

Halina Rosa, Alicja Strzelczyk, Elżbieta Jabłońska,
Tomasz Kozielec, Joanna Karbowska-Berent

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Wydział Sztuk Pięknych,
Instytut Zabytkoznawstwa i Konserwatorstwa, Zakład Konserwacji Papieru i Skóry

Badania nad zastosowaniem celulozy bakteryjnej w konserwacji i restauracji dzieł sztuki

Uwagi wstępne

Celuloza bakteryjna jest syntetyzowana przez bakterie fermentacji octowej z rodzaju *Acetobacter xylinum*. W warunkach hodowli stacjonarnej celuloza gromadzi się na powierzchni pożywki w formie sprężystej i elastycznej membrany. Membrana ta stanowi czystą celulozę nie zawierającą ligniny ani hemicelulozy. Celuloza bakteryjna może być łatwo modyfikowana podczas syntezy i wytwarzana w dowolnej formie i rozmiarach. Ma ona budowę kryształiczną i składa się z mikro fibryl do 100 razy mniejszych niż w celulozie roślinnej, z czym wiąże się duża zdolność przywierania do innych materiałów.

Celuloza bakteryjna jest materiałem wykorzystywanym w różnych gałęziach gospodarki. Dotychczasowe jej zastosowania objęły przede wszystkim dziedzinę medycyny¹, przemysł spożywczy² oraz kosmetyczny.

¹ D. Klemm, D. Schumann, U. Udhardt, S. Marsch, *Bacterial synthesized cellulose – artificial blood vessels for microsurgery*, Progress in Polymer Science, vol. 26: 2001, s. 1561–1603; W. Czaja, A. Krystynowicz, S. Bielecki, R. M. Brown, *Microbial cellulose – the natural power to heal wounds*, Biomaterials, vol. 27: 2006, s. 145–151.

² D. Ochaikul, K. Chotirittikrai, J. Chantra, S. Wutigornsombatkul, *Studies on Fermentation of Monascus purpureus TISTR 3090 with Bacterial Cellulose from Acetobacter xylinum TISTR 967*, KMITL Science Technology Journal, vol. 6, No. 1: 2006, s. 13–17.

W przemyśle papierniczym, szczególnie w USA i Japonii opracowano wiele metod stosowania tego materiału poprawiającego wygląd i własności papierów³.

Zainteresowanie celulozą bakteryjną zbudowaną z nanowłókien celulozowych, jej nietoksyczność, biokompatybilność jak i biodegradowalność wpisują się doskonale w światowe zainteresowania i postępy w dziedzinie nanotechnologii. Jak dotychczas celuloza bakteryjna nie znalazła praktycznego zastosowania w konserwacji zabytków. Podjęte badania w Zakładzie Konserwacji Papieru i Skóry są pierwszymi doświadczeniami w tej dziedzinie opartymi na wykorzystaniu własności i charakterystycznych cech celulozy bakteryjnej⁴. W badaniach współuczestniczył Instytut Biotechnologii Technicznej Politechniki Łódzkiej, który jako jeden z kilku ośrodków na świecie wytwarza celulozę bakteryjną, zajmując się również jej badaniami oraz modyfikacjami, tworząc produkty dla celów medycznych jak również kosmetycznych i innych⁵.

1. Wytwarzanie „papieru” z celulozy bakteryjnej

Celulozę bakteryjną o określonej gramaturze w postaci membran i wysuszonych arkuszy rozdrabniano ręcznie, umieszczano w zlewce z wodą destylowaną. Całość mielono mikserem ręcznym przez określony czas do

³ B. Surma-Ślusarska, S. Presler, Danielewicz D., *Characteristic of bacterial cellulose obtained from Acetobacter xylinum culture for application in papermaking*, *Fibers and Textiles in Eastern Europe*, vol. 16, No. 4 (69): 2008, s. 108–111.

⁴ Praca pt. „Biotechnologia w konserwacji zabytków. Badania nad przydatnością celulozy bakteryjnej (BC) w konserwacji i restauracji dzieł sztuki” prowadzone były w latach 2008–2009 w ramach prac magisterskich i finansowane przez KBN.

⁵ Otrzymywanie celulozy bakteryjnej: Podłoże hodowlane (300 ml) umieszczano w bioreaktorach o wymiarach 40 cm × 60 cm i szczepiono inokulum szczepu *Acetobacter xylinum*. Proces biosyntezy celulozy prowadzono w temperaturze 30°C w odpowiednim czasie dla uzyskania membran o gramaturze 60g/m² i 65 g/m². Po zakończeniu biosyntezy błony celulozowe oczyszczano z związanych z nimi komórek bakterii oraz z składników podłoża hodowlanego. Każdą błonę po złożeniu umieszczano w szczelnie zamkniętych pojemnikach z folii metalowej i przed przekazaniem do badań poddawano sterylizacji radiacyjnej.

uzyskania zawiesiny o jednolitej konsystencji. W wyniku zmielenia membran oraz wysuszonych arkuszy celulozy bakteryjnej z wodą uzyskuje się trwałe i stabilne dyspersje^{6,7}. Zawiesiny celulozy bakteryjnej otrzymywane przez zmielenie membran i wysuszonych arkuszy BC nazywano hydrożelami. Wylewanie arkuszy wykonywano na stole niskociśnieniowym. Po wstępnym odciśnięciu wody i suszeniu na stole niskociśnieniowym arkusze umieszczano pomiędzy filcami, bibułami filtracyjnymi i tekturami i umieszczano w prasie introligatorskiej do wyschnięcia.

Arkusze wylane i odsączone ze zmielonej celulozy bakteryjnej charakteryzują się wielowarstwową, porowatą strukturą składającą się z drobnych włókien. Wyglądem otrzymane przypominają papier.

2. Modyfikowanie celulozy bakteryjnej (BC) dodatkiem wypełniaczy

Wprowadzenie wypełniaczy podobnie jak ma to miejsce w produkcji papierów miało na celu poprawę własności optycznych a głównie zmniejszenie przejrzystości celulozy bakteryjnej. Zastosowano wypełniacze białe, stosowane w papiernictwie do wypełniania różnych wytworów papierniczych, oraz zmielone na bardzo drobny pył drewno sosny i brzozy. Spośród pigmentów białych, w badaniach zastosowano: tlenek glinu, dwutlenek krzemu, węglan wapnia, węglan magnezu, tlenek cynku, siarczek cynku (wykluczony podczas badań) oraz dwutlenek tytanu.

Wypełniacze wprowadzano do zmielonej celulozy bakteryjnej, z której następnie formowano arkusze⁸. Wprowadzano też roztwory węglanu magnezu i wapnia w postaci wodorowęglanów do (wysuszonych) arkuszy CB uzyskując efekt wypełnienia na zasadzie krystalizacji związku w ich strukturze. Używano 3g wypełniacza na 1,5 litra wody nasyconej CO₂. Zbadano

⁶ Patent JP 05051885 (1993): Disaggregation of bacterial cellulose (O. Watabe, Y. Oku).

⁷ Patent US 6153413 (2000): Method for processing bacterial cellulose (K. Watanabe, A. Shibata, H. Ougiya, N. Hioki, Y. Morinaga).

⁸ Po próbach wstępnych zastosowano proporcję 0,184g wypełniacza na 2,116 g celulozy bakteryjnej (1 cz. wypełniacza/11,74 cz. CB).

również właściwości celulozy bakteryjnej wypełnianej węglanem wapnia podczas hodowli BC (w proporcjach 10,85 g oraz 22,4 g na membranę CB)⁹.

Rozkład wypełniaczy na przekrojach analizowany techniką SEM/EDX, (fot. 6–8) pozwolił na stwierdzenie zróżnicowanego rozkładu pigmentów w strukturze arkuszy. Wypełniacze gromadziły się w warstwach powierzchniowych, jak miało to miejsce w arkuszach wypełnianych podczas hodowli BC, bądź też tworzyły obok drobnych, większe skupiska cząstek. Najbardziej równomiernie rozłożony był wypełniacz w arkuszach które nasycano roztworem wodorowęglanem wapnia.

