

## Metody mikroskopowe w ocenie procesów wykończania wyrobów włókienniczych

Evaluation of finishing processes for textile products using the microscopic methods

Waldemar Machnowski\*, Henryk Wrzosek

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

---

### **Streszczenie**

Badanie wyrobów włókienniczych odgrywa istotną rolę w systemie zapewnienia jakości tekstyliów, a także w pracach nad rozwojem nowych technologii i produktów włókienniczych. Istnieje wiele metod oceny struktury i właściwości włókien i wyrobów włókienniczych. Bardzo ważne miejsce wśród tych metod zajmują techniki mikroskopowe, w szczególności mikroskopia optyczna i skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM). W artykule podano krótki przegląd możliwych zastosowań metod mikroskopowych do analizy efektów niektórych operacji wytwarzania tekstyliów. Wykorzystanie mikroskopu optycznego umożliwiło identyfikację przyczyn powodujących nierównomierność barwy wyrobów bawełnianych. Z przeglądu literatury oraz doświadczeń własnych autorów wynika, że metody mikroskopowe stanowią cenne narzędzie w badaniu włókien i wyrobów włókienniczych.

### **Abstract**

Fabric testing plays an important role in the quality assurance system and in the development of new textile technologies and products. There are many test methods used to evaluate the structure and properties of fibers and textile materials. Among these methods, microscopic techniques – especially optical microscopy and scanning electron microscopy (SEM) – are one of the most important methods. This paper provides a brief overview of the possible uses of the microscopic methods for determining the results of some textile manufacturing processes.

A review of the literature and the authors' experiences in this field indicate that microscopic methods are a valuable tool for the testing and assessing the performance of fibers and textile products.

*Słowa kluczowe:* mikroskopia optyczna, skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM), bawełna, jakość tekstyliów, procesy wykończania tekstyliów

*Keywords:* optical microscopy, scanning electron microscopy (SEM), cotton, textiles quality, textile finishing processes

---

\*autor korespondencyjny: dr inż. Waldemar Machnowski: waldemar.machnowski@p.lodz.pl

## **1. Wprowadzenie**

Badania wyrobów włókienniczych są nieodłącznym elementem systemu zapewnienia ich jakości. Wyroby, po dokonaniu pełnego przewidzianego dla nich procesu wykończenia, poddawane są różnym testom w celu określenia podstawowych parametrów użytkowych i estetycznych. Wyniki tych testów stanowią o jakości wyrobu włókienniczego, są podstawowym kryterium jego przydatności do określonych zastosowań, a jednocześnie świadczą o prawidłowości przeprowadzenia wszystkich operacji technologicznych składających się na proces wytwarzania danego wyrobu. Tak więc, badanie produktów tekstylnych jest zagadnieniem bardzo istotnym, nie tylko z punktu widzenia użytkownika i towaroznawcy, ale również dla ich producenta, technologa.

Analiza wyników badań najważniejszych cech wyrobu włókienniczego stanowić powinna punkt wyjścia, podstawę do podejmowania decyzji o wprowadzaniu zmian przebiegu określonych operacji technologicznych w celu uzyskania poprawy jakości wyrobu. O jakości produktu włókienniczego, rozumianej jako stopień zaspokojenia oczekiwań i potrzeb użytkownika tego wyrobu, stanowi zespół kilku, bądź nawet kilkunastu cech, które łącznie determinują jego wartość użytkową, przydatność do określonego zastosowania.

Do właściwości o podstawowym znaczeniu, określanych dla wielu różnych asortymentów wyrobów włókienniczych, należą: parametry mechaniczne (wytrzymałość na rozciąganie i rozdzieranie, odporność na ścieranie, skłonność do pillingu) oraz odporność wybarwień na światło, tarcie i czynniki mokre. W przypadku wyrobów włókienniczych przeznaczonych na odzież bardzo istotne są również takie właściwości jak: ciepłochronność, przepuszczalność powietrza oraz zdolność do transportu pary wodnej, które łącznie decydują o komforcie użytkowania wykonanych z nich wyrobów. Tekstylia, które podczas użytkowania mogą być narażone na kontakt z wodą, płomieniem lub agresywnymi substancjami chemicznymi badane są również pod kątem odporności na te czynniki.

Obecnie do badania ww. właściwości użytkowych wyrobów włókienniczych wykorzystuje się najczęściej metody opisane w normach międzynarodowych (ISO) lub europejskich (EN). Wiele norm ISO, po przyjęciu przez Europejski Komitet Normalizacyjny (CEN), ma również status Norm Europejskich (EN ISO). Polska, będąc członkiem CEN, jest zobowiązana do nadawania wszystkim Normom Europejskim (EN i EN ISO) statusu Polskich Norm (PN).

Należy zwrócić uwagę, że oprócz badań prowadzonych według znormalizowanych procedur badawczych podejmowane są także bardzo różnorodne testy włókien oraz produktów włókienniczych (na każdym etapie ich wytwarzania), których metodyka przyjmowana jest doraźnie, w zależności od konkretnej sytuacji i celu, jakiemu dany test ma służyć. Badania takie, niepodlegające żadnym znormalizowanym procedurom, prowadzone są w wielu ośrodkach naukowych, a także w laboratoriach zakładów produkcyjnych. Podejmowane są zawsze, gdy istnieje konieczność wyjaśnienia przyczyn zakłóceń przebiegu procesu produkcyjnego, bądź zidentyfikowania i usunięcia przyczyn niezyskiwania żądanych parametrów jakościowych wyrobu włókienniczego. Testy włókien, półproduktów i wyrobów tekstylnych charakteryzujące się pełną dowolnością stosowania aparatury badawczej oraz niczym nieskrępowanym doborem metodyki badań są nieodłącznym elementem prac eksperymentalnych mających na celu poznanie mechanizmów wielu zjawisk, istotnych w procesie wytwarzania lub użytkowania tekstyliów. Są także przedmiotem prac podejmowanych w celu wytworzenia innowacyjnego produktu tekstylnego lub wprowadzenia istotnej modyfikacji technologii. Do prowadzenia tego rodzaju badań wykorzystuje się nie tylko przyrządy pomiarowe przeznaczone do wykonywania testów wyrobów tekstylnych według znormalizowanych metod badawczych, ale również aparaturę stosowaną w wielu innych obszarach nauki, m.in. w chemii, biologii i fizyce polimerów.

