebranych wymiarów napisano prosty program w środowisku *Matlab*, który generuje współrzędne punktów bazowych geometrii skrzydła (modelowano jedynie połowę skrzydła). Wprowadzenie współrzędnych do programu *ANSYS Design Modeler* i przeprowadzenie przez nie powierzchni za pomocą narzędzia *skin/loft*, pozwoliło na odtworzenie przestrzennej geometrii skrzydła (rys. 2). Dla umożliwienia zastosowania narzędzia *Porous Media* (używanego dla obiektów o zadanej przepuszczalności powietrza [1]), przyjęto grubość ścianek większą od faktycznej ($g=2\text{ mm}$).



Rys. 2. Geometria połowy parolotni, bazująca na wymiarach rzeczywistego modelu.

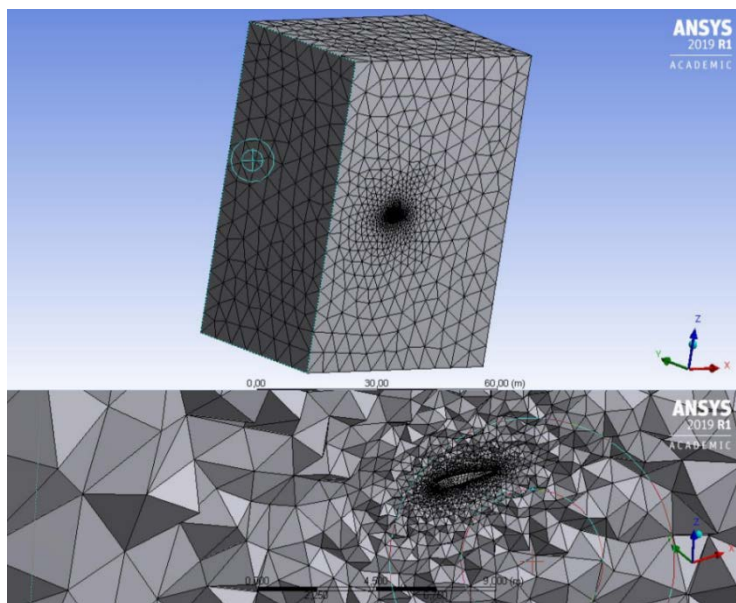
Źródło: opracowanie własne.

Wokół skrzydła utworzono obszar obliczeniowy w kształcie prostopadłościanu, o wymiarach znacznie większych niż wymiary parolotni. Jedną z powierzchni tworzących prostopadłościan przechodziła przez największy profil lotniczy (płaszczyznę symetrii), gdzie przyjęto warunek brzegowy *Symmetry*. Pozostałym ściankom prostopadłościanu, położonym w dużej odległości od obiektu i stanowiącym granice obszaru obliczeniowego, nadano warunek *Pressure-far-field*, określający przepływ niezaburzony, tj. prędkość powietrza, temperaturę, ciśnienie etc.

Ściankom tworzącym powierzchnie skrzydła parolotni nadano warunek brzegowy *Interior*, co umożliwiło zastosowanie narzędzia *Porous Media*. Przypadek parolotni pokrytej materiałem nieprzepuszczającym powietrza został rozwiązany z warunkiem brzegowym *wall*; wiązało się to również z implementacją mniej skomplikowanej geometrii (ścianki parolotni o pomijalnie małej grubości, dążącej do zera).

Po określeniu warunków brzegowych rozpoczęto tworzenie siatki obliczeniowej objętości skończonych. Zastosowano następujące narzędzia programu ANSYS Meshing [2]:

- *Sweep Method* – tworzenie siatek strukturalnych (komórki sześciennie/pryzmatyczne); zastosowanie dla obiektów ekstrudowanych, w tym przypadku paralotnia i jej wnętrze.
- *Edge Sizing* – określanie ilości węzłów na krawędziach (stosując tę metodę podzielone zostały: krawędzie tworzące górny i dolny obrys profilu lotniczego oraz nadające grubości ścianek paralotni).
- *Face Sizing* – określenie wymiarów elementów na wskazanych powierzchniach (w tym wypadku komórki wewnątrz skrzydła, w jego płaszczyźnie symetrii).
- *Tetrahedrons Patch Conforming Method* – tworzenie siatki niestructuralnej (zbudowanej z elementów czworościennych), co zastosowano dla otoczenia skrzydła.



Rys. 3. Siatka obliczeniowa objętości skończonych, wygenerowana w programie ANSYS Meshing.

Źródło: opracowanie własne.

Następnie wygenerowano siatkę charakteryzującą się bardzo małymi elementami wewnątrz i w pobliżu badanego obiektu. Udało się wykorzystać elementy strukturalne (sześciennie i pryzmatyczne) do dyskretyzacji ścianek i wnętrza paralotni. Komórki takie zapewniają lepszą stabilność i dokładność obliczeń numerycznych. Budowa w pełni strukturalnej siatki obliczeniowej jest nieefektywna, stąd obszar wokół

paralotni dyskretyzowano elementami czworobocianowymi. Siatka (rys. 3) zbudowana była z 474 264 komórek oraz charakteryzowała się dobrą jakością (bazując na parametrach Orthogonal Quality = 0.76 oraz Skewness = 0.25).

Rozwiązanie problemu

Po wygenerowaniu siatki obliczeniowej możliwy był jej eksport do programu ANSYS Fluent i obliczenia numeryczne. Dla ich przeprowadzenia należy określić modele fizyczne i warunki opływu skrzydła. Przyjęto przepływ jako turbulentny i został dla niego wybrany model turbulencji Spalart-Allmaras, dający spodziewane pole parametrów powietrza. Obszarowi otaczającemu obiekt został nadany model powietrze → gaz idealny.

Dla przyjętego warunku brzegowego Pressure-far-field, na wskazanych powierzchniach ograniczających obszar obliczeniowy, wprowadzono następujące parametry przepływu niezaburzonego: prędkość 45 km/h; kąt natarcia 60; ciśnienie 101325 Pa; temperatura 27°C.

Dla elementów ścianki paralotni zastosowano model Porous Media, czyli modelowanie przepływu przez obiekty przepuszczające powietrze. Pozwala to określić parametry związane z przepuszczalnością powietrza (tab. 2).

Tabela 2. Wartości parametru *Porous Resistance* ($1/\alpha$) dla odpowiadających mu materiałów

Tkanina	Przepuszczalność powietrza $\left[\frac{1}{\text{m}^2 \cdot \text{min}}\right]$	v [m/s]	$1/\alpha$ [$1/\text{m}^2$]
SKYTEX 27 CLASSIC 2 [X]	3	0,00005	$1.118 \cdot 10^{15}$
PORCHER MARINE 9017 PU E38A [X]	40	0,00067	$8.385 \cdot 10^{13}$
SKYTEX 36 [X] po degradacji hydrolityczno-mechanicznej	200	0,00333	$1.677 \cdot 10^{13}$

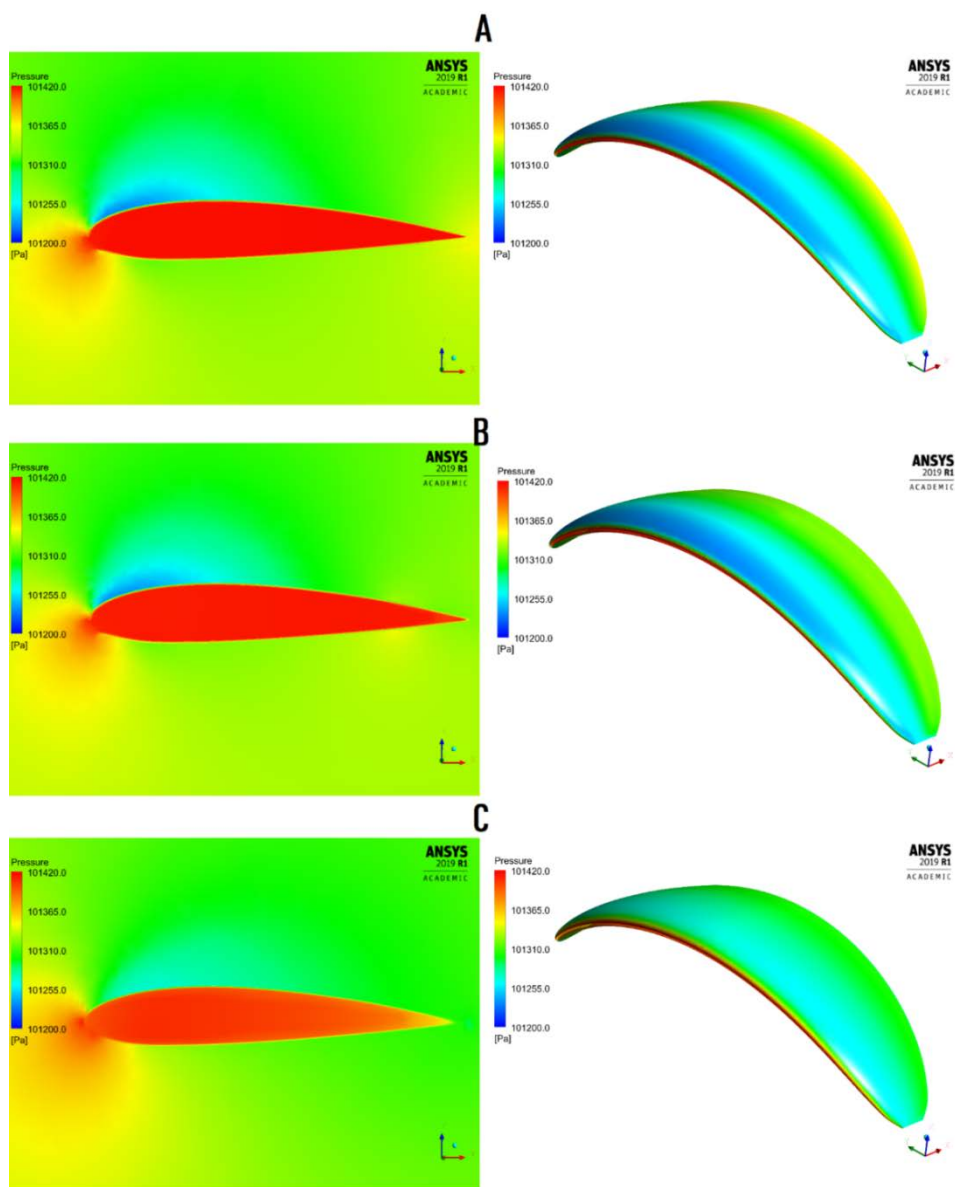
Źródło: opracowanie własne.

Po zdefiniowaniu modeli fizycznych rozpoczęto obliczenia. Dla stabilizacji analizy zaczęto od zadania małej wartości liczby Couranta (równiej 2). Gdy zauważono tendencję do stabilizacji, liczbę Couranta można było stopniowo zwiększać (na końcu była równa 10).

Obliczenia opływu skrzydła wykonanego z materiałów przepuszczalnych wymagały około 1000-1500 iteracji. Dla przypadku referencyjnego (pokrycie materiałem nieprzepuszczającym powietrza), było to 800 iteracji. Różnica wynikała z różnych warunków brzegowych i użycia bardziej skomplikowanej siatki dla przypadków, gdzie zastosowano model *Porous Media*.

6. Omówienie wyników

Uzyskane wyniki przedstawiono na rys. 4, 5 oraz w tabeli 3. Najlepsze charakterystyki aerodynamiczne prezentował przypadek referencyjny (materiał nieprzepuszczalny). Niewiele gorsze właściwości aerodynamiczne prezentowała paralotnia pokryta tkaniną SKYTEX 27 CLASSIC 2. Średnie ciśnienie wewnątrz skrzydła wynosiło $p=101415,80$ Pa; doskonałość aerodynamiczna 12.7708 była mniejsza o 0.398 niż dla przypadku referencyjnego. Paralotnia pokryta tkaniną PORCHER MARINE 9017 PU E38A (używana ponad 20 lat temu), prezentowała znacznie gorsze charakterystyki. Jej doskonałość aerodynamiczna była o 1.54 niższa, niż doskonałość skrzydła pokrytego materiałem nieprzepuszczającym powietrza. Jednak dla tych przypadków lot byłby stabilny i bezpieczny (rys. 5a-b). Stwierdzono występowanie znacznych spadków ciśnienia nad skrzydłem, co sprzyja wytwarzaniu siły nośnej. Ponadto średnie wartości ciśnienia wewnątrz omawianych paralotni znacznie przekraczały wartość ciśnienia atmosferycznego, a ich rozkłady były bardzo równomierne. Paralotnie pokryte takimi materiałami są w stanie utrzymać zaprojektowany kształt nawet przy małych podmuchach.



Rys. 4. – Otrzymane wyniki wizualne: A – skrzydło pokryte materiałem SKYTEX 27 CLASSIC 2; B – skrzydło pokryte materiałem PORCHER MARINE 9017 PU E38A, C – skrzydło pokryte materiałem SKYTEX 36 po degradacji hydrolityczno-mechanicznej.

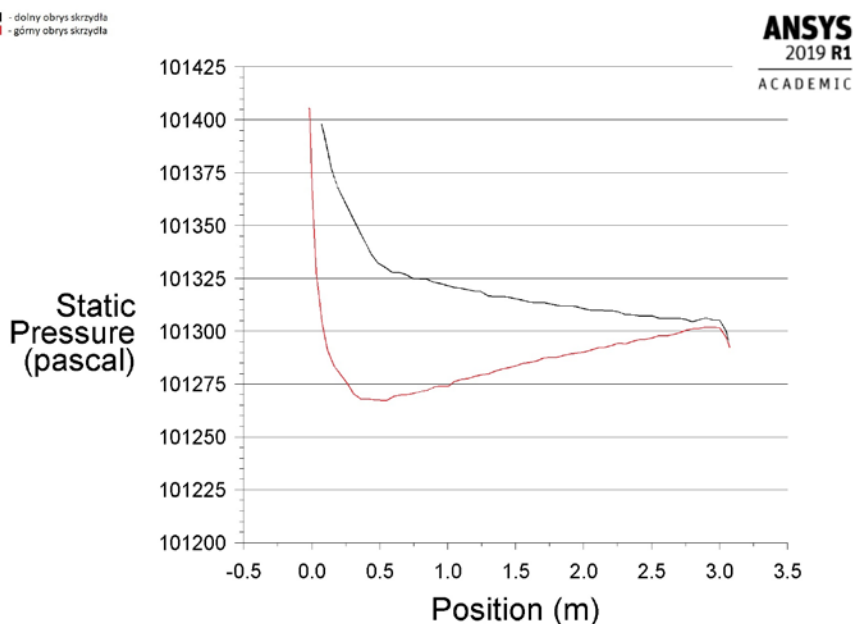
Źródło: opracowanie własne

Tabela 3. Wartości liczbowe uzyskane w trakcie obliczeń numerycznych

PARAMETER	Materiał nieprzepuszczający powietrza	SKYTEX 27 CLASSIC 2	PORCHER MARINE 9017 PU E38A	SKYTEX 36 po degradacji hydrolityczno-mechanicznej
Średnie ciśnienie wewnątrz skrzydła paralotni	101415,83 Pa	101415,80 Pa	101412,6 Pa	101398,35 Pa
Masowe natężenie przepływu przez ścianki paralotni	0 kg/s	0,1280 kg/s	1,435 kg/s	5,8542 kg/s
Siła nośna	1101,96 N	1093,99 N	1085,883 N	812,2437 N
Siła oporu	83,6805 N	85,6634 N	93,4068 N	199,7884 N
Doskonałość aerodynamiczna	13,1687	12,7708	11,6253	4,0655

Źródło: opracowanie własne

Lot z użyciem skrzydła pokrytego tkaniną SKYTEX 36, po degradacji hydrolityczno-mechanicznej, byłby prawdopodobnie niemożliwy. Na podstawie rysunku 4c zauważono, że bardzo wysoka wartość ciśnienia po zewnętrznej stronie krawędzi natarcia zakłóciłaby proces tworzenia nadciśnienia wewnątrz skrzydła. Dla weryfikacji, porównano wyniki z wykresu rozkładu ciśnienia na górnej i dolnej powierzchni skrzydła (rys. 5), z wartościami z tabeli 3. Według wykresu, wzrost ciśnienia na nosku wynosi około $101405 Pa$, zaś średnie ciśnienie wewnątrz skrzydła w tym przypadku jest $101398,35 Pa$ (patrz rys. 4c). Ciśnienie wewnątrz skrzydła było bardzo nierównomiernie rozłożone (rys. 4c); gdyby nawet paralotnia wzbijała się w powietrze, lot byłby skrajnie niebezpieczny a słaby wiatr zaburzyłby kształt aerodynamiczny.