Właściwości arkuszy wypełnionych porównywano z właściwościami analogicznych arkuszy BC bez wypełnienia. Uzyskiwano arkusze o wyglądzie zbliżonym do różnych wytworów papierniczych. Podobnie jak w papiernictwie, większość wypełniaczy pogorszyła właściwości wytrzymałościowe badanego materiału. Wyjątkiem były arkusze wypełnione wypełniaczem brzozy oraz wypełnione poprzez wprowadzenie wodorowęglanu magnezu. Celuloza bakteryjna (BC), wypełniona tlenkiem glinu wykazywała najniższą spośród badanych samozewalność. Większość wypełnionych arkuszy BC posiadała jednak wyższą wytrzymałość w porównaniu do papieru testowego. Wyniki te są interesujące pod względem zastosowania modyfikowanej wypełniaczami BC dla celów konserwatorskich.

Wypełniacze wpłynęły na zmianę pH celulozy bakteryjnej. Wartość ta najbardziej wzrosła przy wypełnieniu mielonej BC z dodatkiem węglanu magnezu oraz węglanu wapnia dodawanych podczas hodowli BC.

Tak jak się spodziewano, wypełniacze spowodowały zmiany we właściwościach optycznych. Najwyższą jasnością charakteryzowały arkusze wypełnione TiO_2 oraz arkusze z węglanem wapnia dodawanym podczas hodowli BC.

Dodanie zmielonego drewna obydwu gatunków do celulozy bakteryjnej wywołało jej ciemnienie z odcieniem żółtawym. Jednak jak można ocenić, uzyskano miłą dla oka barwę zbliżoną do pożółkłych papierów zabytkowych.

Wpływ wypełniaczy pozwolił na cenną modyfikację właściwości optycznych celulozy bakteryjnej i potencjalnej możliwości zastosowania jej jako materiału konserwatorskiego

⁹ Celuloza bakteryjna wypełniana węglanem wapnia podczas hodowli wytwarzana była w Instytucie Biotechnologii Technicznej Politechniki Łódzkiej.

3. Badanie własności Celulozy bakteryjnej i jej modyfikacji w porównaniu do papierów testowych

W przeprowadzonych badaniach próbki arkuszy celulozy bakteryjnej porównywano z próbkami papierów testowych z krótkich włókien bawelnianych oraz papierów ze ścieru drzewnego, kalką techniczną i papierem fotograficznym. Wszelkie zastosowane badania wytrzymałościowe membran BC, modyfikowanych arkuszy a także klejonych połączeń BC i badanymi materiałami konserwatorskimi wykonano zgodnie z Polskimi Normami dotyczącymi badań poszczególnych własności papierów i tektur przy pomocy aparatu Twing-Albert Instrument Company. Badano wytrzymałość na zerwanie określając siłę zrywającą oraz wydłużenie, wskaźnik rozciągania oraz samozewalność, (ISO 1924 PN-83/ P-50133, ISO 187:1990, PN-EN 20187:2000, PN-EN ISO 1924-2: 1998, PN-EN 12960: 2002, PN-EN 1895: 2004/AC). Określano także liczbę podwójnych zgięć stosując aparat Schoppera. Oznaczono masę, grubość oraz gramaturę badanych materiałów oraz zmiany tych cech pod wpływem modyfikacji. W niniejszym opracowaniu ze względu na konieczność ograniczenia objętości tekstu, przedstawiono wybrane własności badanych materiałów.

Badanie pH

Odczyn celulozy bakteryjnej zmierzony elektrodą stykową do pomiarów płaskich powierzchni był w większości badanych próbek BC lekko kwaśny. Mieścił się on w zakresie pH od wartości 5,45 do 6,50. Odczyn pH papieru testowego był wyższy i mieścił się w zakresie 6,00–6,56.

Badanie własności wytrzymałościowych arkuszy celulozy bakteryjnej

Jak wynika z przeprowadzonych badań, wpływ na odporność na zerwanie próbek BC miał sposób hodowli arkuszy oraz metoda ich suszenia. Najniż-

sza odporność na zerwanie spośród wszystkich badanych arkuszy charakteryzuje próbkę BC W-A K (10,13 MPa w kierunku wzdlużnym, 5,31 MPa w kierunku poprzecznym) oraz inne arkusze BC W (17,20 MPa – 22,35 MPa). Najwyższa wartość odporności na zerwanie cechuje próbkę BC 65 CMC-A N (89,16 MPa, 66,48 MPa w zależności od kierunku), a także pozostałe próbki z tej grupy arkuszy, z wyjątkiem próbki liofilizowanej. Najniższą odporność na zerwanie w poszczególnych grupach próbek celulozy bakteryjnej wykazują próbki liofilizowane (8,28 MPa dla kierunku wzdlużnego próbki BC 2D-A liof) oraz próbka BC 65-A temp (9,97 MPa w kierunku wzdlużnym). Najwyższą odporność na zerwanie w każdej z grup, z wyjątkiem próbki BC W-A N, mają próbki arkuszy suszonych pod zwiększonym naciskiem.

Odporność na zerwanie niemal wszystkich badanych próbek celulozy bakteryjnej (z wyjątkiem arkuszy dwudniowej celulozy bakteryjnej i arkuszy dodatkiem węglanu wapnia podczas hodowli BC 2D – A i BC WAK) była znacznie wyższa od badanych papierów testowych.

W warunkach prowadzenia badań, celuloza bakteryjna charakteryzowała się wysoką samozerwalnością wynoszącą średnio 4538 m (dla kierunku wzdluż krótszego brzegu arkusza) oraz średnio 4878 m (dla kierunku wzdluż dłuższego brzegu arkusza). Jest ona więc wytworem posiadającym nieco większą wytrzymałość w kierunku dłuższego brzegu.

Papier testowy posiada średnią samozerwalność wynoszącą 1620 m dla krótszego boku arkusza (kierunek poprzeczny), oraz 2554 m dla dłuższego kierunku arkusza (kierunek wzdlużny). Jak z powyższego wynika, samozerwalność papieru testowego jest niższa niż celulozy bakteryjnej o ok. 190% dla próbek pobranych z kierunku poprzecznego i ok. 90% dla próbek pobranych wzdluż dłuższego boku. Samozerwalność arkuszy celulozy bakteryjnej zmieniała się w zależności od grupy badanych arkuszy, a także w obrębie każdej z grup i zależała od metody suszenia arkuszy.

Najniższą samozerwalność miały próbki arkuszy BC W, najwyższą arkusze BC 60 i BC 65 CMC. Wśród badanych arkuszy najniższą samozerwalność miała próbka BC 2D-A liof (1,314 km w kierunku wzdlużnym), a także inne próbki liofilizowane BC 60-A liof (1,990 km, 1,855 km dla obydwu kierunków) i BC 65-A liof (odpowiednio 1,900 km i 2,222 km). Najwyższe wartości samozerwalności wykazały próbki suszone pod zwiększonym naciskiem.

szonym naciskiem BC 65 CMC-A N (8,285 km i 6,175 km) i BC 65-A N (6,037 km i 5,398 km).

4. Sklejanie i dublaże arkuszy celulozy bakteryjnej i papieru testowego z udziałem klejów i hydrożeli z zmielonej celulozy bakteryjnej

Jako materiał do dublażu zastosowano arkusze celulozy bakteryjnej o gramaturze 60g/m² i papier testowy. Próbki papierów i arkuszy celulozy bakteryjnej sklejało się ze sobą na całej powierzchni każdym z badanych klejów. Klejami tymi były: 1% metyloceluloza, klej skrobiowy z metylocelulozą 1% (2:1), klej akrylowy, zmielona celuloza bakteryjna dwudobowa (nazywana w badaniach hydrożelem) oraz klej jak powyżej modyfikowany 1% metylocelulozą. W trakcie przebiegu dublowania obserwowano zachowanie dublowanego papieru testowego i arkuszy celulozy bakteryjnej, a następnie efekt dublowania. Po zwilżeniu klejem arkusze BC nakładano na papier testowy. Nie zaobserwowano trudności związanych ze ślizganiem się warstw materiałów, ani z ich deformacją.