Bardzo przydatne i często stosowane są techniki spektroskopowe, zarówno w zakresie podczerwieni (FTIR), światła widzialnego, jak i w zakresie ultrafioletu, metody chromatograficzne (HPLC, GC), techniki rentgenowskie oraz metody mikroskopowe – mikroskopia optyczna, skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM), a od kilku lat również mikroskopia sił atomowych (AFM).

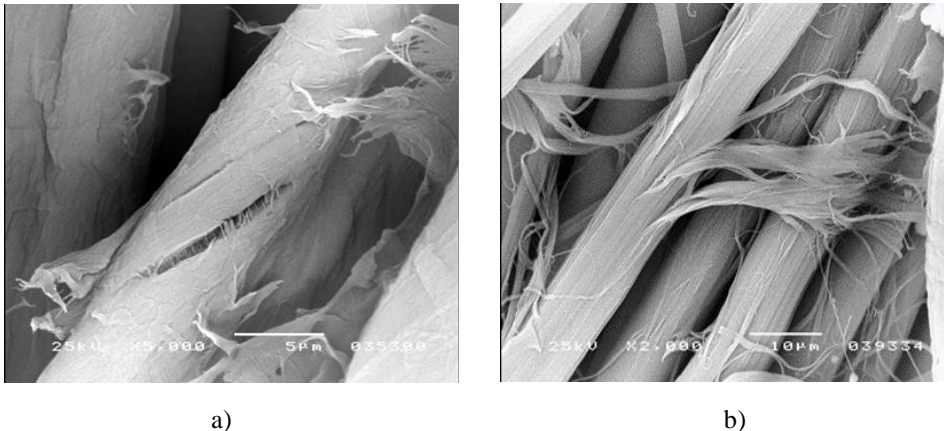
Celem pracy było przedstawienie możliwości wykorzystania mikroskopii optycznej i elektronowej do oceny niektórych efektów wykończenia wyrobów tekstylnych, a w szczególności do analizy cech makroskopowych włókien oraz oceny porównawczej struktury przestrzennej różnych wyrobów tekstylnych.

## **2. Analiza zmian cech makroskopowych włókien podczas niektórych procesów modyfikacji wyrobów włókienniczych**

Wiele operacji wykonywanych w procesie wykończania wyrobów włókienniczych nie wywiera zauważalnego wpływu na obraz mikroskopowy włókien tworzących te wyroby. Prawidłowo przeprowadzone pranie wstępne, bielenie, barwienie, drukowanie, a także apretowanie wyrobów z powszechnie stosowanych włókien, z reguły nie powoduje zmian ich cech makroskopowych. Kształt przekroju poprzecznego oraz mikrotopografia powierzchni włókien bawełny, lnu, wełny, sztucznych włókien celulozowych i włókien syntetycznych w wyrobach przed i po wykonaniu tych operacji pozostają zazwyczaj niezmienione. Jednakże niektóre zakłócenia przebiegu wymienionych operacji wykończalniczych mogą prowadzić do niekontrolowanego wystąpienia niepożądanych zjawisk, np. fibrylizacji włókien celulozowych (szczególnie wysoką podatność na to uszkodzenie przejawiają sztuczne włókna celulozowe typu *lyocell*), zmian kształtu przekroju poprzecznego termoplastycznych włókien syntetycznych.

Przykłady uszkodzeń powierzchni włókien, powstałych podczas zbyt intensywnego procesu prania wyrobów, przedstawiono na Rys. 1. Takie zmiany powierzchni włókien prowadzą do miejscowego zróżnicowania powierzchni wyrobu włókienniczego.

Jeśli opisana sytuacja dotyczy wyrobu barwionego, często można odnieść wrażenie, że obserwowana wada jest spowodowana błędami popełnionymi podczas barwienia. Należy jednak podkreślić, że w takich przypadkach nie można mówić o „nierównomierności wybarwienia”. Postrzegana niejednorodność barwy wyrobu jest bowiem efektem innego sposobu odbijania światła, efektem zmienionej „optyki” tych fragmentów wyrobu, w których doszło do niekontrolowanych zmian cech makroskopowych włókien. Poprawna, wnikliwa analiza tego typu błędów, wykazanie, że właśnie zmiany cech makroskopowych włókien są odpowiedzialne za powstałe problemy, jest możliwa praktycznie tylko przy wykorzystaniu metod mikroskopowych. Szczególnie przydatna, z uwagi na wysoką rozdzielczość i dużą głębię ostrości, jest tu skaningowa mikroskopia elektronowa (SEM). W wielu przypadkach możliwe jest także wykorzystanie mikroskopu optycznego.