Rys. 5. Wartości ciśnienia na górnej oraz dolnej powierzchni skrzydła, względem odległości od krawędzi natarcia

Źródło: opracowanie własne

7. Wnioski

Osiągi skrzydła pokrytego stosowanymi obecnie tkaninami impregnowanymi są nieznacznie gorsze od charakterystyk aerodynamicznych przypadku referencyjnego (materiał nieprzepuszczalny), natomiast paralotnia wykonana z materiału stosowanego w paralotniarstwie ok. 20 lat temu prezentuje już zauważalnie gorsze charakterystyki. Oznacza to, że nastąpił znaczący postęp w technologii produkcji i obróbki wykańczającej tkanin paralotni, mierzony znacznym wzrostem nieprzepuszczalności powietrza.

Bazując na wynikach dotyczących skrzydła pokrytego tkaniną poddaną degradacji można zauważyć, że starzenie się materiału ma wpływ na znaczące pogorszenie charakterystyk aerodynamicznych paralotni. Dlatego potencjalnymi szansami na poprawę właściwości tkanin paralotniowych będzie dążenie do zminimalizowania degradacji apretury/tkaniny w czasie eksploatacji.

Pożądane będzie także obniżenie masy powierzchniowej tkanin, co jest przydatne np. w para-alpinizmie (odmiana paralotniarstwa, w której użytkownik wspina się, a następnie dokonuje startu ze szczytów gór [3]). Nie może to odbyć się kosztem pogorszenia innych parametrów tkaniny (takich jak wytrzymałość, przepuszczalność powietrza), dlatego jest to ważne wyzwanie dla inżynierów włókiennictwa.

Literatura

- [1] ANSYS, Inc, *ANSYS FLUENT User's Guide*, Canonsburg 2010.
- [2] ANSYS, Inc., *Introduction to ANSYS Meshing*, Canonsburg 2010.
- [3] **Dudek P., Włodarczak Z.**, *Paralotniarstwo*, Arete 2013.
- [4] **Maślanka P., Korycki R.**, *Textile Cover Effect on Aerodynamic Characteristics of a Paraglider Wing*, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe 2019, vol. 1, nr 133, ss. 78-83
- [5] **Menachem L.**, *Handbook of Fiber Chemistry*, International Fiber Science and Technology Series, 2006
- [6] Porcher Industries, *Porcher Industries develops cellulosic fibre reinforcements for composites*, Additives for Polymers 2011, vol. 2011, Issue 12, pp. 5-6.

WPLYW SPLOTU NA TRANSPORT WILGOCI W TKANINACH BAWELNIANYCH

*Dominika Kamińska
Małgorzata Matusiak*

*Instytut Architektury Tekstyliów
Politechnika Łódzka*

1. Wstęp

Bawełna jest obecnie najczęściej stosowanym surowcem pochodzenia naturalnego w produkcji odzieży. Coraz częściej, oprócz tradycyjnej, konwencjonalnej bawełny, producenci odzieży wykorzystują bawełnę organiczną. Krzewy bawełny uprawiane są na wszystkich kontynentach, z wyjątkiem Antarktydy. Ze względu na swoje bardzo dobre właściwości higroskopijne, surowiec ten stosowany jest również w produkcji bielizny, bandaży, itp.

Transport wilgoci w postaci pływu odgrywa bardzo ważną rolę w kształtowaniu się komfortu fizjologicznego, który jest podstawową cechą w użytkowaniu odzieży. Utrzymanie komfortu jest niezwykle istotne szczególnie zimą, kiedy liczba warstw odzieży jest większa niż jeden. Przy dużym wysiłku fizycznym ciało poci się intensywnie, co w rezultacie powoduje, że warstwa, która znajduje się najbliżej ciała, staje się mokra i nieprzyjemna w dotyku. Materiał zaczyna przywierać do ciała, a po pewnym czasie, oprócz tego, że jest mokry, to staje się zimny.

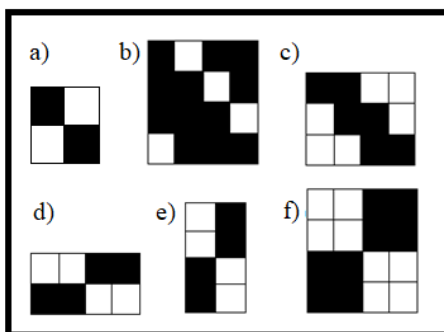
W takich warunkach, organizm może się łatwo wychłodzić, a pozostawanie w mokrej odzieży przez dłuższy czas może skutkować przeziębieniem lub innymi problemami zdrowotnymi. Ważne jest, aby skóra pod ubraniem była sucha, a wilgoć w łatwy sposób była odprowadzana na zewnątrz^{1,2}. Dlatego producenci odzieży, szczególnie sportowej, starają się, aby użytkownik czuł się komfortowo i nie był narażony na pogorszenie swojego stanu zdrowia. Z punktu widzenia komfortu fizjologicznego zdolność do zarządzania wilgocią przez tkaniny przeznaczone na odzież jest bardzo ważna³.

Celem przedstawionych badań była analiza właściwości transportu płynnej wilgoci w tkaninach o różnych splotach. Przeprowadzone badania pozwoliły ocenić poszczególne tkaniny pod kątem ich zdolności do zapewnienia komfortu fizjologicznego.

2. Materiały i metody badawcze

W ramach niniejszej pracy badaniom poddano 6 wariantów tkanin bawełnianych o różnych splotach (płócienny, skośny 3/1 S, skośny 2/2 S, ryps podłużny 2/2, ryps

poprzeczny 1/1, panama 2/2) w zakresie ich zdolności do transportu wilgoci w postaci płynnej. Wszystkie warianty tkanin zostały wyprodukowane na bazie tych samych przędz: osnowa – 50 tex i wątek – 100 tex.



Rys. 1. Rysunki raportów splotów badanych tkanin: a) płócienny, b) skośny 3/1 S, c) skośny 2/2 S, d) ryps podłużny 2/2, e) ryps poprzeczny 1/1, f) panama 2/2

*Źródło: opracowanie własne na podstawie: Szosland J.,
Struktury tkaninowe, Polska Akademia Nauk, Łódź 2007⁴*

Badanie transportu wilgoci przez tkaniny zostało wykonane za pomocą przyrządu Moisture Management Tester m290 firmy SDL Atlas⁵. Przyrząd ten służy do oceny transportu wilgoci w postaci płynnej przez materiały włókiennicze. Próbka jest umieszczana poziomo w instrumencie między górnym i dolnym czujnikiem. Roztwór symulujący pot jest upuszczany na środek górnej powierzchni (strona skóry) badanej próbki. Gdy roztwór przechodzi przez próbkę, mierzone i rejestrowane są zmiany rezystancji elektrycznej.

Na podstawie wartości mierzonych parametrów przyrząd MMT klasyfikuje badane tkaniny do jednej z 7 klas:

- wodoodporna – która powstała z włókien wodoodpornych,
- wodoodporna – która powstała w wyniku operacji wykańczalniczych, poprzez nadanie jej właściwości wodoodpornych,
- wolno absorbująca i wolno schnąca,
- szybko absorbująca i wolno schnąca,
- szybko absorbująca i szybko schnąca,
- tkanina penetrowana przez wodę,
- tkanina posiadająca zdolność zarządzania wilgocią.

Uzyskane wyniki

Wyniki uzyskane za pomocą przyrządu MMT przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki badań tkanin za pomocą przyrządu Moisture Management Tester

Splot	WTT	WTB	ART	ARB	MRT	MRB	SST	SSB	R	OMMC
	s	s	%/s	%/s	mm	mm	mm/s	mm/s	%	-
Płócienny	11,58	5,82	23,70	37,53	22,5	24	1,57	1,83	88,91	0,30
Skośny 3/1 S	3,69	3,88	65,13	58,09	20	20	3,80	3,76	-73,33	0,36
Skośny 2/2 S	3,66	3,69	58,99	55,46	20	20	3,87	3,64	15,19	0,42
Ryps podł. 2/2	3,21	3,17	49,57	49,72	20,5	20	4,16	4,07	20,09	0,44
Ryps pop. 1/1	4,68	4,75	70,14	65,34	20	20	3,39	3,22	23,78	0,42
Panama 2/2	3,40	3,39	53,74	54,18	20	20	3,98	3,90	57,04	0,48

Źródło: opracowanie własne.

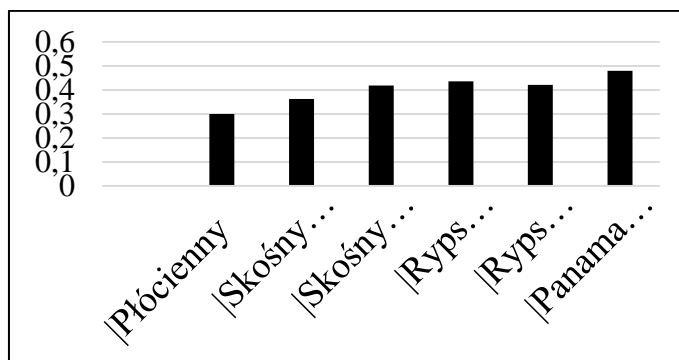
Legenda:

- czas zwilżania dla górnej i dolnej powierzchni: **WTT, WTB [s]**,
- wskaźnik absorpcji dla powierzchni górnej i dolnej: **ART, ARB [%/s]**,
- maksymalny promień zwilżania dla górnej i dolnej powierzchni **MRT, MRB [mm]**,
- prędkość rozprzestrzeniania się wilgoci dla górnej i dolnej powierzchni: **SST, SSB [mm/s]**,
- skumulowana jednostronna zdolność transportu wilgoci **R [%]**,
- całkowita zdolność zarządzania wilgocią **OMMC [-]**.

Na podstawie uzyskanych wyników badań stwierdzono że tkaniny charakteryzują się zróżnicowanymi wartościami poszczególnych parametrów charakteryzujących transport wilgoci.

Na rys. 2 przedstawiono wartość wskaźnika OMMC charakteryzującego całkowitą zdolność wilgoci badanych tkanin. Wskaźnik ten obliczany jest na podstawie innych parametrów z przyrządu MMT zgodnie z odpowiednim algorytmem, a jego wielkość mieści się w przedziale od 0 do 1. Klasyfikacja zdolności tkanin do zarządzania wilgocią (OMMC) jest następująca:

- 0 – 0,2 – bardzo słaba,
- 0,2 – 0,4 – słaba,
- 0,4 – 0,6 – dobra,
- 0,6 – 0,8 – bardzo dobra,
- 0,8 – 1,0 – doskonała⁶.



Rys. 2. Całkowita zdolność zarządzania wilgocią (OMMC) badanych tkanin.

Źródło: opracowanie własne

Całkowita zdolność zarządzania wilgocią dla wszystkich tkanin została oceniona między słabą a dobrą. Najlepsza zdolność do zarządzania wilgocią występowała w tkaninie o splocie panama 2/2, najgorsza zaś w tkaninie o splocie płóciennym. Wyniki potwierdziły, że splot ma istotny wpływ na przenoszenie wilgoci w postaci płynnej.

3. Podsumowanie

Badania wykazały, że tkanina o splocie płóciennym charakteryzuje się najslabszą zdolnością do transportu płynnej wilgocią spośród badanych tkanin. Może to wynikać z faktu, że struktura tkanina jest bardzo zwarta. Najlepsze parametry uzyskano dla splotu panama 2/2. Pozostałe tkaniny osiągnęły zbliżone wyniki. Badania wykazały, że tkaniny bawełniane nadają się na odzież. Jednakże zdolność tych tkanin do transportu wilgoci osiągnęła niższe wyniki, niż oczekiwano.

Literatura

- [1] **Matusiak M.**, *Ciepłochronność tkanin odzieżowych*, Monografia, Instytut Włókiennictwa, Łódź 2011
- [2] **Dominiak J., Frydrych I.**, *Comfort – Related Properties of Clothing Packages with Adhesive Inserts*, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2013, vol. 21, nr 1(97), ss. 83-86.
- [3] **Chinta S.K., Gujar P.D.**, *Significance of Moisture Management in Textiles*, *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology* 2013, vol. 2, nr 6, ss. 2104-2114.
- [4] **Szosland J.**, *Struktury tkaninowe*, Polska Akademia Nauk, Łódź 2007

- [5] SDL Atlas Ltd., *M290 MMT Moisture Management Tester Instruction Manual, Instrukcja przyrządu MMT 290*, online, <https://sdlatlas.com/products/mmt-moisture-management-tester>, [dostęp: 23.11.2022]
- [6] **Matusiak M.**, *Moisture Management Properties of Seersucker Woven Fabrics of Different Structure*, *Fibres & Textiles in Eastern Europe* 2019, vol. 27, nr 3(135), ss. 43-50

TEKSTYLNE OSŁONY BALISTYCZNE ZE STRUKTURĄ HAFTOWANĄ

Maciej Gloger, Zbigniew Stempień, Justyna Pinkos

Instytut Architektury Tekstyliów

Politechnika Łódzka, Żeromskiego 116, 90-924 Łódź

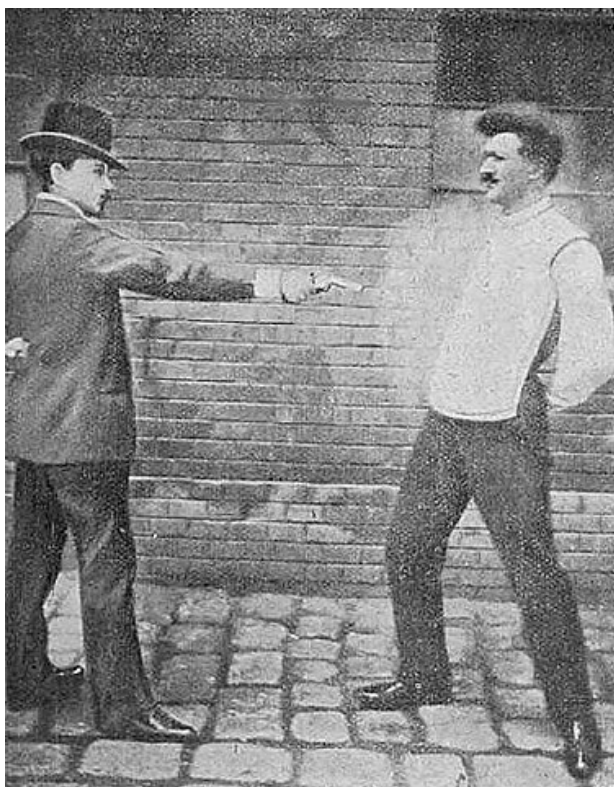
1. Wstęp

Ochrona ludzkiego ciała przed różnego rodzaju zagrożeniami, takimi jak ostre przedmioty i pocisk bojowy, sięga historii ludzkości. Ludzie nosili ubrania wykonane z różnego rodzaju prymitywnych i starszych materiałów, takich jak skóra zwierząt (skóra), drewno, kamienie, miedź, stal itp. aby chronić się przed różnego rodzaju zagrożeniami. Różne tkaniny i laminaty wykonane z tradycyjnych włókien, takich jak len, bawełna, jedwab i nylon, zostały również wykorzystane nie tylko do odzieży, ale również jako materiały chroniące przed różnymi zagrożeniami, w tym zastosowaniami balistycznymi [1-2]. Wynalzcami kamizelki kuloodpornej byli dwaj Polacy: Jan Szczepanik oraz Kazimierz Żegleń (Rys. 1). W kamizelkach obu wynalzców energia pocisku była pochłaniana w kolejnych warstwach tkaniny, z której uszyta była sama kamizelka.