Wytrzymałość na zerwanie (obciążenie zrywające) arkusza celulozy bakteryjnej jest prawie 4,4 razy wyższa niż papieru testowego. Po sklejeniu ze sobą materiałów w przypadku wszystkich klejów siła [N] potrzebna do zerwania próbek była ponad dwukrotnie większa niż arkusza celulozy bakteryjnej, a odporność na zerwanie wyższa niż papieru testowego, ale niższa niż arkusza celulozy bakteryjnej. Najbardziej wytrzymałe na zerwanie były dublaże wykonane przy użyciu kleju skrobiowego z metylocelulozą (37,115 MPa), najmniej sklezione za pomocą hydrożelu z II-dobowego arkusza celulozy bakteryjnej modyfikowanego 0,25% metylocelulozą (22,530 MPa). Pozostałe kleje zastosowane do dublażu takie jak akrylowy, metyloceluloza, 1% i hydrożel z II-dobowego arkusza celulozy bakteryjnej, wykazały zbliżoną do siebie odporność na zerwanie (około 30 MPa).

Wskaźnik rozciągania [Nm/g] przy zerwaniu arkusza celulozy bakteryjnej (46, 519 Nm/g) był ponad dwukrotnie wyższy niż papieru testowego (22,095 Nm/g). Wartość rozciągania przy zerwaniu próbek sklejonnych różnymi klejami, z wyjątkiem kleju akrylowego, uległa obniżeniu w porów-

naniu z samym arkuszem celulozy bakteryjnej, ale wzrosła w porównaniu z papierem testowym. Najbardziej elastyczny jest klej akrylowy, którego wskaźnik rozciągania w przypadku dublaży wyniósł 59,078 Nm/g. Z pozostałych klejów również wysoką wartość zanotowano dla kleju skrobiowego modyfikowanego metylocelulozą (42,583 Nm/g). Najmniejszy wpływ na podwyższenie wskaźnika rozciągania miało zastosowanie jako spoiwa hydrożeli z II-dobowego arkusza celulozy bakteryjnej (wyniósł on 32,239 Nm/g dla hydrożelu z II-dobowego arkusza i 31,989 dla hydrożelu modyfikowanego metylocelulozą).

Wszystkie zbadane dublaże z wykorzystaniem arkusza celulozy bakteryjnej jako nośnika wpływają na podwyższenie własności wytrzymałościowych papieru testowego. Klej skrobiowy spowodował usztywnienie i kruchość arkuszy. Zwłaszcza arkusze celulozy bakteryjnej II-dobowej po nałożeniu warstwy kleju skrobiowego posiadały większą tendencję do pęknięcia, przelamywania i zwijania, a ich rozprostowanie bez powtórnego nawilżenia nie było możliwe. Nawet po nawilżeniu i wyprostowaniu, arkusze na wolnym powietrzu wykazywały silną tendencję do odkształcania. Powierzchnia arkuszy celulozy bakteryjnej z nałożoną warstwą kleju była matowa, chropowata, z wyraźnymi śladami pędzla.

Metyloceluloza spowodowała zwiększenie połysku arkuszy celulozy bakteryjnej. Strona matowa z nałożoną warstwą kleju przypominała warstwę błyszczącą przed nałożeniem kleju. W trakcie wysychania powłok z metylocelulozy widoczna była opalizacja arkuszy. Wysuszone arkusze były gładkie, nie zaobserwowano też większych odkształceń powierzchni.

Powłoka z hydrożelu ze zmielonej celulozy bakteryjnej nie była widoczna na arkuszach, a można ją było rozpoznać jedynie po lekkim zmatowieniu powierzchni. Zawiesina włókien hydrożelu osadzała się nierównomiernie na obu sklejanym powierzchniach.

Siła oddzierająca próbek w których do połączenia materiału zastosowano hydrożele ze zmielonej celulozy bakteryjnej, była tylko nieco niższa od kleju akrylowego (i wyniosła 2,0 N i 1,8 N), ale znacznie wyższa od metylocelulozy 1% (0,7 N). Próbki w których zastosowano hydrożele ze zmielonej celulozy bakteryjnej uległy zerwaniu po dwóch minutach oddzierania, czyli znacznie szybciej niż próbki sklezione klejem akrylowym. Dodatek metylocelulozy do hydrożelu ze zmielonej celulozy bakteryjnej wzmocnił si-

lę klejenia tylko w niewielkim stopniu. Wartości odporności na zerwanie P są najwyższe w wypadku kleju skrobiowego, a najniższe dla metylocelulozy.

Nalóżone pędzlem zawiesiny włókien celulozy bakteryjnej tworzą na powierzchni papieru testowego bardzo cienkie, przezroczyste i lekko połyskujące powłoki. Warstwa celulozy bakteryjnej jest czytelna i wyraźnie widoczna pod mikroskopem optycznym. Zmielone włókna celulozy bakteryjnej wysychając łączą się ze sobą i tworzą na powierzchni papieru cienką, ścisłą błonę o budowie warstwowej. Powłoka mocno przylega do papieru testowego, a jego powierzchnia staje się gładka i połyskliwa. Niekiedy małe skupiska włókien celulozy bakteryjnej osadzają się pomiędzy włóknami papieru testowego.

Najlepsze błony, bez wyraźnych śladów pędzla, dawały hydrożele zmielone z arkuszy celulozy bakteryjnej II-dobowej. Dodatek metylocelulozy pozytywnie wpłynął na właściwości zawiesiny. Już niewielki dodatek metylocelulozy do zmielonej celulozy bakteryjnej poprawił w znacznym stopniu smarowność, a hydrożel rozprowadzał się znacznie łatwiej i bardziej równomiernie na powierzchni papieru. Celuloza bakteryjna nie tworzy równomiernej warstwy przy powlekanii powierzchni arkusza papieru. Podobne trudności w nakładaniu zawiesiny włókien celulozy bakteryjnej na powierzchnię arkusza zauważono w przypadku użycia powlekarek¹⁰.

5. Uzupełnianie ubytków w papierze, pergaminie, skórze i tkaninach płynnymi masami zawierającymi zawiesiny celulozy bakteryjnej

Celem wykonanych badań było zastosowanie celulozy bakteryjnej do uzupełniania ubytków w różnorodnych materiałach spotykanych w obiektach zabytkowych. Wybranymi materiałami były: papier ręcznie czerpany, maszynowy, kalka techniczna, tkaniny takie jak płótno lniane, tkanina jedwabna o splocie płóciennym i atlasowym a także pergamin obustronnie

¹⁰ Patent US 5637197 (1997): *Process of coating a substrate with reticulated bacterial cellulose aggregates* (W. Watt, T. Adams, G. Peterson, R. Stephens, J. Askew).

szlifowany oraz skóra. Jako masę uzupełniającą ubytki w wymienionych podłożach zastosowano zawiesiny celulozy bakteryjnej uzyskane w wyniku zmielenia wysuszonych arkuszy oraz masy stanowiące mieszaniny zmielonej BC i włókien naturalnych odpowiednio dobranych do uzupełnianego materiału.

Uzupełniano mniejsze uszkodzenia mechaniczne wymienionych materiałów jak i większe nieregularne ubytki. Zastosowano trzy metody uzupełniania a mianowicie, metodę mokrą za pomocą mas płynnych, metodę półsuchą za pomocą mas półpłynnych oraz metodę suchą, polegającą na wklejaniu latek, przygotowanych po wysuszeniu płynnych mas, za pomocą odpowiednio dobranego spoiwa.

Uzupełnianie papierów

Na stole niskociśnieniowym umieszczono arkusz włókniny, a na nim ułożono uzupełniany materiał, który następnie silnie zwilżono wodą i wygładzano w celu usunięcia pęcherzyków powietrza. Stół przykryto folią estrafolową, pozostawiając odsłonięte jedynie miejsca ubytków. Papier uzupełniano od strony odwrocia, nakładając masy cienkimi warstwami, za pomocą łyżeczki lub łopatkę dentystycznej. Nakładano kolejno kilka warstw masy. Nałożone warstwy nachodziły lekko na krawędzie uszkodzenia. Uzupełnianie przeprowadzano do momentu w którym osiągnięto grubość zbliżoną do materiału uzupełnianego. Ostatnią warstwę wyrównywano i wygładzano kostką introligatorską. Gdy masy stały się zwarte, a ich powierzchnie matowe, całość przykryto włókniną i odsysano na stole niskociśnieniowym na czas ok. 10–15 minut. Celem było podsuszenie i sprasowanie uzupełnień, umożliwiające ich lepsze połączenie z oryginałem. Uzupełniony materiał ułożono między suchymi włókninami, bibułami filtracyjnymi oraz tekturami i umieszczono do wyschnięcia pod obciążeniem w prasie na ok. 2–3 dni. W tym czasie kilka razy wymieniano wilgotne bibuły filtracyjne i tektury na suche. Zaletą płynnych mas z dodatkiem celulozy bakteryjnej, jak i samej zawiesiny celulozowej jest ich bardzo dobra adhezja do podłoża, dzięki czemu nie wymagają one stosowania spoiwa. Uzupełnienia charakteryzuje lekko żółtawa, naturalna barwa zbliżona do zabytkowych papierów, szczególnie maszynowego. Ich elastyczność jest zbliżona do uzupełnianego materiału.