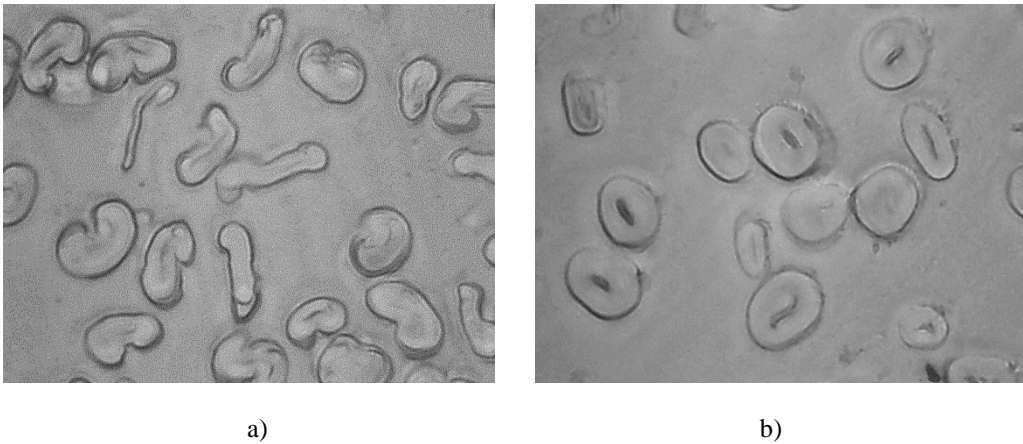


**Rys. 1.** Obrazy mikroskopowe (SEM) powierzchni uszkodzonych włókien a) bawełna (powiększenie 5000x), b) włókna lyocell (powiększenie 2000x) [źródło: opracowanie własne].

Przedstawiony wyżej przykład możliwości wykorzystania techniki mikroskopowej dotyczył identyfikacji niezamierzonych i niepożądanych zmian budowy włókien, będących źródłem powstawania błędów w wyrobach włókienniczych. Istnieją również procesy wykończalnicze i procesy modyfikacji wyrobów tekstylnych, w których zmiany makrostruktury włókien są jak najbardziej zamierzone i pożądane, a stopień tych zmian jest często wskaźnikiem poprawności przebiegu tych operacji.

Jako przykłady można wskazać merceryzację tkanin bawełnianych, obróbkę enzymatyczną, np. tkanin lnianych lub wyrobów z włókien poliestrowych oraz obróbkę plazmą niskotemperaturową, m.in. włókien wełny lub wyrobów z włókien poliestrowych.

Proces merceryzacji wykonywany w celu poprawy jakości tkanin bawełnianych, polegający na poddaniu ich działaniu stężonego roztworu wodorotlenku sodu, powoduje zawsze wyraźną, trwałą zmianę kształtu przekroju poprzecznego włókien bawełny [1, 2]. Testem rozstrzygającym, który pozwala odróżnić tkaninę merceryzowaną od niemerceryzowanej, prostszym od testu chemicznego, jest obserwacja kształtu przekroju poprzecznego włókien bawełny pobranych z tych tkanin. Obserwacji tej można dokonać wykorzystując mikroskop optyczny. Na Rys. 2 przedstawiono obrazy mikroskopowe włókien bawełny pochodzących z tkaniny przed i po merceryzacji.

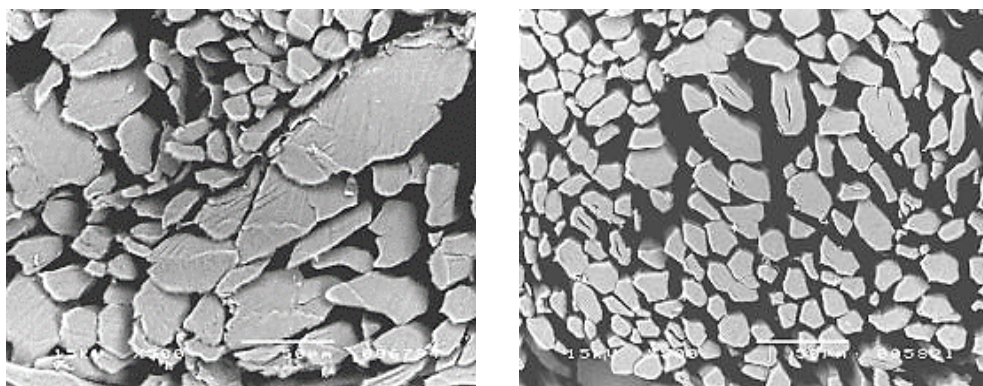


**Rys. 2.** Obrazy przekrojów poprzecznych włókien bawełny (mikroskop optyczny): a) w tkaninie nie merceryzowanej, b) w tkaninie po merceryzacji [źródło: opracowanie własne].

Włókna bawełny w procesie merceryzacji pęcznieją, ich przekroje poprzeczne tracą charakterystyczny kształt fasolki, stają się zbliżone do kształtu kołowego. Jeśli porównawcza analiza mikroskopowa przekrojów poprzecznych włókien bawełny pobranych z tkanin przed i po merceryzacji, nie wykazałaby wyraźnych różnic, oznaczałoby to, że proces merceryzacji został przeprowadzony nieprawidłowo, był nieskuteczny, a poddana tej obróbce tkanina nie zyskała poprawy jakości w spodziewanym stopniu.

Znane są metody obróbki wstępnej przędz i tkanin lnianych, polegające na zastosowaniu preparatów enzymatycznych. Liczne badania wykazały, że poddanie wyrobów lnianych biochemicznej obróbce wstępnej, z wykorzystaniem enzymów należących do grup pektynaz, celulaz i hemicelulaz, prowadzi do wyraźnego wzrostu efektywności następujących po niej operacji bielenia i barwienia [3, 4]. Obserwuje się także pozytywny wpływ zastosowania enzymów na właściwości użytkowe tkanin lnianych. W następstwie modyfikacji enzymatycznej, zyskują one miękkość i delikatność, niemożliwe do osiągnięcia przy stosowaniu tradycyjnych metod obróbki [5].