Publicznie wykonywane testy wykazały, że tkanina Szczepanika jest odporna na kule zdolne przebić grube sosnowe deski i blachę żelazną, oraz na ostrze sztyletu. Okazało się, że rozpięta na parawanie tkanina, wzmocniona warstwą cienkiej blachy, zatrzymywała nie tylko kule z rewolweru kaliber 8 mm, ale nawet z karabinu Mannlicher, które przestrzeliwały na wylot stalową blachę o grubości 12 milimetrów z odległości 100 m [3]. Powstanie współczesnej generacji kamizelek balistycznych szacuje się na koniec lat 60. XX wieku po opracowaniu nowych syntetycznych materiałów włóknistych o właściwościach antybalistycznych.

Szybki rozwój tak wytrzymałych i wysokomodułowych włókien przyniósł także nową erę opartych na tkaninie systemów ochronnych o wyżej wymienionych właściwościach dla różnego rodzaju balistycznych nowości technologicznych .

Nieustannie prowadzono też szeroko zakrojone badania w celu poprawy nie tylko udatności balistycznej istniejącego materiału, ale także wynalezienia nowych materiałów balistycznych wraz z różnymi właściwościami mechanicznymi dla ogromnych rodzajów zastosowań technicznych, w tym systemów pancerzy osobistych.



Rys. 1. Kamizelka kuloodporna J. Szczepanika podczas testów (1901) [3].

Źródło: opracowanie własne.

Z tego powodu opracowano różne typy włókien o wysokiej wydajności o różnych właściwościach strukturalnych i odpowiedzialnych za szczególne reakcje na uderzenia balistyczne i parametry na etapie przędzy, tkaniny i jej laminatów kompozytowych, itp. Włókna para-aramidowe i polietylenowe o ultra wysokiej masie cząsteczkowej (UHMWPE) to dwa dobrze znane włókna o wysokiej wydajności do wytwarzania ochronnego materiału tekstylnego ze względu na ich wysoką odporność na uderzenia [4-5]. Twaron® (zastrzeżony znak towarowy Teijin), Kevlar® (zastrzeżony znak towarowy DuPont), Dyneema® (zastrzeżony znak towarowy DSM) należą do dobrze znanych włókien o wysokiej wydajności, które są szeroko stosowane w elastycznych pancerzach balistycznych ze względu na ich pożądane właściwości inżynierskie, takie jak wysoka wytrzymałość, wytrzymałość na rozciąganie, dobra odporność chemiczna i lekkie cechy [6].

Jednak oprócz wyjątkowych właściwości materiału (włókna) istnieją również różne mechanizmy, które należy wziąć pod uwagę w celu zwiększenia wydajności balistycznej danego materiału. Na przykład zwykłą metodą poprawy ochrony balistycznej przed uderzeniem między innymi pocisku obok wyboru odpowiednich właściwości materiałów jest dodanie większej liczby warstw w różnych ustawieniach

podczas produkcji paneli balistycznych [7-8]. Mimo, że zwiększenie liczby warstw tarczy balistycznej poprawia jej wydajność, wpływa to również na całkowitą wagę i elastyczność docelowej tarczy [9]. Poza tym istnieją również różne parametry, które mogą zwiększyć wydajność materiału balistycznego. W chwili obecnej jako warstwy pakietów balistycznych stosuje się tkaniny aramidowe o splocie płóciennym lub nielane struktury na bazie włókien polietylenowych.

Duże nadzieje wiąże się również z rozwojem tkanin wieloosiowych jednak technologia wytwarzania tych tkanin nie jest jeszcze dopracowana. Innym kierunkiem rozwoju płaskich materiałów na osłony balistyczne są struktury układane z wyprostowanymi nitkami. Takie próby były realizowane poprzez klejenie pasm nitek. Badania wykazały, że struktury te cechuje mniejsza deformacja poprzeczna podczas uderzenia pocisku w stosunku do typowych tkanin.

Problemy związane z tymi strukturami dotyczą rozsuwania się nitek w punkcie uderzenia pocisku [10]. Obecnie tkaniny o wysokiej wytrzymałości z przędz polimerowych są również szeroko stosowane ze względu na ich niską gęstość i wysoką wytrzymałość, a także dobrą odporność na obciążenia przy dużej prędkości, szczególnie na uderzenia balistyczne. Ze względu na takie właściwości, powyższe materiały balistyczne zostały zastosowane w wielu konfiguracjach w obszarach związanych z odzieżą ochronną dla personelu wojskowego i organów ścigania. Na rys. 2 przedstawiono widok typowej kamizelki kuloodpornej z pakietem tekstylnym wykonanym z włókien wysokowytrzymałych [11].



Rys.2. Widok typowej kamizelki kuloodpornej z pakietem tekstylnym [11]

Źródło: opracowanie własne.

2. Cel pracy

Celem pracy jest uzyskanie pakietu balistycznego metodą haftu oraz weryfikacja balistyczna pod względem energii resztkowej pocisku, maksymalnej deformacji oraz

wielkości uderzenia balistycznego. Zakres pracy dotyczy badania tekstyliów pod kątem zastosowania ich w wielowarstwowych strukturach pakietów balistycznych.

2. Metodyka badań

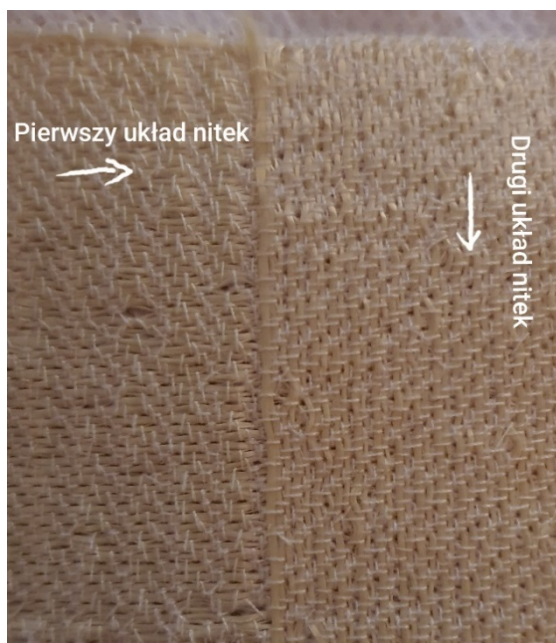
2.1. Wytwarzanie struktur haftowanych

W ramach realizacji badań związanych z opracowaniem struktur haftowanych z wykorzystaniem nitek aramidowych, użyto hafciarki JCZA 0109-550 firmy ZSK (Rys. 3). Dwa układy nitek aramidowych są układane pod kątem 90° . Pierwszy układ nitek jest przyczepiany haftem krzyżowym do włókninowego podkładu. Z kolei drugi układ nitek jest przyczepiany w podobny sposób na pierwszym układzie nitek pod kątem 90° (Rys. 4).



Rys. 3. Hafciarka firmy ZSK model JCZA 0109-550

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 4. Widok wytworzonej struktury haftowanej z nitek aramidowych

Źródło: opracowanie własne.

2.2. Badania balistyczne pakietów ze strukturami haftowanymi

Wstępne badania balistyczne przeprowadzono z wykorzystaniem pocisku PARABELLUM 9×19 mm FMJ (Rys. 5). Tunel balistyczny, w którym są przeprowadzane eksperymenty uderzeniowe wyposażony był w działo balistyczne, które jest przystosowane do wystrzeliwania pocisków odpowiadających badaniu pakietów balistycznych w klasie kuloodporności I, II, IIIa (wg normy NIJ Standard). W tunelu balistycznym zainstalowano system bramek do pomiaru prędkości uderzenia i prędkości resztkowej pocisku, jak również system do rejestracji odkształcenia 3D pakietu balistycznego uderzonego przez pocisk w czasie rzeczywistym.



Rys. 5. Pocisk PARABELLUM 9 × 19 mm FMJ [11]

Źródło: opracowanie własne.

3. Obiekt badań

W badaniach przyjęto dwa obiekty badań: strukturę haftowaną z nitek pararamidowych Twaron CT709 Microfilament 930 tex, których podstawowe parametry przedstawiono w tabeli 2 oraz pocisk Parabellum 9x19 mm FMJ.

Tabela 1. Podstawowe parametry przędzy Twaron CT Microfilament [12]

Parametr	Wartość
Masa liniowa, dtex	930
Liczba filamentów w przekroju poprzecznym	1000
Wytrzymałość właściwa, cN/tex	235
Moduł sprężystości, GPa	102
Wydłużenie przy zerwaniu, %	3,45
Gęstość, g/cm ³	1,44
Temperatura rozpadu, °C	500

Źródło: opracowanie własne.

Drugim obiektem badań jest pocisk Parabellum 9x19 mm FMJ. Pocisk ten jest obecnie najczęściej używanym pociskiem na świecie, szczególnie w większości typów pistoletów służb cywilnych i wojskowych. Został on uwzględniony w trzech klasach kuloodporności wg amerykańskiej normy NIJ Standard 2008 (Tabela 2).

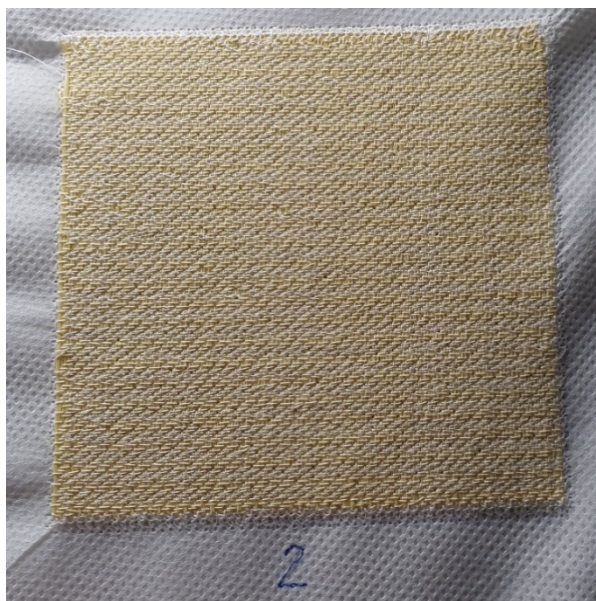
Tabela 2. Klasy kuloodporności dla kamizelek kuloodpornych wg normy NIJ Standard 2008 [12]

Klasa kuloodporności	Szczegółowe wymagania testów						
	Liczba powtórzeń	Rodzaj amunicji testującej	Masa pocisku	Minimalna prędkość pocisku	Liczba strzałów pod kątem 0°	Maksymalna wartość deformacji	Liczba strzałów pod kątem 30°
I	1	38 Special RN Lead	10,2 g 158 g	259 m/s	4	44 mm	2
	2	22 LRHV Lead	2,6 g	320 m/s	4	44 mm	2
II-A	1	357 Magnum JSP	10,2 g 158 g	381 m/s	4	44 mm	2
	2	9 mm FMJ	8,0 g	332 m/s	4	44 mm	2
II	1	357 Mangnum	10,2 g 158 g	425 m/s	4	44 mm	2
	2	9 mm FMJ	8,0 g	358 m/s	4	44 mm	2
III-A	1	44 Magnum Lead SWC	15,55 g	426 m/s	4	44 mm	2
	2	9 mm FMJ	8,0 g	426 m/s	4	44 mm	2
III	1	7,62 mm FMJ	9,7 g	838 m/s	6	44 mm	0
IV	1	30-6 AP	10,8 g	868 m/s	6	44 mm	0

Źródło: opracowanie własne.

4. Aktualny stan badań

Obecnie przeprowadzane są próby haftu w celu znalezienia optymalnej struktury osłony balistycznej. Przykładowe widoki uzyskanych struktur przedstawiono na rys. 6 i 7.

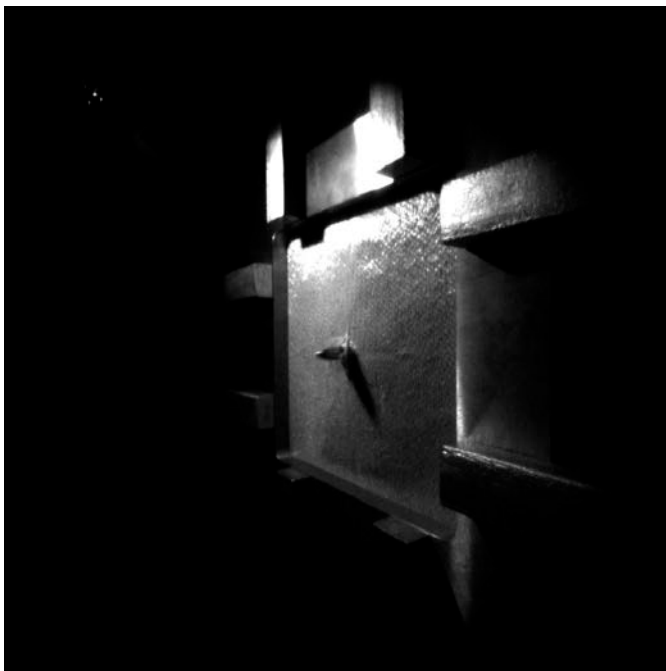


Rys. 6. Przykładowa próbka struktury haftowanej z poliestrową nitką haftującą
Źródło: opracowanie własne.



Rys. 7. Przykładowa próbka struktury haftowanej z monofilamentową nitką haftującą
Źródło: opracowanie własne.

Uzyskane struktury haftowane z nitek aramidowych testowano w tunelu balistycznym w celu sprawdzenia ich właściwości balistycznych (Rys. 8 i 9).