Uzupełnianie tkanin

Proces uzupełniania tkanin przeprowadzono w sposób analogiczny do uzupełniania ubytków w papierze. Proces uzupełniania trwał ok. 1–1,5 godziny. Czas trwania zabiegu zależał od wielkości i grubości uzupełnienia. Po tym czasie uzupełniony materiał ułożono między suchymi włókninami, bibułami filtracyjnymi oraz tekturami i pozostawiono do wyschnięcia pod obciążeniem w prasie introligatorskiej na około 2-3 dni. W tym czasie kilka razy wymieniano wilgotne bibuły i tektury na suche.

Metoda pólsucha

Metodę pólsuchą zastosowano do uzupełniania pergaminu i skóry. Uzupełnianie przebiegało z wykorzystaniem stołu niskociśnieniowego, co umożliwiało nieprzerwane odsączanie nadmiaru wody z mas uzupełniających. Zabieg uzupełniania pólsuchymi masami składał się z trzech etapów:

- I etap – podsuszanie płynnych mas na stole niskociśnieniowym
Masy formowano na włókninie, ułożonej bezpośrednio na stole niskociśnieniowym, za pomocą ramki ze styropianu do wnętrza której wlewano warstwowo płynne zawiesiny. Czekano, aż nadmiar wody zostanie z nich usunięty i dolewano kolejną porcję (k. 3–5 razy).
Podczas zabiegu stół był przykryty folią z wyjątkiem miejsca, w którym znajdowało się okno ramki. Formowano masy zbliżone do grubości materiałów uzupełnianych, o wymiarach nieco większych niż ubytek. W zależności od wymaganej grubości mas uzupełniających podsuszanie trwało ok. 2–3 godzin. Po uzyskaniu odpowiedniej gęstości uzupełnienia i dobrej przyczepności do uzupełnianego materiału, ramkę usuwano a krawędzie uformowanej masy wyrównywano kostką introligatorską
- II etap – uzupełnianie ubytków pólsuchymi masami
Na stole niskociśnieniowym uzyskanymi pólsuchymi masami wypełniono miejsca ubytków od strony odwrocia materiału uzupełnianego, umieszczonego na warstwie bibuły filtracyjnych oraz włókninie. Po czym całość zabezpieczono od lica arkuszem włókniny, przykryto

estrafolem i prasowano na stole niskociśnieniowym ok. 15 minut w celu połączenia masy z materiałem uzupełnianym.

- III etap – suszenie uzupełnionego materiału pod obciążeniem w prasie. Po zdjęciu uzupełnionego materiału ze stołu, ułożono go między suche włókniny, bibuły filtracyjne oraz tektury i umieszczono w prasie na czas ok. 7–9 dni w przypadku pergaminów i ok. 5–7 dni w przypadku skór. W tym czasie bardzo często wymieniano wilgotne bibuły filtracyjne oraz tektury na suche.

Metoda sucha

Metoda sucha polegała na wklejaniu latek przygotowanych z arkusików powstałych po wysuszeniu płynnych mas. Zastosowano ją do uzupełnienia pergaminu i skóry.

W pergaminie nr 1, łatki przyklejano 5% klejem pergaminowym, w pergaminie nr 2 zastosowano 5% klej rybi.

W skórze nr 1, łatki przyklejano – 12% klejem króliczym, w skórze nr 2, łatki przyklejano klejem akrylowym Lascaux 498 HV.

Przed wklejeniem uzupełnień krawędzie ubytków i latek ścieniono na szerokość ok. 2–3 mm. Łatkę przyklejono od strony odwrocia materiału, a następnie wygładzono i mocno przyciśnięto kostką introligatorską. Uzupełniony materiał ułożono między arkuszami włóknin i suszono pod niewielkim obciążeniem. Końcowym etapem po wyschnięciu uzupełnień było opracowanie krawędzi latek, które ścieniono i wyrównano za pomocą skalpela.

Techniką suchą uzupełniano ubytki w pergaminach za pomocą arkuszy przygotowanych z trzech rodzajów mas: włókna pergaminowe + BC (3:1); (1:1); (3:1), zawiesina celulozy bakteryjnej oraz włókna bawełniane + BC (1:3); (1:1); (3:1).

W skórze uzupełniano powierzchniowe ubytki lica oraz ubytki występujące w całej jej grubości. Uszkodzenia powierzchniowe, uzupełniono cienkim arkuszem, odpowiednio przyciętym do wymiarów i kształtu ubytku. Łatki o fazowanych krawędziach przyklejono w uszkodzone miejsca metodą „na styk”.

Ubytki występujące w całej grubości skóry uzupełniono dwoma cienkimi arkuszami, wklejonymi warstwowo, tak aby uzyskać grubość zbliżoną do grubości skóry. Opracowano dwie łatki, z których jedna była nieco większa od ubytku, natomiast wymiary drugiej dokładnie odpowiadały wielkości uszkodzenia. Krawędzie obu latek były fazowane na szerokość ok. 2–3 mm. W pierwszej kolejności wklejano większą łatkę, od strony mizdry następnie od strony lica skóry wklejono drugą łatkę metodą „na styk”, tworząc drugą warstwę uzupełnienia.

Wykorzystując plastyczne i elastyczne właściwości zawiesiny celulozy bakteryjnej i mas z jej dodatkiem w stanie półsuchym, wykonano próby fakturowania ich powierzchni. Najdokładniej faktura w postaci negatywu splotu płóciennego odbiła się w próbce utworzonej z zawiesiny celulozy bakteryjnej (fot 10) a oraz w próbkach wykonanej z mas z dużym jej dodatkiem. Utrzymanie faktury powierzchni jest trwałe po wyschnięciu masy.

6. Badania nad zwiększeniem odporności mikrobiologicznej BC

Celem badań było zwiększenie odporności celulozy bakteryjnej na atak mikrobiologiczny za pomocą preparatów biobójczych.

Do zabezpieczenia przed atakiem mikrobiologicznym BC wybrano trzy preparaty:

- a. prototypowy preparat L-2 (zawierający 15% chlorku didecyldimetyloamoniowego i 3% bis (aminopropylo)dodecyloaminy),
- b. S-30 (30% wodny roztwór 2-fenylofenolan sodu),
- c. NPS (alkohol etylowy + srebro w postaci nanocząsteczek).

Preparaty wprowadzano poprzez zanurzenie arkuszy BC w roztworach dezynfekujących. Po wyschnięciu arkusze zakażano zawiesinami szczepów grzybów j.w. lub poddano działaniu drobnoustrojów z powietrza. Wszystkie próbki umieszczono w komorach wilgotnych w temperaturze 25°C na 3 miesiące.

Preparaty L-2 (w stężeniu 0,5% związku aktywnego) i S-30 (w stężeniu 0,3% związku aktywnego) okazały się wystarczająco skuteczne do zabezpieczania celulozy bakteryjnej przed atakiem grzybów (w nieco mniej-

szym stopniu wobec *Trichoderma pseudokoningii*). Preparat nanosrebrowy NPS – 200 (w stężeniu 20 ppm) okazał się całkowicie nieskuteczny.

Wnioski

Analizy mikroskopowe (SEM, ESEM, AFM) wykazały duże różnice w budowie strukturalnej między papierem testowym oraz celulozą bakteryjną (CB). CB jest wytworem wielowarstwowym w przeciwieństwie do papieru testowego. Składa się z dużej ilości bardzo drobnych warstewek zbudowanych z siatki mikrofibryl, których grubość wynosi najczęściej kilkadziesiąt nanometrów (najczęściej nie przekracza 100 nm). Dla porównania włókna celulozowe mają nieporównywalnie większe wymiary rzędu średnio kilkudziesięciu μm . CB jest materiałem o dużej gładkości i tworzywem bardzo zwartym o niskiej przepuszczalności powietrza i pary wodnej.