Stosunkowo prostym i w pełni przekonującym, wiarygodnym sposobem wyjaśnienia tej pozytywnej roli enzymów w procesie wykończenia wyrobów lnianych, jest analiza mikroskopowa zmian struktury morfologicznej włókien lnu następujących podczas obróbki biochemicznej. Na Rys. 3 zaprezentowano obrazy mikroskopowe przekroju poprzecznego przędz przed i po obróbce enzymatycznej.



a)

b)

**Rys. 3.** Obrazy mikroskopowe (SEM) przekrojów poprzecznych włókien lnu (pow. 500 x):  
a) przed obróbką, b) po obróbce enzymatycznej [źródło: opracowanie własne].

Obrazy te uwidaczniają częściową, ale wyraźnie zaznaczoną fragmentację dużych zespołów włókien elementarnych, która następuje w wyniku obróbki biochemicznej. W obrazie przekroju przędzy po obróbce (Rys. 3b) występują liczne pojedyncze komórki włókniste oraz odseparowane od siebie niewielkie zespoły włókien elementarnych.

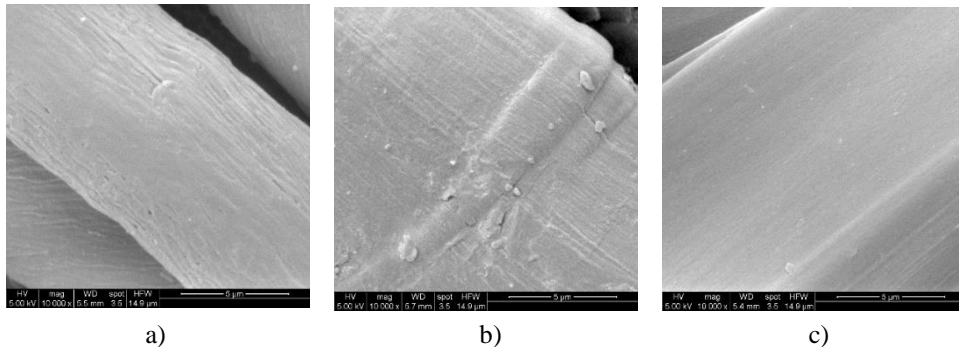
Natomiast w obrazie przędzy przed modyfikacją (Rys. 3a) obserwuje się duże kompleksy, złożone z kilkunastu, a nawet kilkudziesięciu silnie zespolonych ze sobą włókien elementarnych. Widoczne na Rys. 3 różnice struktury morfologicznej włókien lnu poddanych obróbce enzymatycznej, w stosunku do włókien przed tą operacją, w pełni wyjaśniają wspomniany wyżej pozytywny wpływ enzymatycznej obróbki wstępnej na przebieg procesu bielenia i barwienia wyrobów lnianych, ale także na ich właściwości użytkowe.

Plazma niskotemperaturowa, wykorzystywana w wielu dziedzinach techniki, znajduje również zastosowanie w niektórych procesach modyfikacji włókien i wyrobów tekstylnych. Celem obróbki plazmowej w tym obszarze stosowania jest najczęściej modyfikacja powierzchni włókien, a w szczególności aktywacja chemiczna (wytworzenia grup aktywnych na powierzchni biernych chemicznie włókien, np. PP, PES) oraz wytrawianie powierzchni włókien, co prowadzi do zmiany jej mikrotopografii i zwiększenia zewnętrznej powierzchni właściwej [6, 7]. Dzięki temu ulegają poprawie właściwości adhezyjne powierzchni włókien, co jest szczególnie istotne w przypadku wyrobów z włókien syntetycznych (np. PP, PES i PA) przeznaczonych do laminowania, powlekania, wytwarzania kompozytów i tym podobnych. Do oceny efektu modyfikacji plazmowej wyrobów włókienniczych, wykonywanej w celu zwiększenia stopnia rozwinięcia powierzchni włókien, wykorzystywana jest powszechnie metoda skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM), pozwalająca zarejestrować charakterystyczne szczegóły mikrostruktury powierzchni z rozdzielczością do 1 nm.

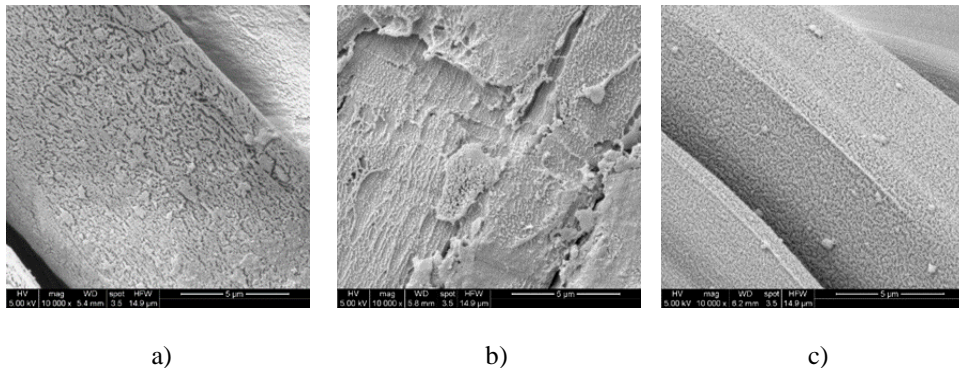
W biologii i medycynie, ale również w innych obszarach, m.in. w pracach dotyczących konserwacji tkanin zabytkowych, wykorzystuje się właściwości biobójcze plazmy niskotemperaturowej [8, 9]. Rys. 4a i 4b przedstawia obrazy mikroskopowe włókien bawełny, lnu i jedwabiu wypreparowanych z tkanin po poddaniu ich obróbce plazmowej w czasie 10 min w celu dezynfekcji [10]. Widoczne zmiany mikrotopografii powierzchni włókien na skutek działania plazmy niskotemperaturowej są w tym przypadku niezamierzonym „efektem ubocznym” wykonanego procesu.