Rys. 8. Pocisk przechodzący przez strukturę haftowaną – opracowanie własne

Źródło: opracowanie własne.



Rys. 9. Przestrzelona struktura haftowana – opracowanie własne

Źródło: opracowanie własne.

Literatura

- [1] **Saxtorph M.**, *Warriors and Weapons of Early Times*, Macmillan Co. New York 1972.
- [2] **Sun D.**, *Ballistic performance evaluation of woven fabrics based on experimental and numerical approaches*. Elsevier Ltd, 2016.
- [3] Autor anonimowy, *Jan Szczepanik*, online, <https://web.archive.org/web/20120913004603/http://www.jan.private.pl/>, [dostęp: 23.11.2022]
- [4] **Yavaş O.M., Avci A., Şimşirb M., Akdemira A.**, *Ballistic performance of Kevlar49/ UHMW-PEHB26 Hybrid Layered- Composite*, *Int. J.Eng. Res. Dev.* 2015., vol. 7, no. 4, ss. 1–20.
- [5] **Zee H.R., Hsieh Y.C.**, *Energy absorption processes in fibrous composites*, *Mater. Sci. Eng. A* 1998, vol. 246, nr 1–2, ss. 161–168.
- [6] **Tan C.V., Tay T., Teo K.W.**, *Strengthening fabric armour with silica colloidal suspensions*, *Int. J. Solids Struct.* 2005, vol. 42, ss. 1561–1576,
- [7] **Öberg E., Dean J., Clyne W.T.**, *Effect of inter-layer toughness in ballistic protection systems on absorption of projectile energy*, *Int. J. Impact Eng.* 2015, vol. 76, ss. 75–82.
- [8] **Yang Y., Chen X.**, *Investigation of energy absorption mechanisms in a soft armor panel under ballistic impact*, *Text. Res. J.* 2017, vol. 87, nr 20, ss. 2475–2486.
- [9] **Learmont S. H.**, *Soft armor*, patent number US 7,251,835 B2, 2007.
- [10] **Duan Y., Keefe M., Bogetti T., Cheeseman B. A., Powers B.**, *A numerical investigation of the influence of friction on energy absorption by a high-strength fabric subjected to ballistic impact*, *Int. J. Impact Eng.* 2006, vol. 32, nr 8, ss. 1299–1312.
- [11] **Stempień Z.**, *Strukturalna barierowość balistyczna tekstyliów*, *Zeszyt Naukowy* 1049. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2009
- [12] **Dominiak J., Stempień Z.**, *Modelowanie numeryczne i analiza kuloodporności wielowarstwowych pakietów wykonanych z włókien paraaramidowych*, *Problemy Mechatroniki, Uzbrojenie, Lotnictwo, Inżynieria Bezpieczeństwa* 2016, vol. 7, nr 1 (23), ss. 43-60.

WŁAŚCIWOŚCI MECHANICZNE HAFTU TECHNICZNEGO WYKONANEGO Z WŁÓKIEN LNIANYCH

Agata Poniecka, Marcin Barbuski

Wydział Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów, Instytut
Architektury Tekstyliów, Politechnika Łódzka

1. Wstęp

Haft znany jest już od starożytności. Obecnie, poza formą zdobniczą, znajduje też wykorzystanie w przemyśle technicznym. Dzięki wykorzystywaniu komputerowych maszyn haftujących, możliwa jest wysoka precyzja oraz duża wydajność.

Haftowane elementy techniczne można znaleźć w takich produktach, jak: maty grzewcze i sensoryczne (badanie temperatury, wilgotności), czujniki elektrochemiczne do szybkiej kwantyfikacji biomarkerów, przymocowywanie i łączenie diod LED, trójwymiarowe kolektory prądowe do baterii litowo-jonowych, mocowanie wyrobów liniowych na podkładach włókienniczych^{32,33,34}. Haft techniczny może być również wykorzystywany do miejscowego wzmacniania kompozytów, dzięki wykorzystaniu technologii TFP (ang. Tailored fibre placement – dopasowanie ułożenia włókien). Oznacza to ułożenie włókien (w tym przypadku: niedoprzędu lnianego) na podkładzie tekstylnym dokładnie w tym miejscu, które wymaga wzmocnienia. Dzięki temu, zredukowana zostaje ilość powstających odpadów oraz minimalizowane są straty materiałowe³⁵.

Współcześnie wytwarzane kompozyty stanowią alternatywę dla metalowych odpowiedników. Kompozyty tekstylne wykorzystywane są m.in. w aeronautyce, czy przemyśle samochodowym (jako karoserie).

³² Briedisa U., Valisevskisa A., Grecka M., *Development of a Smart Garment Prototype with Enuresis Alarm Using an Embroidery-Machine-Based Technique for the Integration of Electronic Components* Computer Science 2017, nr 104, ss. 369 – 374

³³ Agulio-Aguayo N., Amann P., Espinera P.P., Petrasch J., Bechtold T., *X-ray micro tomography of three-dimensional embroidered current collectors for lithium-ion batteries*, Journal of Power Sources 2016, nr 306, ss. 826-831

³⁴ Liua X., Lillehoja P.B., *Embroidered electrochemical sensors on gauze for rapid quantification of wound biomarkers*, Biosensors and Bioelectronics 2017, nr 98, ss. 189-194

³⁵ El-Dessouky H.M., Saleh M.N., Gautam M., Hane G., Scaifea R.J., Potlurid P. *Tailored fibre placement of commingled carbon-thermoplastic fibres for notch-insensitive composites*, Composite Structures 2019, nr 214, ss. 348-349

2. Przedmiot badań

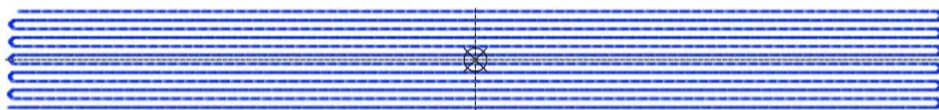
Przedmiot badań (haft techniczny) został wykonany na komputerowej maszynie hafciarskiej firmy ZSK typ JCZA 0109-550. Maszyna ta wyposażona jest w głowicę typu W, która służy do wykonywania haftu technicznego. Za jej pomocą możliwe jest przymocowanie wybranego medium (niedoprzęd lniany, włókno szklane, światłowód, kabel) do płaskiego wyrobu włókienniczego. Medium takie przymocowywane jest w układzie osi X oraz Y, przy wykorzystaniu przędzy mocującej (najczęściej jest to nić poliestrowa lub monofilament poliamidowy) przy pomocy ściegu hafciarskiego (najczęściej typu zig-zag). Haftowane układy mogą się przecinać pod dowolnymi kątami, jak również układać się warstwowo. Maksymalna wysokość nawarstwienia to 8 mm.

Projekt haftu został wykonany w programie GiS BasePack, wersja 10. Jest to oprogramowanie dedykowane hafciarkom ZSK.

Wytrzymałość włókien jest większa w kierunku wzdłużnym, niż w poprzecznym. Potwierdzone zostało to wcześniejszymi badaniami, w których zastosowano różne układy niedoprzędu w hafcie. Układ o kierunku wzdłużnym charakteryzował się około trzykrotnie większą wytrzymałością na rozciąganie od innych kierunków ułożenia niedoprzędu. Z tego powodu, zdecydowano się wykorzystać właśnie ten układ do wykonania wzmacnianych kompozytów.

Przedmiotem przedstawionych badań były zatem:

1. Jednowarstwowy haft wykonany z niedoprzędu lnianego
2. Kompozyt zawierający jednowarstwowy haft wykonany z niedoprzędu lnianego
3. Kompozyt zawierający siedmiowarstwowy haft wykonany z niedoprzędu lnianego



Rys. 1. Sposób ułożenia niedoprzędu pod kątem 0° do kierunku wzdłużnego próbki

Źródło: opracowanie własne.

Na rysunku nr 1 przedstawiono sposób ułożenia niedoprzędu w próbce. Ścisłość ułożenia niedoprzędu wynosiła $6/10$ mm.

Haft został wykonany przy użyciu niedoprzędu lnianego o masie liniowej 360 tex, poliamidowego monofilamentu o masie liniowej 11 tex oraz flizeliny poliestrowej o masie powierzchniowej 37 g/cm^2 , służącej jako podkład.

Po wykonaniu dwóch wariantów haftu technicznego (jedna warstwa oraz siedem warstw), został z nich wytworzony kompozyt, zawierający haft jako wzmocnienie. Kompozyt został wytworzony metodą worka próżniowego. Materiał taki składa się

z co najmniej dwóch faz, przy czym jedna z nich jest fazą wzmacniającą. W tym przypadku jest to niedoprzęd lniany, ułożony i przyhaftowany w kierunku wzdłużnym do osi próbki. Właściwości wykonanego kompozytu są wyższe, niż właściwości poszczególnych faz oddzielnie. Wytwarzanie kompozytu umożliwia świadome kształtowanie właściwości mechanicznych oraz wskaźników konstrukcyjnych i eksploatacyjnych.

W kolejnym etapie badań zbadano właściwości mechaniczne pojedynczego układu haftu oraz kompozytu, zawierającego jako wzmocnienie jednowarstwowy oraz siedmiowarstwowy układ haftu.

3. Metodyka badań

Wydłużenie przy rozciąganiu oraz wytrzymałość na rozciąganie pojedynczej warstwy haftu zostało zbadane w oparciu o normę PN-EN ISO 13934-1 *Tekstylią. Właściwości płaskich wyrobów przy rozciąganiu. Część 1: Wyznaczanie maksymalnej siły i wydłużenia względnego przy maksymalnej sile metodą paska*³⁶.

Badanie wydłużenia przy rozciąganiu oraz wytrzymałości na rozciąganie kompozytu zostało przeprowadzone w oparciu o normę PN-EN ISO 527-4 *Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu. Warunki badań kompozytów tworzywowych izotropowych i ortotropowych wzmocnionych włóknami*³⁷.

Obydwa badania polegały na rozciąganiu ze stałą prędkością przygotowanych próbek, aż do momentu ich zerwania. W czasie rozciągania rejestrowane były wartości wydłużenia względnego przy maksymalnej sile, wartości siły maksymalnej, wartości siły zrywającej oraz wartości wydłużenia względnego przy rozerwaniu.

Badania zostały przeprowadzone na maszynie wytrzymałościowej INSTRON, charakteryzującej się stałym przyrostem wydłużenia, w Laboratorium Wytrzymałości Materiałów Wydziału Mechanicznego Politechniki Łódzkiej.

Dla próbek haftu przyjęto następujące parametry badań:

- Ilość prób: 3
- wymiary próbki:
 - długość: 150,00 mm
 - szerokość: 15,00 mm
 - grubość: 1,63 mm
- odległość zacisków: 100,00 mm

³⁶ PN-EN ISO 13934-1. 2002. Tekstylią. Właściwości płaskich wyrobów przy rozciąganiu. Część 1: Wyznaczanie maksymalnej siły i wydłużenia względnego przy maksymalnej sile metodą paska.

³⁷ PN-EN ISO 527-4. 2000. Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu. Warunki badań kompozytów tworzywowych izotropowych i ortotropowych wzmocnionych włóknami

- prędkość rozciągania: 100,00 mm/min
- masa powierzchniowa: 638,89 g/m²

Dla próbek kompozytu zawierającego jedną warstwę haftu przyjęto następujące parametry badań:

- wymiary próbki:
 - długość: 150,00 mm
 - szerokość: 20,00 mm
 - grubość: 1,20 mm
- odległość zacisków: 100,00 mm
- prędkość rozciągania: 100,00 mm/min
- masa powierzchniowa: 1278,06 g/m²

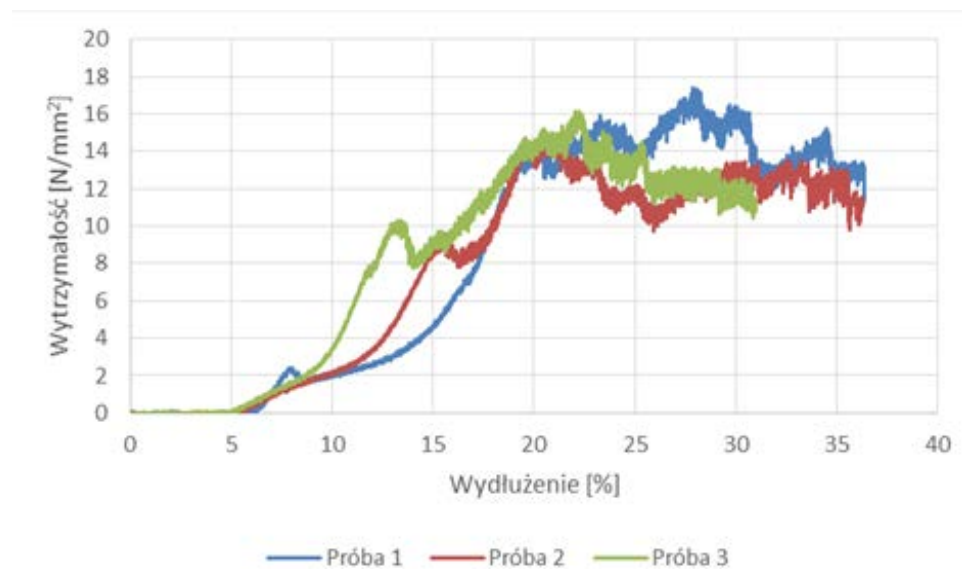
Dla próbek kompozytu zawierającego siedem warstw haftu przyjęto następujące parametry badań:

- wymiary próbki:
 - długość: 150,00 mm
 - szerokość: 20,00 mm
 - grubość: 5,43 mm
- odległość zacisków: 100,00 mm
- prędkość rozciągania: 100,00 mm/min
- masa powierzchniowa: 3818,96 g/m²

Wyniki badań zostały podane w formie danych liczbowych oraz wykresu wytrzymałości w funkcji wydłużenia.

4. Dyskusja wyników

Na poniższym wykresie przedstawiono wytrzymałość oraz wydłużenie trzech kolejnych prób pojedynczych warstw haftu.



Rys. 1. Wykres zależności wytrzymałości oraz wydłużenie haftu

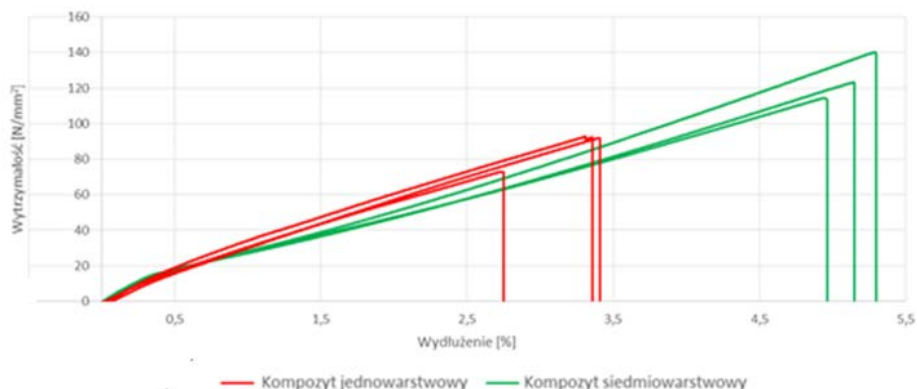
Źródło: opracowanie własne.