Włączenie celulozy bakteryjnej do badań konserwatorskich poprzedzające jej praktyczne zastosowanie w konserwacji zabytków okazało się cenna idea.

Badania właściwości celulozy bakteryjnej, obserwacja wyglądu i powierzchni wysuszonych arkuszy potwierdziły możliwość wykorzystania celulozy bakteryjnej do prac konserwatorskich, jednak z koniecznym zastrzeżeniem modyfikacji tego produktu. Korzystną modyfikacją jest zmielenie wysuszonych arkuszy celulozy bakteryjnej.

Zbadane właściwości klejące hydrożeli wykazały, że mogą one zostać wykorzystane jako spoiwo. Zawiesiny włókien celulozy bakteryjnej użyte do sklejania próbek papierów i bibułki jednocześnie je wzmacniały. Nieduża siła klejenia hydrożeli może być zaletą w wypadku, gdy konieczne jest wykorzystanie kleju o spoinie słabszej niż sklejane materiały.

Korzystną cechą płynnych mas na bazie celulozy bakteryjnej jest ich wysoka adhezja do podłoża dzięki czemu mogą być one stosowane bez dodatku spoiwa.

Dodatek białych pigmentów oraz zmielonego drewna jako wypełniaczy poprawiało własności optyczne a także pH arkuszy utworzonych z zawiesiny BC. Arkusze takie zyskiwały duże podobieństwo do papierów.

Zawiesiny celulozy bakteryjnej mieszały się dobrze z włóknami tkanin, pergaminu i skóry pozwalając na uzyskanie dobrych i elastycznych materiałów do uzupełnienia ubytków w różnorodnych materiałach.

Literatura

- Czaja W., Krystynowicz A., Bielecki S., Brown R. M., *Microbial cellulose – the natural power to heal wounds*, Biomaterials, Vol. 27: 2006
- Jablonskaja I., Zastosowanie różnych wypełniaczy do modyfikacji celulozy bakteryjnej, praca mgr, maszynopis, Toruń 2009
- Klemm D., Schumann D., Udhardt U., Marsch S., *Bacterial synthesized cellulose – artificial bloodvessels for microsurgery*, Progress in Polymer Science, Vol. 26: 2001, s. 1561–1603
- Kowaczew J., Uzupełnianie ubytków w materiałach (papier, tkanina, pergamin, skóra) płynnymi masami na bazie bakteryjnej celulozy, praca mgr, maszynopis, Toruń 2009
- Myślicka M., Celuloza bakteryjna. Możliwość zastosowania do wzmacniania papieru poprzez podklejanie, dublaż i powlekanie. Barwienie celulozy bakteryjnej, praca mgr, maszynopis, Toruń 2009
- Ochaikul D., Chotirittikrai K., Chantra J., Wutigornsombatkul S., *Studies on Fermentation of Monascus purpureus TISTR 3090 with Bacterial Cellulose from Acetobacter xylinum TISTR 967*, KMITL Science Technology Journal, Vol. 6, No. 1: 2006, s. 13–17
- Patent JP 05051885 (1993): Disaggregation of bacterial cellulose (O. Watabe, Y. Oku)
- Patent US 6153413 (2000): Method for processing bacterial cellulose (K. Watanabe, A. Shibata, H. Ougiya, N. Hioki, Y. Morinaga)
- Patent US 5637197 (1997): *Process of coating a substrate with reticulated bacterial cellulose aggregates* (W. Watt, T. Adams, G. Peterson, R. Stephens, J. Askew)
- Surma-Ślusarska B., Presler S., Danielewicz D., *Characteristic of bacterial cellulose obtained from Acetobacter xylinum culture for application in papermaking*, Fibers and Textiles in Eastern Europe, Vol. 16, No. 4 (69): 2008
- Witkowski M., Wpływ suszenia na wygląd i własności celulozy bakteryjnej, praca mgr, maszynopis, Toruń 2010

Summary

Study on the use of bacterial cellulose in the conservation and restoration of works of art

Bacterial cellulose (BC) obtained in the bacterial biosynthesis by *Acetobacter xylinum* is considered one of the most interesting materials tested and used in differ-

ent areas of the human activity. Successful its applications in medicine and food industry launched a study of this material on a large scale. Many characteristic and unique properties of bacterial cellulose are used already in the paper industry. Research and application of bacterial cellulose nano fibers made up of cellulose, its non-toxic, biocompatibility and biodegradability fit perfectly into the world of interest and progress in nanotechnology. Plant cellulose and bacterial cellulose have the same chemical structure, but different chemical and physical properties. Bacterial Cellulose is biopolymer not soluble, more elastic and demonstrate a high tensile strength.

The study was performed in collaboration with the Institute of Technical Biochemistry, Technical University of Łódź. Planned and carried out the study covered a wide range of experience of testing the applicability of bacterial cellulose as well as its modification in the work of restoration. So far, studies and practical adaptation of bacterial cellulose in our research are the first tests in the conservation area. The exceptions were the addition of bacterial cellulose sample during the manufacture of paper hand-derived, which as noted have a positive impact on the properties of paper produced and lead to the conclusion that the paper with the participation of bacterial cellulose can be used for archival and preservation purposes. Research undertaken in this study are the first extensive experience seeking to use the unique properties of this material such as high strength and elasticity, content of pure cellulose with a high degree of polymerization and the ability of these material to modification.

Microscopic analysis (SEM, ESEM, AFM) showed significant differences in the structural construction of the test paper and bacterial cellulose (BC). BC is a product of a multi-layered as opposed to a paper test. It consists of a large number of very fine mesh of layers made of the microfibrils, whose thickness is usually tens of nanometers (usually less than 100 nm). Preliminary studies of bacterial cellulose membranes indicated the need to modify the native membrane by drying them to form sheets, and further grinding in the presence of water. Suspensions of bacterial cellulose known in our work hydrogels were modified with the addition of fillers, dyes, methyl cellulose, fibers of paper, fabric and dry shredded leather and parchment. The obtained hydrogels were characterized by low density and high water content, which allowed the formation of thin coats or seams. Additive methylcellulose had a positive influence on the properties of suspensions and coats. Structure of the sheets turned out by use the hydrogels was in contrast to the less dense sheets of BC a more flexible and bibulous.

These suspensions were poured on the low-pressure suction table create flexible, durable sheets with similar appearance to the materials, which were the source

fiber supplements. Hydrogels blended well with the fibers of fabrics, leather and parchment response for good and flexible materials. A significant advantage of bacterial cellulose is easy given to maintaining its forms such as impress of the sieve or cloth texture and others.

Sheets of bacterial cellulose, its suspension were used as a bonding agent to reinforcing by coating and lining of test paper. Adhesive properties of hydrogels demonstrated that they can be used as a bonding mediums. Suspensions of bacterial cellulose fibers made from various materials were used for filling the holes in paper, textiles, leather and parchment. Lining samples of Bacterial cellulose sheets did not show any tendency to cracking and tearing. The test paper lining on sheet of BC strengthened the

mechanical properties of the test paper. Suspensions of bacterial cellulose fibers used for coating the test paper and tissue samples delicate reinforcing them. Positive effect of application dried sheets to restoration of old photos, application of modified hydrogels to filling and reinforcing the paper and others tested treatment indicate necessary to continue of the evaluation on these field.

Study were performed a wide range of experience. By microscopy examination (SEM, ESEM, OTC) was identified the morphology and structure of the membranes, any modified sheets and products. Colorimetrically determined by the brightness and colors of tested materials. PH and mechanical properties of the membranes, modified sheets and adhesive bonded joints to conservation materials was tested according to Polish standards. Determined mass, thickness, basis weight of the bio-cellulose materials and their changes under influence of the modification applied. Researched the optimal methods of membranes and modified sheets drying. Determined the rate of water vapour transmission according to Polish standards. It was made also evaluation of hygro-stability of the biocellulosic sheets. Biocellulose and test paper changes were studied under the influence of accelerated ageing. The results of investigation indicated that Bacterial Cellulose was more sensitive to microbial attack than the test paper. This characteristic can be improved by application of biocides.