Przykład ten ilustruje przydatność mikroskopii elektronowej do analizy zmian struktury powierzchni włókien, następujących podczas obróbki plazmowej.



**Rys. 4a.** Obrazy SEM powierzchni włókien bawełny przed obróbką w środowisku plazmy niskotemperaturowej (a), lnu (b) i jedwabiu (c) (powiększenie 10 000 x)  
[źródło: opracowanie własne].

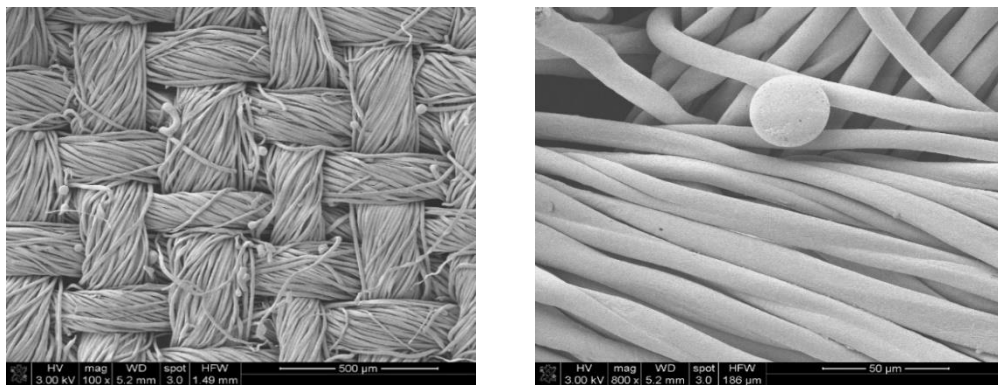


**Rys. 4b.** Obrazy SEM powierzchni włókien bawełny po obróbce w środowisku plazmy niskotemperaturowej (a), lnu (b) i jedwabiu (c) (powiększenie 10 000 x)  
[źródło: opracowanie własne].

Tkaniny bawełniane, a także inne tkaniny celulozowe, w tym wyroby z niewielkim udziałem włókien syntetycznych, na wstępnym etapie wykończenia, poddawane są w wielu przypadkach operacji opalania polegającej na krótkotrwałym oddziaływaniu płomienia na ich powierzchnię w celu usunięcia wystających pojedynczych włókien, które pogarszałyby walory estetyczne wyrobu. Podczas tej operacji, wystające ponad powierzchnię pojedyncze włókna bawełny (bądź inne włókna roślinne lub sztuczne włókna celulozowe) ulegają spaleniowi nie pozostawiając po sobie żadnych „śladow”.

W takim przypadku jedynym efektem opalania tkaniny, i „dowodem” na wykonanie tej operacji, jest brak odstających od jej powierzchni pojedynczych włókien.

Natomiast, gdy opalaniu poddawana jest tkanina z włókien bawełny, zawierająca w swym składzie pewien udział włókien poliestrowych, wystające nad jej powierzchnię włókna syntetyczne zachowują się (w trwającym ułamki sekund kontakcie z płomieniem) całkowicie odmiennie niż włókna bawełny. Włókna poliestrowe nie ulegają spaleni, lecz w warunkach krótkotrwałego oddziaływania płomienia kurczą się i topią. Mimo że nie ulegają one spaleni, zamierzony efekt procesu opalania zostaje osiągnięty - nad powierzchnią tkaniny nie ma już wystających pojedynczych włókien. Pozostałością po usunięciu włókien PES są charakterystyczne „kulki” tworzące się na ich końcach, przylegające ściśle do powierzchni tkaniny. Tak zdeformowane, pogrubione zakończenia włókien PES w postaci „kulek” o średnicy 30-40  $\mu\text{m}$ , nie są widoczne gołym okiem, nie pogarszają walorów estetycznych tkaniny, ani jej chwyty. Stanowią jednak „niepodważalny dowód” na to, że tkanina, na powierzchni której występują, była poddana operacji opalania. Na Rys. 5 przedstawiono obrazy mikroskopowe powierzchni tkaniny poliestrowo-bawełnianej (25/75) po opalaniu.



a)

b)

**Rys. 5.** Obrazy SEM powierzchni tkaniny poliestrowo-bawełnianej (25/75) po operacji opalania: (a) powiększenie 100x, (b) powiększenie 800x [źródło: opracowanie własne].

Możliwość zaobserwowania na tych obrazach opisanych wyżej, charakterystycznych efektów operacji opalania tkanin celulozowych z udziałem włókien poliestrowych, pozwoliła autorom zażegnać pewien, zmierzający w niebezpiecznym kierunku spór pomiędzy firmą świadczącą usługi wykończalnicze, a jednym z jej zleceniodawców.

Na podstawie znanej tylko sobie metody oceny tkaniny, kwestionował on fakt wykonania operacji jej opalania. Po zaprezentowaniu kilku obrazów powierzchni tkaniny uzyskanych techniką SEM, zmienił zdanie i cała sprawa znalazła szczęśliwy finał.