Średnie maksymalne wydłużenie pojedynczej warstwy haftu wynosiło 27,66 %, przy odchyleniu standardowym równym 1,41.

Średnia maksymalna wytrzymałość na rozciąganie wynosiła 16,19 N/mm², przy odchyleniu standardowym równym 1,81.

Na wykresie widoczne są zrywy poszczególnych elementów haftu. Uszkodzeniu ulegały kolejno niedoprzęd (wyślizgiwanie się włókien), nitka mocująca haft oraz tkanina zasadnicza. W wyniku poszczególnych zrywów nastąpił ostateczny zryw próbki.

Na rysunku nr 2 zestawiono wartości wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu kompozytu zawierającego jedną warstwę haftu oraz siedem warstw haftu.



Rys. 2. Porównanie zależności wytrzymałości oraz wydłużenie kompozytów zawierających jedną oraz siedem warstw haftu

Źródło: opracowanie własne.

Wartości wytrzymałości poszczególnych prób zestawiono w tabeli nr 1.

Tabela 1. Wartości średniego wydłużenia, średniego maksymalnego naprężenia oraz maksymalnej siły zrywającej prób haftu oraz kompozytu wzmacnianego haftem.

Rodzaj próbki	Średnie wydłużenie [%]	Średnie maksymalne naprężenie [N/mm ²]	Maksymalna siła zrywająca [N]
Haft	27,66	16,19	-
Kompozyt jednowarstwowy	1,58	85,88	3239,30
Kompozyt siedmiowarstwowy	5,14	125,90	14838,60

Źródło: opracowanie własne.

W przypadku kompozytu zawierającego jeden układ haftu, średnie wydłużenie badanych próbek wynosiło 1,58%, przy odchyleniu standardowym równym 0,18. Średnie maksymalne naprężenie badanych kompozytów wynosiło 85,88 N/mm², przy odchyleniu standardowym równym 11,20. Maksymalna siła zrywająca wynosiła 3239,30N, przy odchyleniu standardowym równym 252,26.

Wytrzymałość kompozytu, zawierającego jedną warstwę haftu, jest około pięciokrotnie większa od samego haftu. Natomiast wydłużenie jest około dziesięć razy mniejsze.

Średnie maksymalne naprężenie badanych próbek kompozytu zawierającego siedem warstw haftu wynosiło $125,90 \text{ N/mm}^2$, przy odchyleniu standardowym wynoszącym 13,15. Średnia maksymalna siła zrywająca wynosiła 14838,60 N, przy odchyleniu standardowym równym 661,11. Średnie maksymalne wydłużenie wynosiło 5,14%, przy odchyleniu standardowym wynoszącym 0,17.

Wytrzymałość kompozytu zawierającego siedem warstw haftu jako wzmocnienie, była o około 40% większa od wytrzymałości na rozciąganie kompozytu zawierającego jedną warstwę haftu oraz około ośmiokrotnie większa od samego haftu.

Wraz ze wzrostem liczby warstw wzmacniających w kompozycie, zwiększało się jego wydłużenie przy rozciąganiu.

5. Wnioski

Zdecydowano się na wytworzenie i porównanie właściwości mechanicznych (wytrzymałości na rozciąganie oraz wydłużenia przy rozciąganiu) jednowarstwowego haftu technicznego oraz dwóch rodzajów kompozytów: zawierających jako wzmocnienie jedną oraz siedem warstw haftu o układzie niedoprzędu pod kątem 0° do kierunku wzdłużnego próbki.

Wytrzymałość na rozciąganie kompozytu jednowarstwowego okazała się prawie pięciokrotnie większa od wytrzymałości samego haftu. Pomimo tego, wytrzymałość kompozytu zawierającego siedem warstw haftu, była tylko około ośmiokrotnie większa od samego haftu. Oznacza to, że wzrost wytrzymałości kompozytów nie rośnie proporcjonalnie do zwiększania ilości warstw wzmacniających. Może być to spowodowane niedokładną impregnacją żywicy wewnątrz kompozytu lub innymi błędami powstającymi podczas wytwarzania kompozytu.

Średnie wydłużenie kompozytu siedmiowarstwowego było około sześciokrotnie mniejsze od badanych haftów oraz o około 1,5 % większe od kompozytu jednowarstwowego. Udowodniono, że wraz ze wzrostem warstw haftu w kompozycie, wzrasta jego wydłużenie przy rozciąganiu. Spowodowane jest to większą ilością włókien biorących udział w rozciąganiu.

Na podstawie przeprowadzonych badań można wnioskować, iż kompozyt zawierający jedną warstwę haftu jest sztywniejszy od kompozytu siedmiowarstwowego. Oba kompozyty nie wykazują cech materiałów plastycznych. Można zatem zakwalifikować je jako materiały kruche.

W strukturze kompozytu siedmiowarstwowego zauważyć można drobne pęcherzyki powietrza. Spowodowane jest to trudniejszym przedostawaniem się żywicy do wnętrza próbek. Może to być przyczyną niedostatecznie zadowalających właściwości wytrzymałościowych wytworzonego kompozytu.

Na podstawie przeprowadzonych badań można zatem wnioskować, iż wraz ze wzrostem ilości zastosowanych warstw haftu wewnątrz kompozytu, rośnie nieliniowo jego wytrzymałość na rozciąganie.

Uzyskane wyniki pozwolą na dalsze badania nad wykorzystaniem haftu jako wzmocnienia kompozytów. Planowane jest wykonanie prób o zróżnicowanym ułożeniu niedoprzędu wewnątrz kompozytu.

6. Literatura

- [1] **Agulio-Aguayo N., Amann P., Espinera P.P., Petrasch J., Bechtold T.,** *X-ray micro tomography of three-dimensional embroidered current collectors for lithium-ion batteries*, Journal of Power Sources 2016, nr 306.
- [2] **Briedisa U., Valisevskisa A., Grecka M.,** *Development of a Smart Garment Prototype with Enuresis Alarm Using an Embroidery-Machine-Based Technique for the Integration of Electronic Components* Computer Science 2017, nr 104.
- [3] **El-Dessoukya H.M., Salehc M.N., Gautamd M., Hane G., Scaifea R.J., Potlurid P.,** *Tailored fibre placement of commingled carbon-thermoplastic fibres for notch-insensitive composites*, Composite Structures 2019, nr 214.
- [4] **Liua X., Lillehoja P.B.,** *Embroidered electrochemical sensors on gauze for rapid quantification of wound biomarkers*, Biosensors and Bioelectronics 2017, nr 98.
- [5] **Poniecka A., Barbuski M.,** *Właściwości mechaniczne haftu technicznego wykonanego z włókien lnianych*, XIII Kopernikańskie Seminarium Doktoranckie, Bachotek 2019
- [6] PN-EN ISO 13934-1. 2002. Tekstylnia. Właściwości płaskich wyrobów przy rozciąganiu. Część 1: Wyznaczanie maksymalnej siły i wydłużenia względnego przy maksymalnej sile metodą paska.
- [7] PN-EN ISO 527-4. 2000. Tworzywa sztuczne. Oznaczanie właściwości mechanicznych przy statycznym rozciąganiu. Warunki badań kompozytów tworzywowych izotropowych i ortotropowych wzmocnionych włóknami

TKANINA JAKO BARIERA AKUSTYCZNA

*Katarzyna Abramczyk¹, Marcin Barbarski¹, Jarosław R. Blaszczak²,
Bethalihem Samuel¹*

¹ *Wydział Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów
(Instytut Architektury Tekstyliów)*

Politechnika Łódzka, ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź, Polska

² *Wydział Mechaniczny (Instytut Maszyn Przepływowych)*

Politechnika Łódzka, ul. Wólczańska 219/223, 90-924 Łódź, Polska

1. Wstęp

Rozwój technologii i cywilizacji czasami powoduje obniżenie komfortu życia i pogorszenie zdrowia. Jednym z problemów jest niepotrzebny hałas generowany z otoczenia mający swoje źródła w domach tj. telewizja, sprzęt AGD, klimatyzatory, głośne rozmowy, itd. oraz w miejscach pracy tj. urządzenia i maszyny, panele wibracyjne, silniki spalinowe, urządzenia przepływowe itp. Opisane wyżej źródła dźwięku można skategoryzować jako hałas przenoszony przez powietrze i hałas przenoszony przez konstrukcje. Aby rozwiązać ten problem opracowano bariery dźwiękowe z różnych materiałów, m.in. z porowatych struktur materiałów włókienniczych stosowanych jako materiały dźwiękochłonne. W zależności od zastosowania końcowego wykorzystuje się tkaniny, dzianiny, włókniny i kompozyty [1-3].

Najbardziej znanymi materiałami stosowanymi do absorpcji akustycznej są włókniny, które dzięki swojej wysokiej całkowitej powierzchni stanowią skuteczne bariery dźwiękochłonne. Jest to związane z ich właściwościami i kształtem przekroju włókna. Mniejsza średnica zastosowanych włókien wpływa na poprawę barierowości akustycznej przy zachowaniu tej samej masy powierzchniowej włókniny. Zwiększa to możliwości interakcji fal dźwiękowych z włóknami w strukturze materiału.

Parametry fizyczne i akustyczne określane są przez pomiar grubości, masy na jednostkę powierzchni, wytrzymałości i wydłużenia, porowatości, przepuszczalności powietrza i przewodności cieplnej oraz pochłaniania dźwięku. Naukowcy przez wiele lat opracowywali bariery kompozytowe jako produkty pochłaniające dźwięk, stosując w tym celu różne materiały zgodnie z końcowym przeznaczeniem. Zwłaszcza w celu zapobieganiu hałasom trudno redukowalnym, np. generowanych przez samoloty, silniki ciężarówek i maszyny. Takie kompozyty akustyczne można wytwarzać np. poprzez zastosowanie pianek polimerowych, materiałów pochodzących z recyklingu i laminowanych tekstyliów [2,4,5].

Proces produkcji tkanin umożliwia uzyskanie masowo produkowanego taniego materiału do zastosowania jako bariera akustyczna, przy jednoczesnym uzyskaniu

większej wytrzymałości w porównaniu do włókien. Tkaniny można zrealizować z różnych surowców tj. naturalnych lub chemicznych włókien. Rodzaj przędzy i splot tkaniny również nie jest bez znaczenia. Badanie właściwości włókien, przędz i płaskich struktur włókienniczych może prowadzić do określenia cech materiałów stanowiących barierę akustyczną. Do właściwości takich należą: skręt przędzy, masa liniowa przędzy, grubość tkaniny, porowatość, przepuszczalność powietrza, współczynnik pokrycia tkaniny, opór przepływu, itp. [1,3].

W niniejszym artykule skupiono się na analizie zjawiska pochłaniania dźwięku w czterech różnych strukturach tkanin, wytworzonych z jednego rodzaju przędzy. Tkaniny zostały wytworzone przy użyciu nowoczesnych maszyn i technologii celem uzyskania ich konkretnych właściwości i zastosowań. Przeprowadzone testy dały możliwość zbadania wpływu różnic w strukturze wewnętrznej tkanin na ich właściwości akustyczne. Przedstawione pomiary właściwości akustycznych zostały wykonane w specjalnie zaprojektowanej aeroakustycznej komorze bezdechowej znajdującej się w Laboratorium Aeroakustyki Instytutu Maszyn Przepływowych (Politechnika Łódzka).

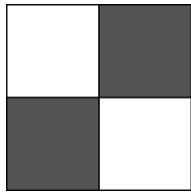
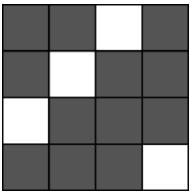
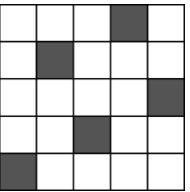
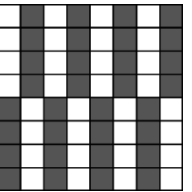

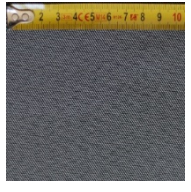
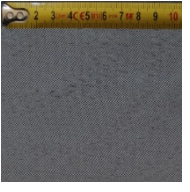
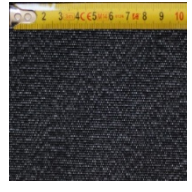
2. Materiał badawczy

Do badań wykorzystano cztery próbki tkanin o różnych splotach (płóciennym, skośnym, atlasowym i rypsowym) o wymiarach 150 cm x 150 cm. Tkaniny zostały wykonane na krośnie Picanol Gamma z mechanizmem Jacquarda w Instytucie Architektury Tekstyliów (Politechnika Łódzka). Ich specyfikacja przedstawiona jest w Tabeli 1.

Jako osnowy i wątku użyto teksturowanej przędzy poliestrowej 167 dtex x 2. Przędza teksturowana (DTY) to przędza z włókien ciągłych charakteryzująca się karbikowatością, dobrym pokryciem tkaniny, dobrymi własnościami mechanicznymi, małym ciężarem właściwym, trwałością, miękkim chwytem i niskim efektem pilingowania na powierzchni tkaniny. Karbikowatość i puszystość przędzy poliestrowej DTY zapewnia dobrą przemianę energii akustycznej w energię cieplną, która powstaje w wyniku tarcia wewnątrz struktury [6-7].

Wszystkie tkaniny powstały na tym samym krośnie o stałej liczności osnowy wynoszącej 30 nitek/cm. Tabela 2 przedstawia liczności nitek wątku i osnowy, grubości i masy powierzchniowe badanych tkanin po 24 godzinnej relaksacji w warunkach normalnych.

Tabela 1. Specyfikacja badanych tkanin

Tkanina	A. Tkanina o splotcie płóciennym	B. Tkanina o splotcie skośnym	C. Tkanina o splotcie atlasowym	D. Tkanina o splotcie rypsowym poprzecznym
Raport splotu				
Wygląd tkaniny				

Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych pomiarów próbek.

Tabela 2. Parametry badanych tkanin

Tkanina	Masa powierzchniowa [g/m ²]	Grubość [mm]	Liczność nitki wążku [nitki/cm]	Liczność nitki osnowy [nitki/cm]
A	157	0,36	11	30
B	182	0,39	17	30
C	238	0,4	30	31
D	221	0,51	27	30

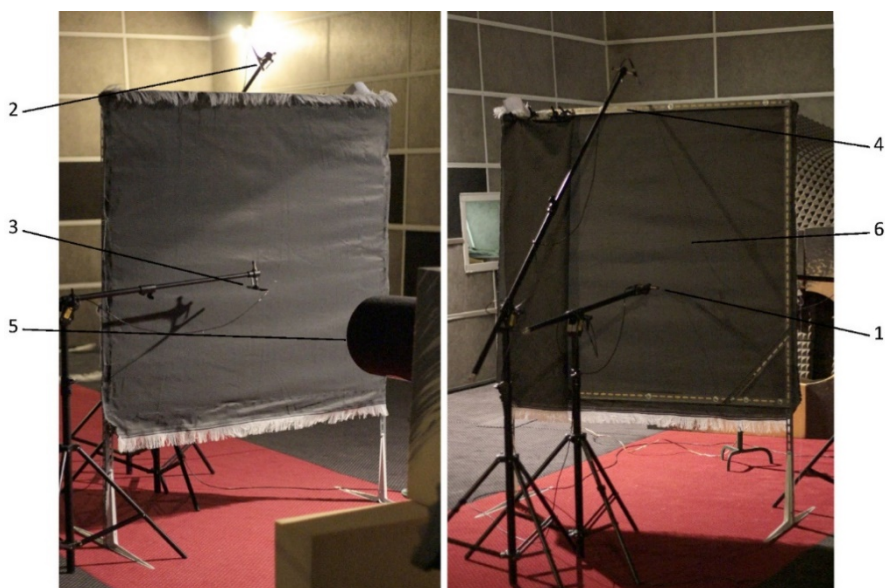
Źródło: opracowanie własne na podstawie przeprowadzonych pomiarów próbek.