[304]



Il. 1. Wygląd membrany celulozy, fot. M. Witkowski



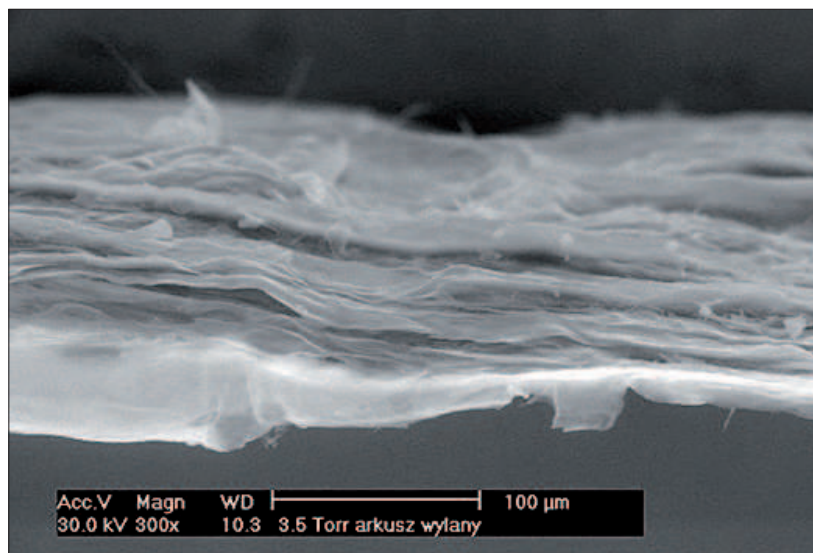
Il. 2. Membrana BC przygotowana do zmielenia, fot. M. Witkowski



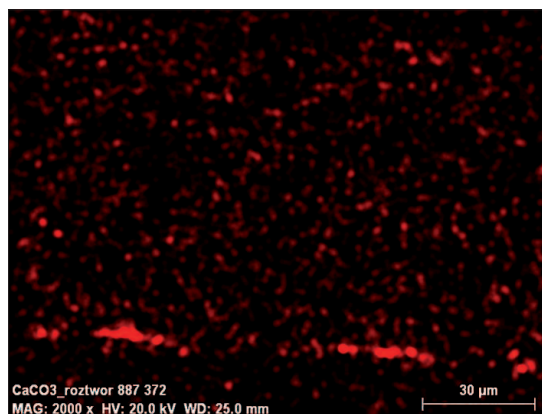
Il. 3. BC w trakcie mielenia, bakteryjnej, fot. M. Witkowski



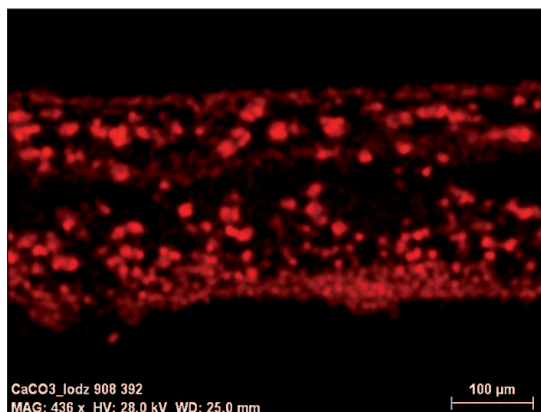
Il. 4. Arkusz uzyskany z zmielonej BC (zawiesiny włókien BC), fot. M. Witkowski



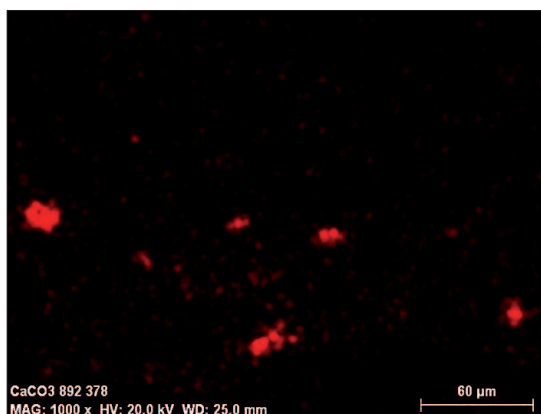
Il. 5. Warstwowa struktura arkusza wylanego ze zawiesiny włókien celulozy bakteryjnej (ESEM pow. 300×, fot. J. Stryjewski, Katedra Inżynierii Materiałowej, Wydział Mechaniczny Politechniki Gdańskiej)



Fot. 6. Nie mielony arkusze z celulozy bakteryjnej z w prowadzonym roztworem węglanu wapnia (CaCO_3 r-r), 2000×, fot. Grzegorz Trykowski, Pracownia Analiz Instrumentalnych, Wydział Chemii, UMK



Il. 7. Celuloza bakteryjna modyfikowana węglanem wapnia (CaCO_3) na etapie hodowli 436x, fot. Grzegorz Trykowski, Pracownia Analiz Instrumentalnych, Wydział Chemii, UM



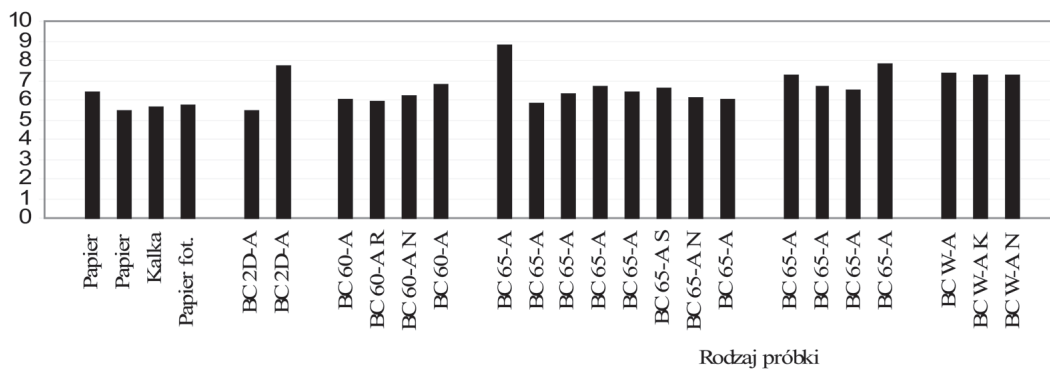
Fot. 8. Mielona celuloza bakteryjna modyfikowana węglanem wapnia (CaCO_3), 1000x, fot. Grzegorz Trykowski, Pracownia Analiz Instrumentalnych, Wydział Chemii, UM