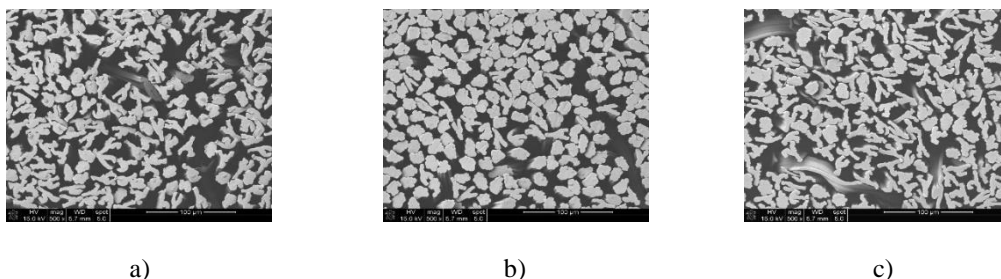
### **3. Analiza porównawcza składu surowcowego i struktury wyrobów włókienniczych**

Na przebieg kolejnych operacji procesu wytwarzania wyrobów włókienniczych, a także na efekty tych operacji, wpływa wiele zmiennych, zarówno o charakterze jakościowym, jak i ilościowym. Utrzymanie tych parametrów na stałym poziomie, będące dla technologów prawdziwym wyzwaniem, jest jednocześnie warunkiem *sine qua non* zapewnienia powtarzalności produkcji wyrobów tekstylnych. W praktyce oznacza to konieczność dokładnej kontroli parametrów procesowych oraz wyeliminowania w możliwie największym stopniu różnego typu zakłóceń poszczególnych operacji procesu produkcyjnego. Stosunkowo często występującym zakłóceniem procesu produkcyjnego tekstyliów, już na samym jego początku, jest użycie włókien niespełniających przyjętych pierwotnie parametrów jakościowych, bądź też niezachowanie udziałów ilościowych poszczególnych rodzajów włókien w przypadku wyrobów wieloskładnikowych. To niezapewnienie stałości składu surowcowego wynikać może z niesolidności dostawcy surowców włókienniczych, z braku dostatecznej kontroli jakości surowców, bądź braku należytej staranności pracowników działów przygotowania produkcji, czy też innych przyczyn natury logistyczno-organizacyjnej.

Tego typu „zakłócenia” dostrzegane są najczęściej dopiero w końcowej fazie wytwarzania wyrobu, zwykle po barwieniu, a w wielu przypadkach ujawniają się dopiero w trakcie użytkowania, będąc powodem reklamacji produktu.

Na Rys. 6 zaprezentowano przekroje poprzeczne włókien pobranych z próbek wyrobu sanitarno-higienicznego. Próbkę te pochodziły z trzech różnych partii produkcyjnych. Analiza dokonywana była na zlecenie producenta, w następstwie licznych reklamacji wyrobów należących do jednej z trzech analizowanych partii produkcyjnych. Reklamacje te powodowane były niedostateczną chłonnością wyrobów.

Wstępne testy wykonane w celu identyfikacji składu surowcowego (test palenia, rozpuszczalność w amoniakalnym roztworze wodorotlenku miedzi) wykazały, że wszystkie analizowane próbki utworzone są w całości ze sztucznych włókien celulozowych. Należało przypuszczać, że różne zdolności sorpcyjne próbek, mimo jednakowej budowy chemicznej tworzących je włókien, wynikają ze zróżnicowania cech makroskopowych włókien, w szczególności grubości i/lub kształtu przekroju poprzecznego. Wobec nieprzydatności metod chemicznych (to samo tworzywo włókien we wszystkich próbkach), jedynym sposobem potwierdzenia tego przypuszczenia było zarejestrowanie obrazów mikroskopowych przekrojów poprzecznych włókien (Rys. 6). Obrazy te ujawniają występowanie we wszystkich próbkach dwóch rodzajów włókien, tj. standardowych włókien wiskozowych i włókien profilowanych typu „Y”. Jednak udziały tych włókien w poszczególnych próbkach wykazują wyraźne zróżnicowanie. Analiza obrazów SEM, dokonana za pomocą programu komputerowego SEMAFORE, wykazała, że udział włókien profilowanych typu „Y” (ich liczba w stosunku do ogólnej liczby włókien) w próbkach pochodzących z partii „A”, „B”, „C” wynosił kolejno: 72%, 20% i 74%. Pozostałą część włókien w próbkach stanowiły wiskozowe włókna standardowe.



**Rys. 6.** Obrazy SEM przekrojów poprzecznych włókien tworzących próbki pochodzące z: a) partii „A”, b) partii „B”, c) partii „C” [źródło: opracowanie własne].

Uzyskane wyniki ilościowej analizy składu surowcowego próbek analizowanego wyrobu potwierdziły wcześniejsze przypuszczenia.

Przyczyną zróżnicowania chłonności próbek pochodzących z różnych partii była wyraźna różnica cech makroskopowych, tworzących je włókien. Sztuczne włókna celulozowe profilowane typu „Y”, dzięki dużej zewnętrznej powierzchni właściwej, charakteryzują się doskonałymi właściwościami sorpcyjnymi. Najmniejszy udział tych włókien (20%) znajdował się w wyrobach pochodzących z partii „B” (Rys. 6b). I właśnie te wyroby cechowały się niedostateczną chłonnością. Wyjaśniało to całkowicie przyczynę niższej jakości produktów z tej partii.