3. Eksperyment

Badania zostały wykonane w aeroakustycznej komorze bezchowej w Laboratorium Aeroakustyki Instytutu Maszyn Przepływowych na Politechnice Łódzkiej. Komora bezchowa jak i jej modernizacja zostały opisane w pracach [8-11].

Tkaniny zostały poddane testom pochłaniania dźwięku w polu swobodnym w środowisku bezchowym. Każdą tkaninę o wymiarach 150 cm na 150 cm (Rysunek 1, poz. 6) przymocowano do specjalnie przygotowanej ramy przy użyciu igieł mocujących (Rysunek 1, poz. 4).

Badania przeprowadzono dla zakresów niskich i średnich częstotliwości akustycznych, w których trudno jest wytłumić dźwięk a które obejmują m.in. częstotliwości mowy. Pominięto wysokie częstotliwości ponieważ właściwości dźwiękochłonności tekstyliów dla wysokich częstotliwości są wystarczające i bardzo łatwo je tłumią [11-13].



Rys. 1. Stanowisko badawcze: 1 – mikrofon pierwszy (za tkaniną), 2 – mikrofon drugi (referencyjny), 3 – mikrofon trzeci (przed tkaniną), 4 – rama, 5 – źródło dźwięku, 6 – badana tkanina

Źródło: opracowanie własne na podstawie wykonanych badań.

Do testów użyto kierunkowego źródła dźwięku (Rys. 1., poz. 5) zasilanego przez wzmacniacz o paśmie przenoszenia od 5 Hz do 60 kHz (± 1 dB). Częstotliwość ustawiana była za pomocą generatora sygnału sinusoidalnego z czasem realizacji 10 s. Profile sygnałów wyjściowych każdorazowo były sprawdzane na oscyloskopie. Amplituda sygnału wytwarzanego w generatorze wynosiła 300 mV i była dalej odpowiednio wzmacniana (celem uzyskania odpowiedniej amplitudy) przed przejściem do źródła dźwięku. Badania rozpoczęto od wykonania pomiaru bez tkanin, co umożliwiło uzyskanie referencyjnych poziomów dźwięku dla każdej badanej częstotliwości.

Wszystkie testy wykonano przy użyciu trzech półcalowych mikrofonów z wbudowanymi przedwzmacniaczami (Rys. 1., poz. 1-3) o następujących parametrach: zakresy częstotliwości od 3,15 Hz do 40 kHz z polaryzacją 200V, czułość ok. 50 mV. Pierwszy mikrofon znajdował się 10 cm za badaną próbką w głównej osi źródła dźwięku (Rysunek 1, poz.1). Drugi znajdował się 10 cm przed

badaną próbką odsunięty poziomo o 10 cm od głównej osi źródła dźwięku (Rys. 1., poz. 3). Miało to na celu uniknięcie jego wpływu na dźwięk docierający do badanej próbki. Trzeci mikrofon znajdował się 10 cm nad ramą w pionowych osiach próbki i źródła dźwięku (Rys. 1., poz. 2). Jego oś skierowana była na środkowy punkt płaszczyzny wyjściowej źródła dźwięku. Służył on do pomiaru odniesienia poziomu dźwięku podczas wykonywanych testów. Przed każdą sesją pomiarową dokonywano sprawdzania mikrofonów przy użyciu kalibratora.

Dla każdego indywidualnego pomiaru czas pomiaru t wynosił 10 s. Częstotliwość próbkowania f_s wynosiła 50 kHz (0,5 miliona pomiarów dla konkretnej częstotliwości dla konkretnej konfiguracji pomiarowej). Dane z mikrofonów przysłane były poprzez stacje przetworników analogowo-cyfrowych do komputera poprzez ekranowane złącze Ethernet w celu zapisu i dalszej analizy danych. Dokładny opis technik pomiarowych znajduje się we wcześniejszych pracach [8,11,14-17].

Badania rozpoczęto od wykonania pomiaru bez tkanin. Dla każdego wybranego zakresu częstotliwości zmierzono wartości poziomów dźwięku. Sprawdzone czy układy generowania i pomiaru dźwięku mają płaskie charakterystyki (± 3 dB, wg norm ISO) w całym badanym zakresie częstotliwości. Wyniki stanowiły podstawę odniesienia dla mierzonych poziomów ciśnienia akustycznego. Dla każdej tkaniny zastosowano częstotliwości oktawowo, tj. 63, 125, 250, 500, 1000, 2000 Hz. Dla wszystkich pomiarów akustycznych referencyjny poziom ciśnienia akustycznego wynosił 20 μ Pa.

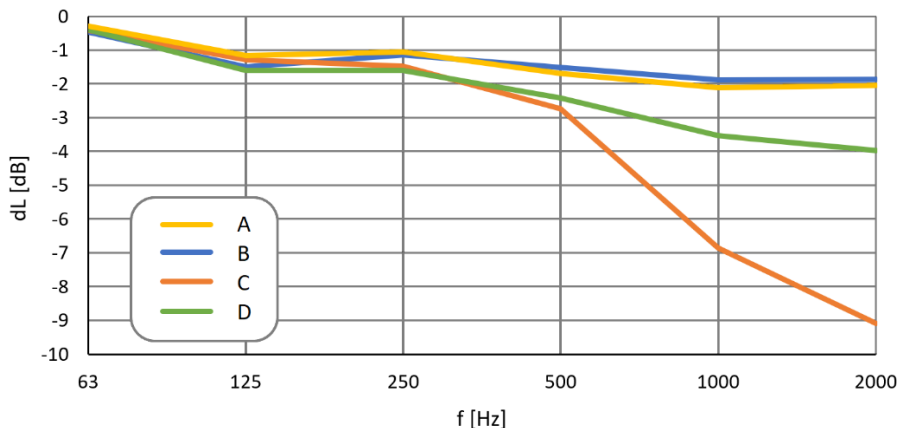
4. Analiza wyników

Na Rysunku 2 pokazano spadki poziomów ciśnienia akustycznego dla następujących materiałów: A – tkanina o splotie płóciennym, B – tkanina o splotie skośnym, C – tkanina o splotie atlasowym, D – tkanina o splotie rypsowym.

Jak można zauważyć podobne wyniki osiągnięto dla tkanin o splotach płóciennym i skośnym. Są to tkaniny o najniższych licznosciach wątkowych i masach powierzchniowych. Okazują się być praktycznie „przezroczyste” dla dźwięku. Ich zaletą jest równomierne pochłanianie dźwięku dla różnych częstotliwości co może stanowić podstawę do dalszych badań dla tkanin o większej masie powierzchniowej i licznosci wątkowych i osnowy.

Tkanina o splotie atlasowym wykazuje najlepszy wynik w zakresie tłumienności dźwięku w porównaniu z resztą badanych tkanin. Posiada najwyższą masę powierzchniową i licznosc nitek wątku. Jest to tkanina o gęstej strukturze więc dźwięk miał większe trudności w przejściu przez tkaninę. Podobne parametry ma tkanina o splotie rypsowym, jednak uzyskała niższe wyniki. Powodem jest dość luźna struktura splotu.

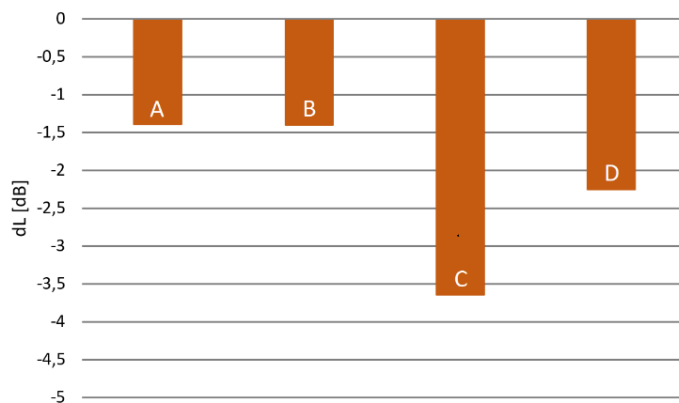
Poniżej 250 Hz wszystkie tkaniny okazały się być „przezroczyste” dla dźwięku. Właściwości pochłaniania dźwięku są lepsze dla wyższych częstotliwości, co jest doskonale udokumentowane w pracach innych badaczy [np. 12].



Rys. 1. Spadek poziomu ciśnienia akustycznego dla tkanin: A – o splocie płóciennym, B – o splocie skośnym, C – o splocie atlasowym, D – o splocie rypsowym

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań

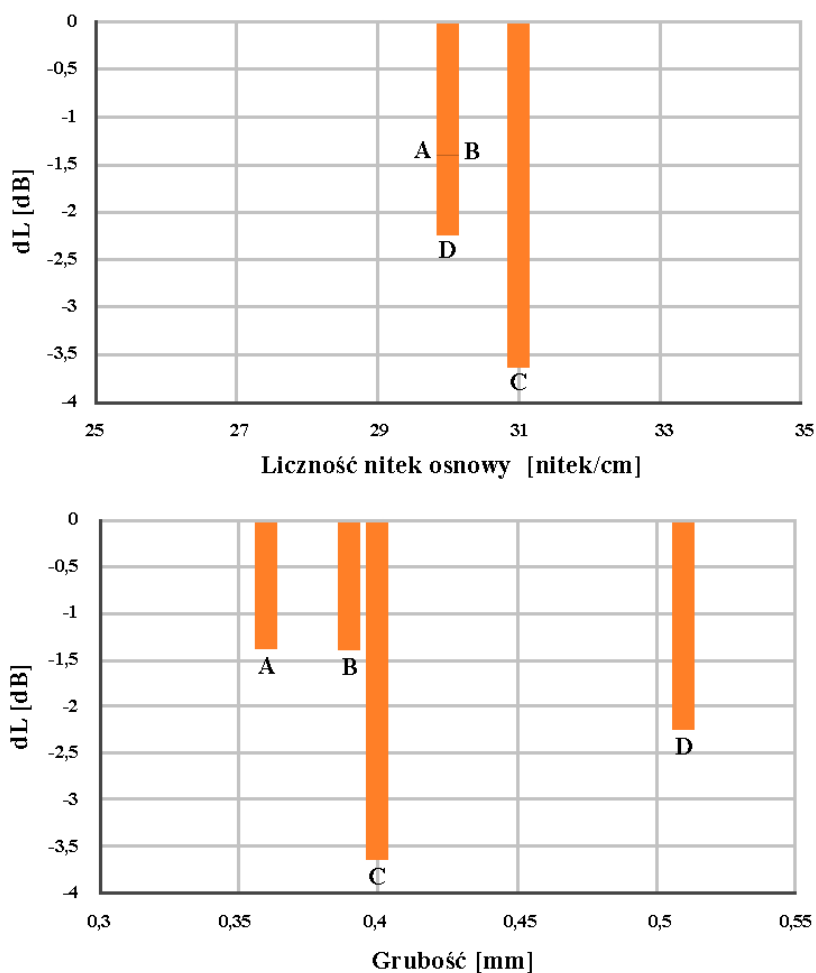
Porównanie wyników ogólnych dla całego zakresu badanych częstotliwości przedstawiono na Rys. 3. Dla uzyskania bardziej dokładnej analizy wyniki zostały pogrupowane wedle parametrów badanych tkanin i przedstawione na Rys. 4 i Rys. 5.



Rys. 2. Porównanie całkowitych spadków ciśnienia akustycznego we wszystkich konfiguracjach tkanin [18]

Źródło: Opracowanie własne na podstawie wyników badań

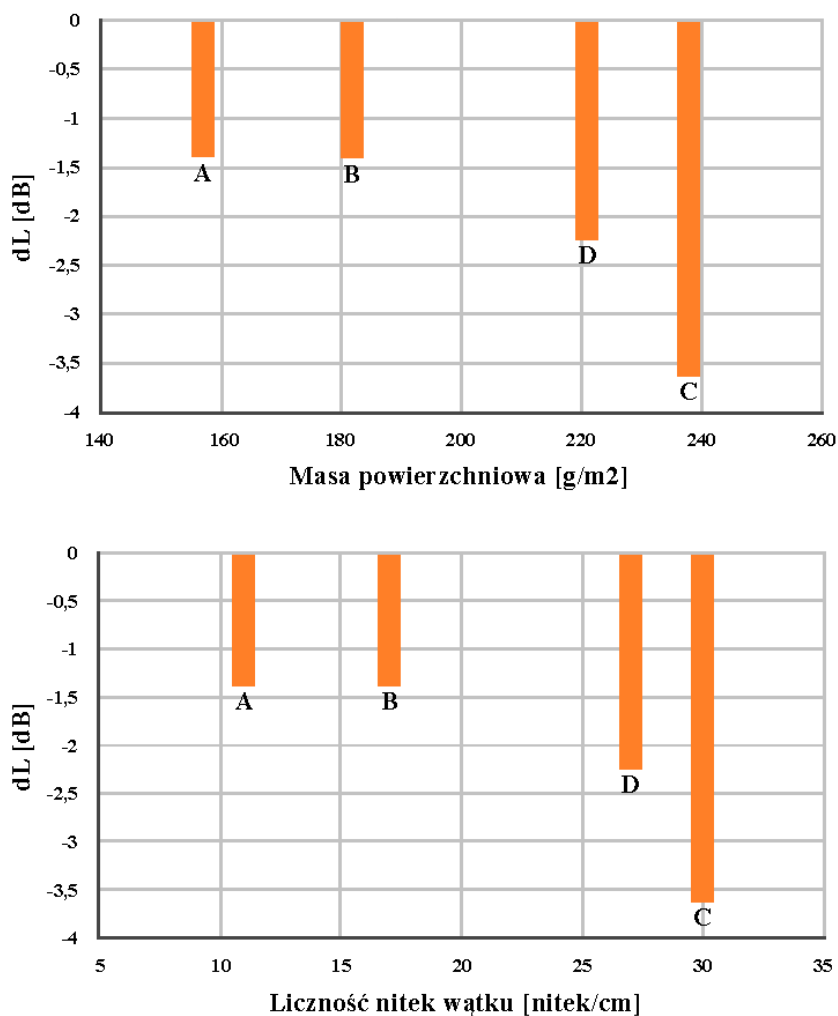
W przedstawionych badaniach nie dostrzeżono większych zależności pomiędzy grubością tkaniny a ilością pochłanianego dźwięku. Warto jednak zauważyć, że rozbieżności w grubościach badanych tkanin są niewielkie. Najgrubszą okazała się tkanina o splocie rypsowym, jednak poprzez swoją dość luźną strukturę splotu uzyskała dosyć przeciętny wynik podczas badań akustycznych. Najlepsze właściwości wykazała tkanina o splocie atlasowym, której grubość jest bardzo zbliżona do tkanin o splotach płóciennym i skośnym. Te natomiast nie stanowiły znaczącej bariery dla fali dźwiękowej. Tkanina o splocie płóciennym posiadała luźną strukturę, a obie miały niskie licznosci wątków, natomiast wszystkich tkaninach licznosci nitek osnowy miały zbliżone wartości.