Tab. 1. Rodzaje papierów testowych

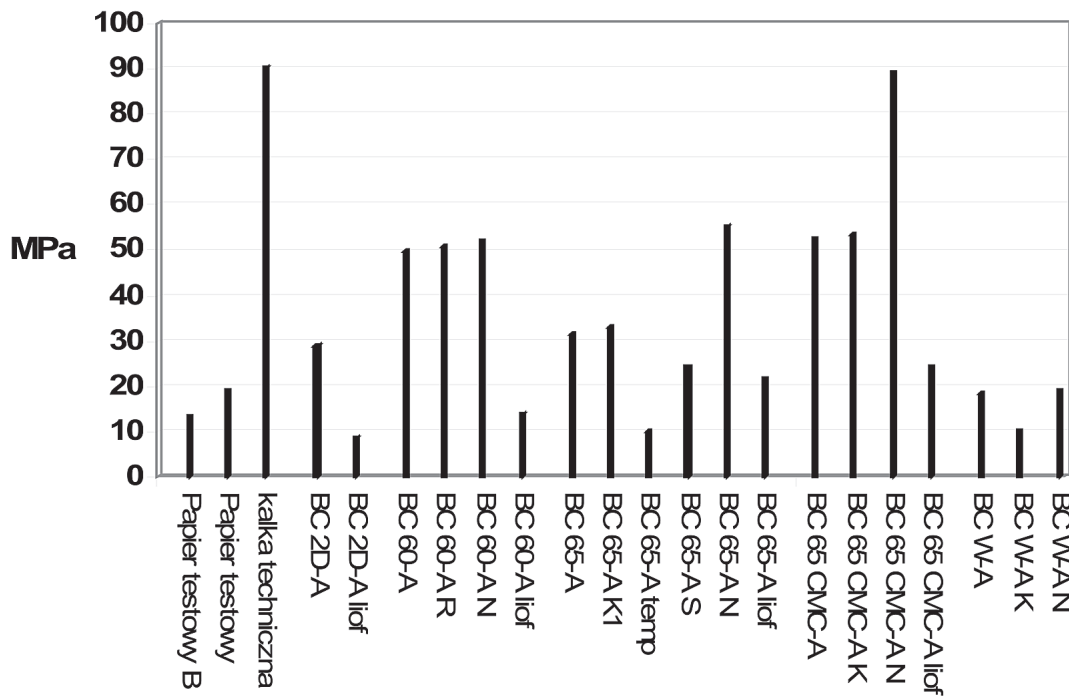
Wytwory papiernicze	Rodzaj próbki
Papier testowy z lintersów bawełnianych, bez wypełniaczy, nie przeklejony, w składzie papieru 95% bawełny i 5% masy celulozowej z drzew iglastych, Cotton linters cellulose paper, prod. Papierfabrik Schutt Heelsum, The Netherlands	Papier testowy B / PT B
Papier testowy z wypełniaczem kaolinowym (20%), przeklejony żywicą z alunem, w składzie papieru 75% ścieru drzewnego i 25% masy celulozowej z drzew iglastych, Groundwood containing paper, prod. Papierfabrik Schutt Heelsum, The Netherlands	Papier testowy W / PT W
Kalka techniczna 90/95 g/m ² Calque Satin Canson 12125, prod. Papeteries Canson & Montgolfier S. A., France	Kalka techniczna / KT
Papier fotograficzny Foma N 311, prod. Bohemia spol. s. r. o. 501 04 Hradec Králové, Czech Republic	Papier fotograficzny / PF

Tab. 2. Rodzaje celulozy bakteryjnej wykorzystanej w badaniach

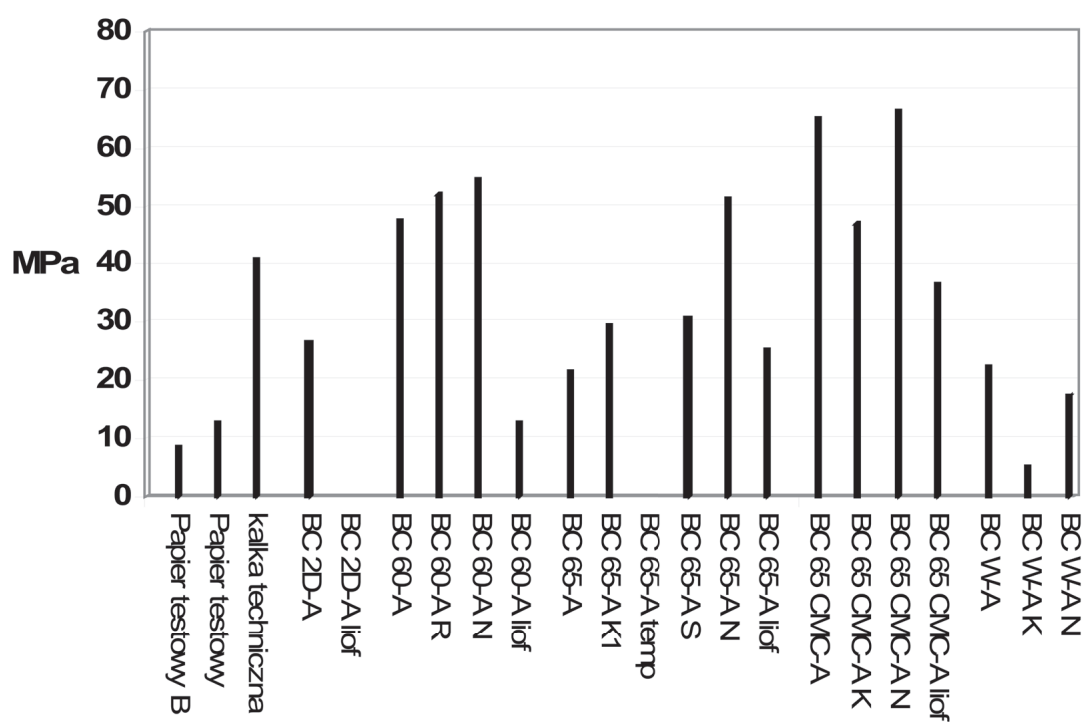
Celuloza bakteryjna	Rodzaj próbki
Celuloza bakteryjna z hodowli dwudobowej w formie membrany (M) lub wysuszonego arkusza w prasie (A)	BC 2D-M BC 2D-A
Celuloza bakteryjna z hodowli dwudobowej w formie arkusza wysuszonego w liofilizatorze (A)	BC 2D-A liof / L
Celuloza bakteryjna 60 g/m ² w formie membrany (M) lub wysuszonych arkuszy (A)	BC 60-M BC 60-A
Celuloza bakteryjna 60 g/m ² suszona w prasie introligatorskiej po wyciśnięciu wody pod ruchomym obciążeniem	BC 60-A R
Celuloza bakteryjna 60 g/m ² suszona w prasie hydraulicznej pod zwiększonym obciążeniem 4.5 T	BC 60-A N
Celuloza bakteryjna 60 g/m ² w formie arkusza wysuszonego w liofilizatorze	BC 60-A liof
Celuloza bakteryjna 65 g/m ² w formie membrany (M) lub wysuszonych arkuszy (A)	BC 65-M BC 65-A
Celuloza bakteryjna 65 g/m ² w formie wysuszonych arkuszy (A) próbki kontrolne	BC 65-A K1 BC 65-A K2 BC 65-A K3
Celuloza bakteryjna 65 g/m ² suszona w suszarce komorowej w temperaturze 40°C	BC 65-A temp / T
Celuloza bakteryjna 65 g/m ² suszona na siatce serigraficznej pod lekkim obciążeniem (deska do prasy introligatorskiej)	BC 65-A S
Celuloza bakteryjna 65 g/m ² suszona w prasie hydraulicznej pod zwiększonym obciążeniem 4.5 T	BC 65-A N
Celuloza bakteryjna 65 g/m ² w formie arkusza wysuszonego w liofilizatorze	BC 65-A liof / L
Celuloza bakteryjna 65 g/m ² hodowana w obecności karboksymetylocelulozy (CMC) - w formie membrany (M) lub wysuszonych arkuszy (A)	BC 65-M CMC BC 65-A CMC
Celuloza bakteryjna 65 g/m ² hodowana w obecności karboksymetylocelulozy (CMC) - w formie wysuszonych arkuszy (A) próbka kontrolna	BC 65-A CMC K
Celuloza bakteryjna 65 g/m ² hodowana w obecności karboksymetylocelulozy (CMC) - arkusz suszony w prasie hydraulicznej pod zwiększonym obciążeniem 4.5 T	BC 65-A CMC N
Celuloza bakteryjna 65 g/m ² hodowana w obecności karboksymetylocelulozy (CMC) suszona w formie arkusza wysuszonego w liofilizatorze	BC 65-A CMC liof / L
Celuloza bakteryjna z dodatkiem węgla wapnia (CaCO ₃) w formie membrany (M) lub wysuszonych arkuszy (A)	BC W-A M BC W-A
Celuloza bakteryjna z dodatkiem węgla wapnia próbka kontrolna	BC W-A K
Celuloza bakteryjna z dodatkiem węgla wapnia suszona w prasie hydraulicznej pod zwiększonym obciążeniem 4.5 T	BC W-A N