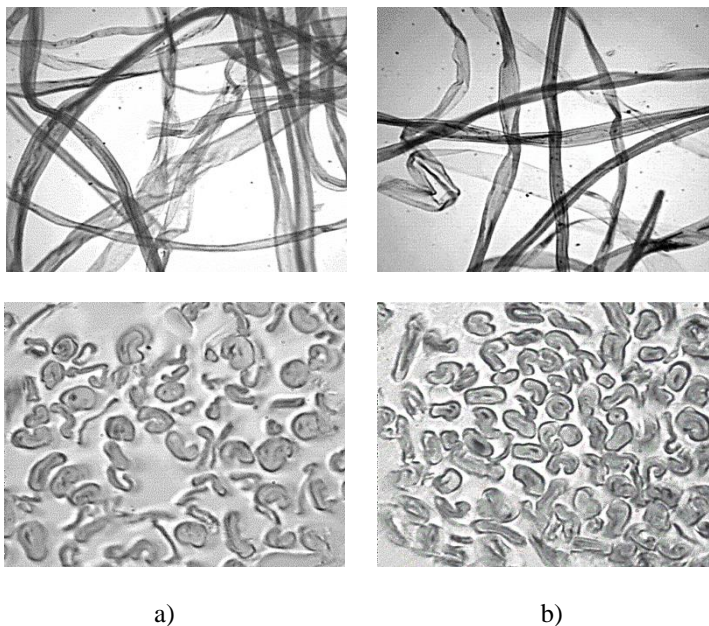
Intensywność wybarwienia włókien bawełny barwnikami bezpośrednimi i reaktywnymi jest wyraźnie uzależniona od stopnia ich dojrzałości. Wynika to przede wszystkim z faktu, iż od dojrzałości włókien bawełny, a więc od stopnia rozwoju ścianki wtórnej we włóknie elementarnym (komórce roślinnej), zależy zawartość celulozy we włóknie. I tak, włókna niedojrzałe, w których ścianka wtórna jest słabo rozwinięta, zawierają w swym składzie mniejszy udział procentowy celulozy niż włókna dojrzałe o w pełni ukształtowanej ściance wtórnej [11]. Mniejszy udział celulozy we włóknie bawełny oznacza mniejszą jego zdolność do sorpcji barwników, co skutkuje zazwyczaj mniej intensywnym wybarwieniem. Oznacza to, że uzyskanie równomiernego wybarwienia wyrobu bawełnianego możliwe jest jedynie wówczas, gdy do jego wytworzenia użyte zostaną przędze wykonane z włókien bawełny nie różniących się znacznie stopniem dojrzałości.

Niespełnienie tego wymogu prowadzi do nierównomierności wybarwienia przejawiającej się często tzw. pasiastością, czyli regularnie, przemiennie rozmieszczonymi na wyrobie miejscami (pasami) o mniejszej i większej intensywności barwy.

Rys. 7 przedstawia obrazy mikroskopowe (widoki wzdłużne i przekroje poprzeczne) włókien bawełny wypreparowanych z dzianiny bawełnianej. Dzianina ta wykazywała wyraźny „efekt pasiastoci”. Podjęta analiza włókien za pomocą mikroskopu optycznego miała na celu wyjaśnienie przyczyn powstania tego błędu.

Preparaty mikroskopowe do obserwacji widoków wzdłużnych i przekrojów poprzecznych włókien bawełny wykonywano pobierając włókna z jaśniejszych i ciemniejszych „pasów” dzianiny.

Analiza porównawcza obrazów włókien prowadzi do spostrzeżenia, że w mniej intensywnie zabarwionych miejscach dzianiny (Rys. 7a) występują w większej liczbie włókna o niskim stopniu dojrzałości niż w miejscach zabarwionych bardziej intensywnie (Rys. 7b), w których zaobserwować można więcej dojrzałych włókien bawełny.



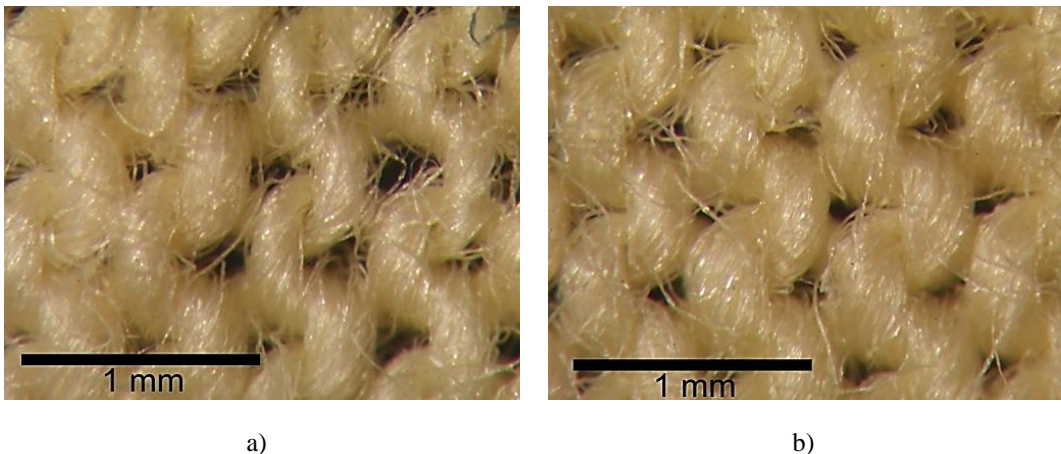
a) b)  
**Rys. 7.** Obrazy włókien bawełny (widoki wzdłużne i przekroje poprzeczne) pobranych z:  
a) jaśniejszych „pasów” dzianiny, b) ciemniejszych „pasów” dzianiny  
[źródło: opracowanie własne].

Za przyczynę wystąpienia nierównomierności wybarwienia analizowanej dzianiny uznano zatem nadmierne, niedopuszczalne zróżnicowanie stopnia dojrzałości włókien bawełny w użytej do jej wytworzenia przędzy.

Opisany wyżej przykład nie jest oczywiście jedynym rodzajem spotykanych nierównomierności wybarwienia dzianin bawełnianych.