Rys. 3. Porównanie całkowitych spadków ciśnienia akustycznego do parametrów tkanin: grubości, licznosci nitek osnowy [18]

Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Na kolejnych wykresach (Rys. 5.) przedstawiono wyniki pochłaniania dźwięku przez poszczególne tkaniny w zależności od ich pozostałych parametrów: masy powierzchniowej i liczności nitek wątku. Można zauważyć tendencje do osiągnięcia lepszego wyniku badania akustycznego przez tkaniny o większych masach powierzchniowych i większej ilości nitek wątku na cm. Są to również parametry bezpośrednio od siebie zależne gdyż masa powierzchniowa rośnie przy zwiększeniu liczności nitek.



Rys. 5. Porównanie całkowitych spadków ciśnienia akustycznego do parametrów tkanin: masy powierzchniowej, liczności nitek wątku [18]

Źródło: opracowanie własne na podstawie wyników badań.

Jak widzimy wzrost liczby nitek utrudnia przechodzenie dźwięku pomiędzy pasmami przędzy, zatem pochłanianie dźwięku miało miejsce w materiale. Stąd największy wpływ na absorpcję dźwięku przez tkaniny z opisanych parametrów mają masa powierzchniowa i liczność nitek wątku. Wzmacniają one strukturę splotu atlasowego, który ma lepsze właściwości redukujące dźwięk niż inne typy splotów. Przedstawione badania spełniły warunki weryfikacji zakładanych teoretycznych właściwości tkanin, co było głównym celem pracy dyplomowej jednej z autorek niniejszej pracy [18].

5. Podsumowanie

W zakresie niskich częstotliwościach akustycznych, zgodnie z oczekiwaniami na podstawie innych badań [np. 3], praktycznie żadna z badanych tkanin nie wykazała odpowiednich teoretycznych właściwości pochłaniania dźwięku. Niskie częstotliwości dźwięku są najtrudniejsze do pochłaniania, nie tylko dla materiałów tekstylnych, ale również wszelkiego rodzaju budowlanych, gdzie jest to poważnym problemem [12].

W przedstawionych badaniach tkaniny o splotach rypсовym i atlasowym wykazały się najlepszymi zdolnościami pochłaniania dźwięku w zakresie częstotliwości 250 – 2000 Hz. Tendencja wzrostu pochłaniania dźwięku wraz ze wzrostem częstotliwości sugeruje dobre właściwości absorbowania dźwięku przez tkaniny w pasmach wysokich częstotliwości, obejmujących również częstotliwości ludzkiej mowy. Stwarza to możliwości ich zastosowania jako dodatkowych elementów wyposażenia, np. w salach konferencyjnych oraz innych pomieszczeniach.

Oprócz zalet wytłumiania akustycznego, ze względu na zaprojektowane wzory, mogą one stanowić dodatkowe ciekawe instalacje artystyczne, podwyższające walory pomieszczeń, w których zostaną zastosowane. Największą barierowość akustyczną osiągnęła tkanina o splocie atlasowym, której struktura jest najbardziej obiecująca w kontekście dalszych badań. W kolejnych badaniach ten splot może posłużyć do budowania bardziej złożonych struktur tkanych.

Tkaniny o splotach płóciennym i skośnym prezentują płaskie charakterystyki częstotliwościowe, o niższej absorpcji dźwięku. Może to stanowić podstawę do badań dla tych tkanin z innymi masami powierzchniowymi oraz licznością nitek wątku i osnowy. Daje to możliwości ich zastosowania przez architektów wewnątrz w maskowaniu źródeł dźwięku przy użyciu tkanin o ciekawych wzorach artystycznych, np. w salach koncertowych.

Dobrymi wynikami pochłaniania dźwięku wykazała się tkanina o splocie rypсовym, i to pomimo posiadania luźnej struktury splotu. Dla jej ustabilizowania, w dalszych badaniach, przewiduje się zwiększenie liczności nitek wątku.

Podczas przeprowadzonych badań nie zauważono znaczącej zależności grubości tkanin względem ich zdolności do absorpcji dźwięku. Warto jednak zaznaczyć, że

bazowano na niewielkich różnicach wartości tego parametru. We wszystkich tkaninach występowały podobne licznosci nitek osnowy stąd brak możliwości bardziej szczegółowego porównania tego parametru do właściwości absorpcyjnych badanych próbek. Bedzie to celem kolejnych planowanych badań.

Najważniejszymi parametrami w kontekście absorpcji dźwięku okazały się masa powierzchniowa i licznosc nitek wątku, co potwierdza tezy wysunięte również przez innych badaczy [1, 2, 7].

Przeprowadzone testy wykazały nowe możliwości zastosowania przebadanych tkanin. Należy również zwrócić uwagę, że wszystkie testy zostały przeprowadzone w pomieszczeniu specjalnie przeznaczonym do badań tego typu. Zastosowanie nowych strategii pomiaru, z wykorzystaniem nowoczesnych technik pomiarowych, w środowisku odpowiadającym rzeczywistym warunkom eksploatacji badanych tkanin, umożliwiło uzyskanie wyników najbardziej wiarygodnych z punktu badań akustycznych.

Przeprowadzone badania są testem wstępnymi, na podstawie których przewiduje się zaprojektowanie nowoczesnych tkanin z podwyższonymi właściwościami eksploatacyjnymi oraz akustycznymi.

Literatura

- [1] **Soltania P., Zarrebini M.**, *Acoustic Performance of Woven Fabrics in Relation to Structural Parameters and Air Permeability*, Journal of the Textile Institute 2013, vol. 104, issue 9, ss. 1011-1016.
- [2] **Barburski M., Blaszczyk J.R., Pawliczak Z.**, *Influence of Designs of Weaves on Acoustic Attenuation of Fabrics*, Journal of Industrial Textiles 2019, Vol. 49(I), ss. 33-45.
- [3] **Memon H., Abro Z.A., Ahmed A., Khoso N.A.**, *Considerations while Designing Acoustic Home Textiles*, Journal of Textile and Apparel Technology and Management 2015, vol. 9, nr 3.
- [4] **Kalebek N. A.**, *Sound Absorbing Polyester Recycled Nonwovens for the Automotive Industry*, FIBRES & TEXTILES in Eastern Europe 2016., Vol. 24, ss. 107-113.
- [5] **Asdrubali, F., Schiavoni, S., Horoshenkov, K.**, *A Review of Sustainable Materials for Acoustic Applications*, Journal of Building Acoustics 2012, Vol. 19, ss. 283-312.
- [6] **Atkinson C.**, *False Twist Textured Yarns*, Woodhead Publishing Limited., Cambridge 2012.
- [7] **Young A.K, Lee E. N., Lee K.C., Choi S.M., Shi E.J.**, *Acoustic Properties of Sound-Absorbing Polyester Fabrics Woven with Thick Staple and Thin Draw*

- Textured Yarn for Use in Interior Decoration*, The Journal of the Textile Institute 2018, Vol. 110, ss. 202-210.
- [8] **Blaszczyk J.R., Comte-Bellot G., Smolny A.**, *New Aeroacoustic Facility at the Institute of Turbomachinery*, Technical University of Lodz, ZN CMP-Turbomachinery 2005, Vol. 128, ss. 79–86.
- [9] **Blaszczyk J.R.**, *Experimental Investigations of a Turbine Stage Load on Boundary Layers and Noise Generation. Report of the Scientific Project Nr 4T10B04323 (769/T10/2002/23)*, Polish State Committee for Scientific Research, 2005.
- [10] **Blaszczyk J.R.**, *Flow Noise Correlation with Efficiency and Vibration Level*, J. System Science 2006, Vol. 11, ss. 8–15.
- [11] **Blaszczyk J.R.**, *Acoustic Characteristics of an Anechoic Chamber with an Axial Two-Stage LP Model Turbine – Comparative Study*, ZN CMP-Turbomachinery 2016, Vol. 149, ss. 7–16.
- [12] **Kuttruff H.**, *Room Acoustics*, Spon Press, New York 2009.
- [13] **Grosveld F.W.**, *Calibration of the Structural Loads and Transmission Facility at NASA Langley Research Center* [in:] *International Congress on Noise Control Engineering, Vol. 3*, INCE, Fort Lauderdale 1999, ss.1541–1546.
- [14] **Blaszczyk J.R.**, *Performance Improvement and Noise Reduction through Vane and Blade Indexing of a Two-Stage Turbine* [in:] *14th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (29th AIAA Aeroacoustics Conference)*, Vancouver 2008, ss.2008–2941.
- [15] **Blaszczyk J.R.**, *Experimental Studies of the Impact of Changes in Vortex Structures on the Flow Field and the Acoustics of the Turbine. Scientific Report N513 007 31/1260*, Polish State Committee for Scientific Research, 2009.
- [16] **Blaszczyk J.R.**, *Noise Reduction through Vane and Blade Clocking of a Two-Stage Turbine*, *Advanced Vibration Engineering* 2012, Vol. 11, ss.121–129.
- [17] **Smolny A., Blaszczyk J.R.**, *Boundary Layer and Loss Studies on Highly Loaded Turbine Cascade. AGARD/NATO CP-571/4*, [in:] *Propulsion and Energetics Panel*, The Conference Proceedings, 85th Symposium on Loss Mechanisms and Unsteady Flows in Turbomachines, Derby 1995.
- [18] **Abramczyk K.**, *A research on acoustic properties of woven structures*, Unpublished Diploma Thesis, Faculty of Material Technology and Textile Design, Lodz University of Technology, Lodz September 2020.

ANALIZA WYBRANYCH WŁAŚCIWOŚCI TERMICZNYCH TKANIN MODYFIKOWANYCH POWIERZCHNIOWO POD KĄTEM ZASTOSOWANIA W GORĄCYM ŚRODOWISKU PRACY

Pamela Miśkiewicz, Magdalena Tokarska, Iwona Frydrych

Instytut Architektury Tekstyliów

Wydział Technologii Materiałowych i Wzornictwa Tekstyliów

Politechnika Łódzka

Centralny Instytut Ochrony Pracy - Państwowy Instytut Badawczy (CIOP-PIB) wraz z Politechniką Łódzką w latach 2010-2012 realizował projekt „Elaboration of new type of protective gloves from basalt fibers for hot workplaces” o akronimie „Baglo”. W ramach projektu opracowano i wytworzono nowe rękawice chroniące przed czynnikami gorącymi oraz mechanicznymi, przy jednoczesnym zachowaniu wysokiego komfortu użytkownika. Zastosowano tkaniny z przędz bazaltowych, które następnie zostały poddane procesowi aluminizowania.

W kolejnych etapach realizacji projektu aluminizowane tkaniny bazaltowe, z których wytwarzano prototypy rękawic ochronnych oceniano biorąc pod uwagę kryteria dotyczące parametrów termicznych i mechanicznych według norm odnoszących się do środków ochrony indywidualnej [1,2], w tym rękawic ochronnych [3,4]. Zaobserwowano, że w wytworzonym nowym rozwiązaniu rękawic ochronnych podczas procesu konfekcjonowania występują pęknięcia na szwach oraz ścieranie warstwy aluminium [5,6], co prowadzi do utraty właściwości ochronnych i trwałości rękawic. Uzyskano również niską odporność na ciepło kontaktowe. Nowy model rękawic ochronnych w odniesieniu do czynników gorących był odporny na działanie ciepła kontaktowego jedynie dla temperatury 100°C, natomiast wykazywał najwyższy czwarty poziom skuteczności ochrony na działanie promieniowania cieplnego. Ponadto z punktu widzenia użytkownika tkaniny bazaltowe nie są komfortowe, gdyż wywołują alergię w kontakcie ze skórą człowieka, dlatego konieczne jest na przykład ich laminowanie.

Oprócz właściwości zapewniających ochronę przed wysoką temperaturą, wyrób powinien zapewniać komfort fizjologiczny użytkownikowi, co jak zauważono [7] jest dość trudne do pogodzenia. Zauważono, że modyfikacja powierzchniowa materiałów włókienniczych prowadzi do poprawy ich wybranych właściwości np. antybakteryjnych, termicznych czy ekranujących. W zakresie właściwości termicznych przy użyciu metody rozpylania magnetronowego tkaninę aramidową pokryto warstwą aluminium [8]. Uzyskano w ten sposób znaczną poprawę odporności

materiału na promieniowanie ciepłe. Warstwy aluminium o różnej grubości nanoszono również na tkaninę poliestrową, poliamidową oraz będącą mieszanką bawełny z poliestrem [9]. Zaobserwowano, że wraz z grubością powłoki ulegał poprawie współczynnik przenikania ciepła.

Celem podjętych badań było otrzymanie nowych tkanin modyfikowanych powierzchniowo, które mogą znaleźć zastosowanie, jako środki ochrony indywidualnej kończyn górnych pracowników przebywających w gorącym środowisku pracy.

6. Materiały i metody badawcze

Przedmiotem badań były trzy modyfikowane powierzchniowo materiały włókiennicze, których podłoże stanowiły tkaniny: aramidowa, bazaltowa i bawełniana z wykończeniem trudnopalnym. Włókna aramidowe zapewniają skuteczną ochronę przed płomieniem i wysoką temperaturą [10]. Włókna bazaltowe mają niską przewodność cieplną, dlatego wykonane z nich tkaniny służą do ochrony przed ogniem i ciepłem [11]. Tkanina bawełniana z wykończeniem trudnopalnym chroni pracowników przed gorącem i płomieniem [12]. Wartości wybranych parametrów tkanin wraz ze współczynnikami zmienności wyrażonymi w procentach (%) przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka tkanin

Ozn.	Nazwa	Skład surowcowy	Producent	Grubość, mm	Masa powierzchniowa, g/m ²	Gęstość pozorna, kg/m ³
A	Tkanina aramidowa	98% włókna aramidowe, 2% włókna antystatyczne	DuPont	0,371 (5)	266 (6)	719
B	Tkanina bazaltowa	100% włókna bazaltowe	Basaltex	0,548 (4)	398 (8)	724
C	Tkanina bawełniana z wykończeniem trudnopalnym	100% włókna bawełniane	XinXiang YuLong Textile	0,658 (4)	376 (8)	570

Źródło: opracowanie własne na podstawie [10-12].

Tkanina aramidowa i tkanina bazaltowa mają zbliżoną gęstość pozorną, natomiast tkanina bazaltowa oraz tkanina bawełniana z wykończeniem trudnopalnym zbliżoną masę powierzchniową, jednakże wszystkie różnią się grubością.

Za pomocą metody rozpylania magnetronowego [13], po jednej (prawej) stronie każdej tkaniny, została naniesiona powłoka aluminium o grubości 5 μm .