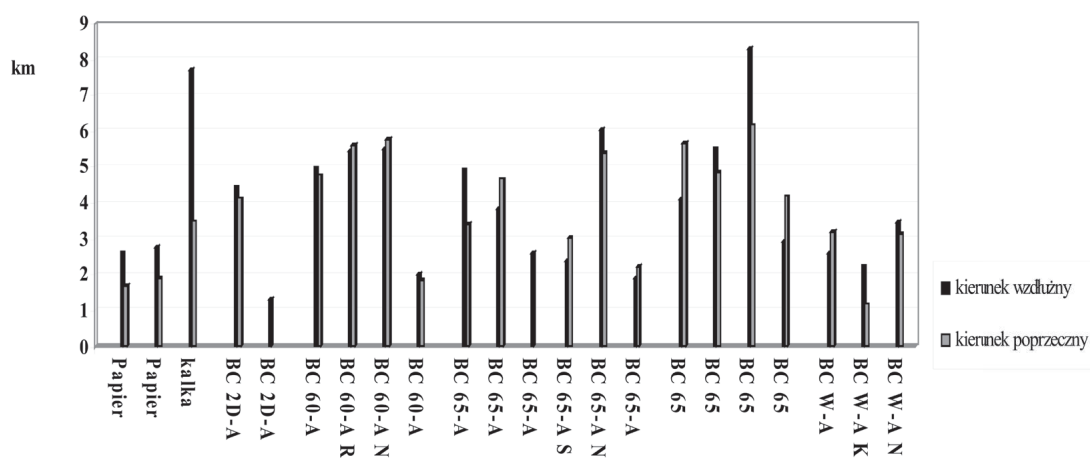
Wykres 1. pH arkuszy wytworzonych z celulozy bakteryjnej w porównaniu do wytworów papierniczych



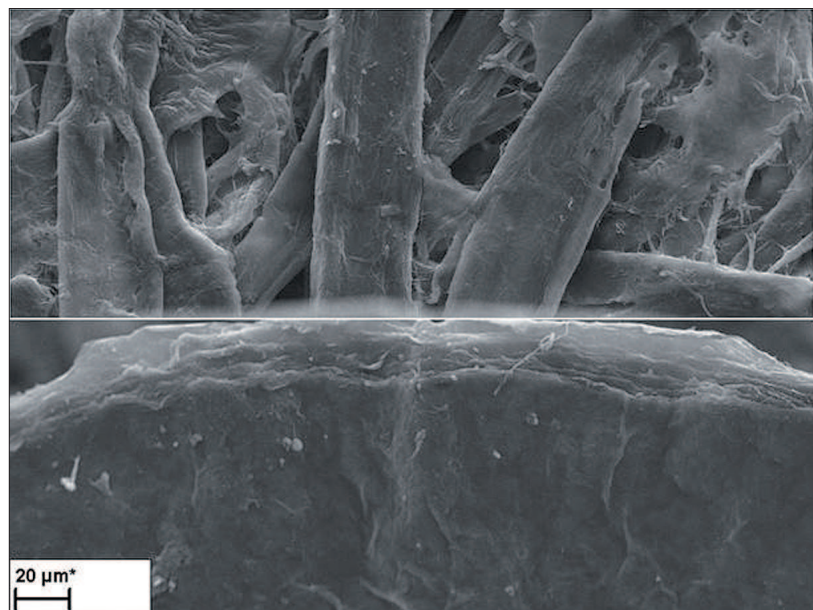
Wykres 2. Odporność na zerwanie arkuszy BC [MPa] (kierunek wzdłużny)



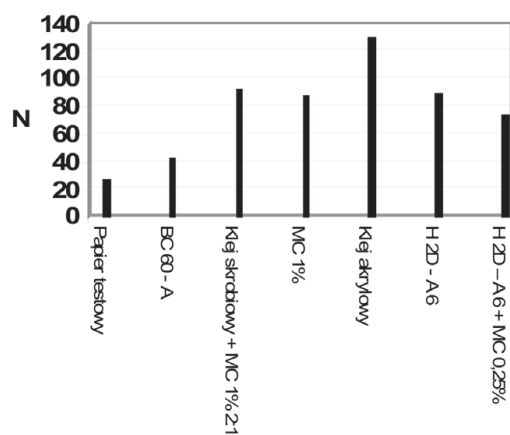
Wykres 3. Odporność na zerwanie arkuszy BC [MPa (kierunek poprzeczny)]



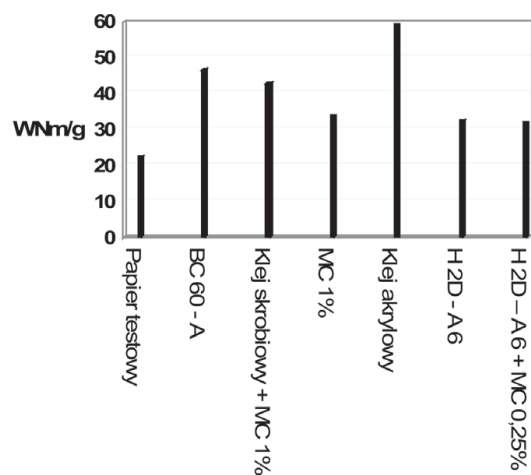
Wykres 4. Samozerwalność arkuszy celulozy bakteryjnej S [km]



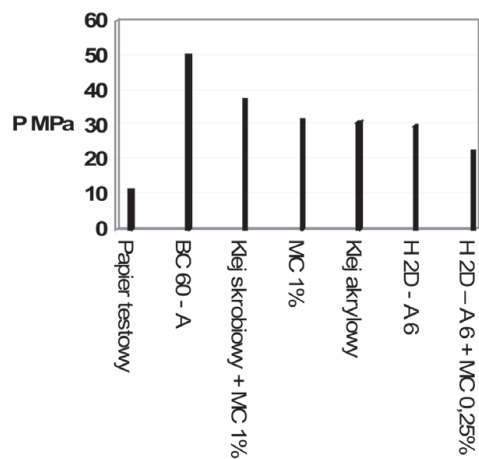
Fot. 9. Błona z hydrożelu celulozy bakteryjnej II-dobowej pomiędzy arkuszem z celulozy bakteryjnej i papierem testowym (SEM pow. 1000×, fot. Grzegorz Trykowski, Pracownia Analiz Instrumentalnych, Wydział Chemii, UMK)



Wykres 5. Siła zrywająca [N] arkuszy celulozy bakteryjnej zdublowanych na papier testowy za pomocą klejów i hydrożeli z celulozy bakteryjnej



Wykres 6. Wskaźnik rozciągania W [Mn/g] arkuszy celulozy bakteryjnej zdublowanych na papier testowy za pomocą klejów i hydrożeli z celulozy bakteryjnej



Wykres 7. Odporność na zerwanie P [MPa] arkuszy celulozy bakteryjnej zdublowanych na papier testowy za pomocą klejów i hydrożeli z celulozy bakteryjnej

Tab. 3. Rodzaje płynnych mas użytych do uzupełniania ubytków

Lp.	Material uzupełniany	Masa uzupełniająca
1.	Papier ręcznie czerpany; Papier maszynowy	Masa bawełniana; Włókna bawełniane + BC (1:3); Włókna bawełniane + BC (1:1); Włókna bawełniane + BC (3:1); Zawiesina bakteryjnej celulozy;
2.	Kalka techniczna	Zawiesina bakteryjnej celulozy;
3.	Plótno lniane	Masa lniana; Włókna lniane + BC (1:3); Włókna lniane + BC (1:1); Włókna lniane + BC (3:1); Zawiesina bakteryjnej celulozy;
4.	Tkanina jedwabna o splocie płóciennym; Tkanina jedwabna o splocie atlasowym	Masa jedwabna; Włókna jedwabne + BC (1:3); Włókna jedwabne + BC (1:1); Włókna jedwabne + BC (3:1); Zawiesina bakteryjnej celulozy;
5.	Pergamin 1	Włókna pergaminowe 1 + BC (1:3); Włókna pergaminowe 1 + BC (1:1); Włókna pergaminowe 1 + BC (3:1); Zawiesina bakteryjnej celulozy;
6.	Pergamin 2	Włókna pergaminowe 2 + BC (1:3); Włókna pergaminowe 2 + BC (1:1); Włókna pergaminowe 2 + BC (3:1); Zawiesina bakteryjnej celulozy;
7.	Skóra 1	Włókna skórzane 1 + BC (1:3); Włókna skórzane 1 + BC (1:1); Włókna skórzane 1 + BC (3:1); Zawiesina bakteryjnej celulozy;
8.	Skóra 2	Włókna skórzane 2 + BC (1:3); Włókna skórzane 2 + BC (1:1); Włókna skórzane 2 + BC (3:1); Zawiesina bakteryjnej celulozy;



Fot. 10 a, b. a – uzupełnienie płótna lnianego masą włókna lniane + BC 3: 1, b – zawiesina celulozy bakteryjnej z nadaną fakturą płótna lnianego