Obrazy mikroskopowe na Rys. 8 ilustrują przypadek innej dzianiny bawełnianej, na powierzchni której widoczne były pasma/smugi o szerokości około 2 mm i długości kilku centymetrów, o mniej intensywnej barwie i nieco szarym odcieniu. Obrazy mikroskopowe powierzchni dzianiny w obrębie tych pasm (Rys. 8a) uwidaczniają występowanie wyraźnie większych wolnych przestrzeni (prześwitów) pomiędzy przędzami niż w pozostałych miejscach dzianiny (Rys. 8b).

Z porównania obrazów przedstawionych na Rys. 8 wynika, że fragmenty dzianiny, postrzegane jako mniej intensywnie zabarwione pasma/smugi, utworzone są z przędzy o wyraźnie mniejszej grubości niż całość wyrobu. W pozbawionych błędów, równomiernych fragmentach dzianiny (Rys. 8b) występuje grubsza przędza, przez co struktura wyrobu cechuje się większym stopniem wypełnienia i niewielkimi prześwitami.



**Rys. 8.** Obrazy powierzchni dzianiny (mikroskop optyczny, powiększenie 30x): a) fragment wyrobu utworzony z przędzy o mniejszej grubości, b) prawidłowa struktura wyrobu [źródło: opracowanie własne].

Należy podkreślić, że opisany przykład nie jest błędem farbiarskim. Przędza tworząca dzianinę została wybarwiona równomiernie; intensywność barwy pocienionych odcinków przędzy jest dokładnie taka sama jak odcinków o większej, nominalnej grubości.

Wrażenie występowania na powierzchni dzianiny pasm o mniejszej intensywności barwy jest spowodowane „inną optyką” tych fragmentów wyrobu, które są utworzone z cieńszej przędzy.

#### **4. Podsumowanie**

Przedstawione w artykule wybrane przykłady wykorzystania mikroskopii optycznej i elektronowej do oceny efektów wykończenia wyrobów tekstylnych, nie wyczerpując tego szerokiego zagadnienia, świadczą o wysokiej przydatności, a więc również celowości stosowania metod mikroskopowych.

Są one przydatne nie tylko w pracach badawczych, ale również służą do identyfikacji, analizy i eliminacji przyczyn zakłóceń różnych operacji technologicznych w procesie wytwarzania wyrobów włókienniczych. W wielu przypadkach, do rozwiązania problemu wystarczy użycie mikroskopu optycznego, ale są również sytuacje wymagające zastosowania mikroskopii elektronowej.

Jednostki naukowo-badawcze funkcjonujące w Polsce w obszarze włókiennictwa, a także liczne wyższe uczelnie i centra badawcze są w posiadaniu nowoczesnych mikroskopów elektronowych i optycznych. Wykorzystanie tej aparatury oraz doświadczenia zatrudnionych tam pracowników może być bardzo pomocne w rozwiązywaniu konkretnych, bieżących zadań i problemów pojawiających się podczas realizacji procesów produkcyjnych w zakładach włókienniczych.

#### **Podziękowania**

*Material przedstawiony w pracy był w części prezentowany na XXXIII Seminarium Polskich Kolorystów w dniach 20-22.09.2017 roku w Bydgoszczy. Redakcja dziękuje Prezesowi Polskiego Stowarzyszenia Chemików Kolorystów, dr inż. Bogumiłowi Gajdzickiemu za wyrażenie zgody na wykorzystanie tego materiału w niniejszej publikacji.*

#### **Literatura**

- [1] Moghassem A., Valipour P.: *An extensive look into the effect of mercerization treatment on dimensional properties of cotton plain knitted fabric*, *Fibers and Polymers* **14**, 2013, str. 330-337.
- [2] Jordanov I., Mangovska B.: *Characterization on surface of mercerized and enzymatic scoured cotton after different temperature of drying*, *The Open Textile Journal* **2**, 2009, str. 39- 47.
- [3] Akin D. E., Rigsby L., Perkins W.: *Quality properties of flax fibers retted with enzymes*, *Textile Research Journal* **69**, 1999, str. 747-753.



- [4] Kang S., Epps H.: *Effect of scouring and enzyme treatment on moisture regain percentage of naturally colored cottons*, The Journal of the Textile Institute **100**, 2009, str. 598-606.
- [5] Wołukanis A.: *Badanie wpływu obróbki enzymatycznej na budowę morfologiczną oraz właściwości fizyko-chemiczne włókien lnu* – praca doktorska, Wydział Włókienniczy Politechniki Łódzkiej, Łódź 1998.
- [6] Peran J., Ercegović S.: *Application of atmospheric pressure plasma technology for textile surface modification*, Textile Research Journal **90**, 2020, str. 1174-1183.
- [7] Jelil R.: *A review of low-temperature plasma treatment of textile materials*, Journal of Materials Science **50**, 2015, str. 5913-5943.
- [8] Zimmermann J. L., Shimizu T., Boxhammer V.: *Disinfection through different textiles using low-temperature atmospheric pressure plasma*, Plasma Processes and Polymers **9**, 2012, str. 792-798.
- [9] Samoń R., Czapiński J., Grządziel J., Płonka M., Pawłat J., Diatczyk J.: *Evaluation of bactericidal activity of low-temperature non-equilibrium plasma generated in the RF plasma reactor*, European Journal of Medical Technologies **2**, 2014, str. 17-26.
- [10] Szulc J., Urbaniak-Domagała W., Machnowski W., Wrzosek H., Łacka K., Gutarowska B.: *Low temperature plasma for textiles disinfection*, International Biodeterioration and Biodegradation **31**, 2016, str. 97-106.
- [11] Urbańczyk G. W.: *Nauka o włóknie*, WNT, Warszawa 1985.