Oceny odporności na ciepło kontaktowe modyfikowanych powierzchniowo tkanin dokonano w oparciu o normę ISO 12127-1:2016 [2] oraz EN 407:2004 [4]. Odporność na ciepło kontaktowe mierzona jest czasem progowym t_t potrzebnym do osiągnięcia przez próbkę ustalonej temperatury kontaktu (100°C, 250°C, 350°C i 500°C), przy czym przyrost temperatury nie może być większy niż 10°C w ciągu 15 s. Poziom skuteczności zostaje osiągnięty, gdy $t_t \geq 15,0$ s dla ustalonej temperatury kontaktu.

Ocenę odporności tkanin na ciepło promieniowania przeprowadzono w oparciu o normę ISO 6942:2002 [1] oraz EN 407:2004 [4]. Materiał zostaje poddany działaniu promieniowania o gęstości strumienia cieplnego 20 kW/m². Mierzony jest czas trwania wzrostu temperatury kalorymetru o 24°C, czyli tzw. współczynnik przenikania ciepła $RHTI_{24}$, wyrażony w sekundach. Wybrany poziom skuteczności zostaje osiągnięty w zależności od wartości uzyskanego współczynnika.

Ponadto dla tkanin określono następujące parametry cieplne: przewodność λ , dyfuzyjność a oraz absorpcyjność b . Badanie wykonano na przyrządzie Alambeta firmy Sensora. Dla każdej tkaniny przeprowadzono po 10 pomiarów dla tkaniny referencyjnej niemodyfikowanej, oraz dla tkaniny modyfikowanej oddzielnie dla prawej strony, która była modyfikowana metalem i dla lewej strony niemodyfikowanej.

Przewodność cieplna λ (inaczej współczynnik przewodzenia ciepła) wyrażona w $\text{Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ jest stałą właściwością materiałową, charakteryzującą materiał w stacjonarnych warunkach transportu ciepła. Przewodność cieplna określona jest wzorem:

$$\lambda = \frac{Q \cdot h}{S \cdot \Delta T} \quad (1)$$

gdzie: Q – strumień ciepła, S – powierzchnia materiału, ΔT – różnica temperatur po obu stronach materiału, h – grubość materiału.

Dyfuzyjność cieplna a wyrażona w mm^2s^{-1} jest specyficzną właściwością materiału, charakteryzującą przewodzenie ciepła w warunkach nieustalonych. Wartość ta pozwala określić, jak szybko materiał reaguje na zmiany temperatury. W tym przypadku jest ważna głębokość penetracji ciepła. Dyfuzyjność cieplna wyraża się wzorem:

$$a = \frac{\lambda}{\rho \cdot c_p} \quad (2)$$

gdzie: λ – współczynnik przewodzenia ciepła, ρ – gęstość materiału, c_p – ciepło właściwe materiału.

Absorpcyjność cieplna b wyrażona w $\text{Wm}^{-2}\text{s}^{1/2}\text{K}^{-1}$ jest właściwością powierzchniową, która pozwala ocenić charakter powierzchni tkaniny w kontakcie ze skórą. Materiały o niskiej wartości absorpcyjności cieplnej dają uczucie ciepła, natomiast tkaniny o wysokiej wartości absorpcyjności ciepła dają wrażenie chłodu. Absorpcyjność cieplną określa wzór:

$$b = \sqrt{\lambda \cdot \rho \cdot c_p} \quad (3)$$

gdzie: oznaczenia jak we wzorze (2).

7. Analiza wyników badań

Badania wybranych właściwości termicznych prowadzono dla wybranych tkanin przed modyfikacją ich powierzchni i po procesie modyfikacji powierzchni. W tabeli 2 zestawiono wartości czasu progowego t_t dla temperatury kontaktu 100°C oraz współczynnika przenikania ciepła $RHTI_{24}$.

Tabela 2. Średnie wartości współczynników t_t oraz $RHTI_{24}$ (w nawiasie podano współczynnik zmienności wyrażony w procentach %).

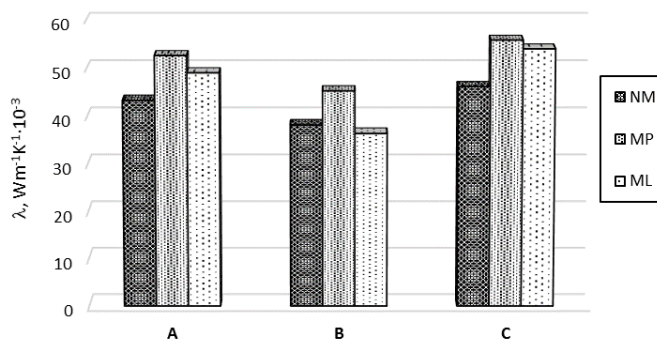
Ozn.	Przed modyfikacją		Po modyfikacji	
	t_t , s	$RHTI_{24}$, s	t_t , s	$RHTI_{24}$, s
A	12,33 (0,5)	12,65 (2,3)	11,88 (0,4)	23,19 (0,5)
B	10,83 (1,9)	12,60 (2,4)	11,20 (2,4)	24,20 (1,2)
C	12,54 (0,4)	14,50 (2,8)	12,58 (0,4)	20,29 (2,0)

Źródło: opracowanie własne.

Z tabeli 2 wynika, że żadna z tkanin, ani przed ani po procesie modyfikacji nie osiągnęła wartości t_t równej lub większej niż 15,0 s. Zatem pierwszy poziom skuteczności ochrony przed ciepłem kontaktowym dla przyjętej temperatury kontaktu nie został osiągnięty. Najbliżej spełnienia tego kryterium była aluminiowana tkanina bawełniana C z wykończeniem trudnopalnym. Drugi poziom skuteczności ochrony przed ciepłem promieniowania został osiągnięty przez wszystkie tkaniny zmodyfikowane powierzchniowo ($RHTI_{24} > 20$ s), przy czym najlepszy wynik zanotowano dla modyfikowanej tkaniny bazaltowej.

Wyniki badań przewodności cieplnej tkanin przed modyfikacją powierzchni (NM) i po modyfikacji pokazano na rys. 1. Ze względu na fakt, iż dokonano

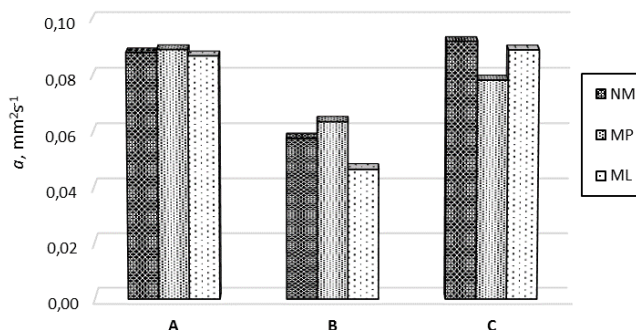
modyfikacji jednej strony każdej tkaniny, uzyskane wyniki pomiarów pokazano dla prawej (MP) i lewej (ML) strony modyfikowanej tkaniny. Współczynnik zmienności wyników pomiarów przewodności cieplnej λ nie przekraczał 5%.



Rys. 1. Wyniki badań przewodności cieplnej tkanin (NM - tkanina niemodyfikowana, MP - prawa strona tkaniny modyfikowanej, ML - lewa strona tkaniny modyfikowanej)

Źródło: opracowanie własne.

Przewodność cieplna to zdolność materiału do przewodzenia ciepła przez tworzywo włókien. W tych samych warunkach mniej ciepła przepłynie przez substancję o mniejszej przewodności cieplnej. Z rys. 1 wynika, że najlepsza pod tym względem jest tkanina bazaltowa B zarówno modyfikowana, jak i niemodyfikowana powierzchniowo. Tkaninę przed modyfikacją oraz stronę niealuminizowaną tkaniny po modyfikacji charakteryzuje porównywalna wartość współczynnika przewodzenia ciepła λ . Wprawdzie przewodność cieplna strony modyfikowanej tkaniny B jest porównywalna z wartością przewodności cieplnej niealuminizowanej tkaniny bawełnianej C, ale modyfikacja pozwoliła osiągnąć drugi poziom skuteczności ochrony przed ciepłem promieniowania.



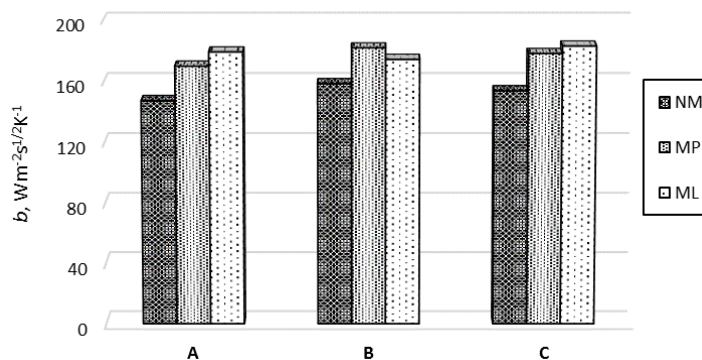
Rys. 2. Wyniki badań dyfuzyjności cieplnej tkanin (NM - tkanina niemodyfikowana, MP - prawa strona tkaniny modyfikowanej, ML - lewa strona tkaniny modyfikowanej)

Źródło: opracowanie własne.

Wyniki badań dyfuzyjności cieplnej tkanin przed i po modyfikacji pokazano na rys. 2 (oznaczenia jak na rys. 1). Współczynnik zmienności wyników pomiarów nie przekraczał 10%.

W badaniu dyfuzyjności cieplnej istotne są dla nas wyniki otrzymane dla lewej, niemodyfikowanej strony tkaniny (ML), ponieważ tkanina ma być zastosowana w części dłoniowej rękawicy ochronnej, zatem jej lewa strona będzie miała bezpośredni kontakt ze skórą. Najniższą dyfuzyjność cieplną posiada tkanina bazaltowa B, co oznacza że najwolniej ze wszystkich modyfikowanych i niemodyfikowanych tkanin reaguje na zmiany temperatury. Wynika to z największej masy powierzchniowej i gęstości pozornej, co stanowi barierę dla penetracji ciepła. Wyniki badań absorpcyjności cieplnej tkanin przed i po modyfikacji pokazano na rys. 3 (oznaczenia jak na rys. 1). Współczynnik zmienności wyników pomiarów nie przekraczał 8%.

Z punktu widzenia komfortu użytkownika oczekuje się wysokiej absorpcyjności cieplnej tkanin od strony powierzchni kontaktu materiału ze skórą. Ze względu na poprawę odporności tkanin aluminizowanych na ciepło promieniowania jest to powierzchnia tkaniny oznaczona ML. Badania wykazały, że dla wszystkich tkanin wrażenie uczucia chłodu wzrosło na skutek ich modyfikacji powierzchniowej. Różnice wartości absorpcyjności cieplnej pomiędzy lewą i prawą stroną tkanin nie są duże, dla tkaniny Nomex różnica wynosi 5,2%, dla tkaniny bazaltowej 4,1%, natomiast dla bawełny z wykończeniem trudnopalnym 2,7%. Należy jednak zwrócić uwagę, że tkanina bazaltowa w bezpośrednim kontakcie ze skórą może wywoływać alergię.



Rys. 3. Wyniki badań absorpcyjności cieplnej tkanin (NM - tkanina niemodyfikowana, MP – prawa strona tkaniny modyfikowanej, ML – lewa strona tkaniny modyfikowanej)

Źródło: opracowanie własne.

8. Podsumowanie

Modyfikacja powierzchni tkanin umożliwia poprawę ich właściwości termicznych zarówno ochronnych, jak i tych związanych z komfortem użytkowania, a co za tym idzie wytycza kierunek poszukiwania nowych wyrobów mających zastosowanie w gorącym środowisku pracy. Tkaniny: aramidowa, bazaltowa i bawełniana z wykończeniem trudnopalnym poddane procesowi aluminizowania wykazały odporność na ciepło promieniowania określoną drugim poziomem skuteczności ochrony. Z punktu widzenia przewodności cieplnej najlepszym materiałem jest tkanina bazaltowa B. Druga w kolejności ze względu na przewodność cieplną jest tkanina aramidowa A, a ze względu na dyfuzyjność cieplną - tkanina bawełniana C. Z punktu widzenia komfortu użytkownika, najlepszymi materiałami są tkaniny A i C. Dla obu tych tkanin uzyskano największą wartość absorpcyjności cieplnej od strony powierzchni oznaczonej jako ML, czyli lewej strony tkaniny modyfikowanej. Wobec tego, użytkownik rękawic ochronnych stosowanych w gorącym środowisku pracy, gdzie częścią dłoniową rękawicy może być jedna z tych tkanin, dozna zwiększonego uczucia chłodu od strony ML powierzchni kontaktu tkaniny ze skórą. Tkanina bazaltowa może stać się najlepszym wyborem pod warunkiem, że jej alergiczne oddziaływanie na skórę zostanie zneutralizowane np. poprzez laminowanie. Taki zabieg wymaga oczywiście sprawdzenia, czy i w jakim stopniu laminowanie zmieni jej właściwości cieplne.

9. Literatura

- [1] **ISO 6942:2002.** Protective Clothing. Protection Against Heat and Fire. Method of Test: Evaluation of Materials and Materials Assemblies When Exposed to a Source of Radiant Heat.
- [2] **ISO 12127-1:2016.** Clothing for Protection Against Heat and Flame. Determination of Contact Heat Transmission Through Protective Clothing or Constituent Materials. Part 1: Contact Heat Produced by Heating Cylinder.
- [3] **PN-EN 420+A1:2012.** Protective Gloves. General Requirements and Test Methods.
- [4] **EN 407:2004.** Protective Gloves Against Thermal Risks (Heat and/or Fire).
- [5] **Hrynyk R., Frydrych I.,** *Study on textile assemblies with aluminized basalt fabrics destined for protective gloves*, International Journal of Clothing Science and Technology 2015, Vol. 27, nr 5, ss. 1-17.
- [6] **Hrynyk R., Frydrych I., Irzmańska E., Stefko A.,** *Thermal properties of aluminized and non-aluminized basalt fabrics*, Textile Research Journal 2012, Vol. 83, nr 17, ss. 1860-1872.

- [7] **Miśkiewicz P., Frydrych I. Tokarska M., Pawlak W.,** *Study on some thermal and electrical properties of basalt fabric modified with metal and ceramics as a result of magnetron sputtering*, Polymers 2019, Vol. 11, nr 12, ss. 1-15.
- [8] **Zhai Y., Liu X., Xiao L.,** *Magnetron sputtering coating of protective fabric study on influence of thermal properties*, Journal of Textile Science and Technology 2015, Vol.1, nr 3, ss. 127-134.
- [9] **Han H.R., Park Y., Yun C., Park C.H.,** *Heat transfer characteristics of aluminum sputtered fabrics*, Journal of Engineered Fibers and Fabrics 2018, Vol. 13, nr 3, ss. 37-44.
- [10] Dupont, *Nomex® Fibers for Heat- and Flame-Resistant Protection*, online, www.dupont.com/products/nomex-fibers.html [dostęp: 23.03.2020].
- [11] Basalt Fiber Tech, *High Temperatures*, online, www.basaltft.com/prop/fire.htm [dostęp: 23.03.2020].
- [12] Yulong Safety, *Cotton Arc Proof Fabric*, online, www.yulongfrtex.com/fabric/cotton-arc-proof-fabric [dostęp: 23.03.2020].
- [13] **Wei Q.,** *Surface modification of textiles*, Woodhead, Sawston 2009.