

**DZIAŁANIE CZYNNIKÓW
MECHANICZNYCH ORAZ TERMICZNYCH
NA MORFOLOGIĘ WŁOSÓW LUDZKICH
I ZWIERZĘCYCH**

**EFFECT OF MECHANICAL AND THERMAL FACTORS
ON THE STRUCTURE OF HUMAN
AND ANIMAL HAIR**

Magda Dobosz*, Beata Kalska – Szostko

*Wydział Chemii, Uniwersytet w Białymstoku,
Ciołkowskiego 1K, 15-245 Białystok, Polska
e-mail: m.dobosz@uwb.edu.pl

Abstract

Wprowadzenie

1. Metoda

2. Charakterystyka wyjściowych włosów ludzkich i zwierzęcych

3. Charakterystyka włosów ludzkich oraz zwierzęcych poddanych działaniu czynników termicznych

3.1. Wymrażanie włosów – działanie temperatury ujemnej

3.2. Wygrzewanie włosów – działanie podwyższonej temperatury

4. Charakterystyka włosów ludzkich i zwierzęcych poddanych działaniu czynników mechanicznych

Uwagi końcowe

Piśmiennictwo cytowane

Mgr Magda Dobosz - absolwentka Wydziału Chemii na Uniwersytecie w Białymstoku, specjalność: Chemia Kryminalistyczna i Sądowa. W roku 2019 obroniła pracę magisterską z zakresu badań wpływu czynników zewnętrznych na strukturę i budowę włosów ludzkich i zwierzęcych. Obecnie doktorantka w Szkole Doktorskiej Nauk Ścisłych i Przyrodniczych na Uniwersytecie w Białymstoku w zakresie nauk chemicznych.



<https://orcid.org/0000-0002-3263-6826>

Dr hab. Beata Kalska – Szostko – adiunkt na Wydziale Chemii na Uniwersytecie w Białymstoku. Zainteresowania zawodowe związane są z otrzymywaniem i charakteryzacją nanomateriałów o cechach magnetycznych. Kierownik Centrum Syntezy i Analizy BioNanoTechno UwB - gdzie zajmuje się badaniami strukturalnymi i technikami obrazowania.



<https://orcid.org/0000-0002-6353-243X>

ABSTRACT

The main purpose of the presented study was to investigate and compare the influence of mechanical and thermal factors on the morphology of human and animal hair. Several factors that may occur during criminal offenses were selected for testing including cutting by a scalpel or scissors, damaging by a hammer; and high, or low-temperature thermal treatment (heating for 1h, or 24 hours at elevated temperatures 100°C, 200°C, and 300°C, as well as freezing for 24 hours at -20°C, or for 10 minutes in liquid nitrogen (-197°C)). The impact of selected mechanical and temperature factors on human and animal hair was made mainly on the basis of Scanning Electron Microscopy (SEM). Moreover, the elemental composition of the hair was investigated and analyzed using an EDX (Energy - Dispersive X-ray) spectrometry. Performed tests show the degree of human hair degradation depending on the examined factor and time.

Keywords: energy-dispersive X-ray spectroscopy, hair tests, forensic chemistry, scanning electron microscopy

Słowa kluczowe: badania włosów, chemia kryminalistyczna, skaningowa mikroskopia elektronowa, spektroskopia rentgenowska z dyspersją energii

WPROWADZENIE

Materiały pochodzące z organizmów żywych w badaniach kryminalistycznych nazywane są materiałami biologicznymi. Wśród nich wyróżnia się trzy grupy śladów biologicznych: tkanki (krew, skóra i naskórek, włosy, paznokcie, fragmenty mięśni, kości), wydzieliny (ślina, pot, nasienie) oraz wydaliny (mocz, kał, wymiociny, smółka płodowa). Są one kluczowym źródłem informacji dla techników kryminalistycznych umożliwiającym zrekonstruowanie zdarzenia, ze względu na prawdopodobieństwo pozostawienia śladu biologicznego przez wszystkich uczestników zajścia. Włosy jako jeden z materiałów biologicznych związane są z obecnością osoby w najbliższym otoczeniu miejsca, w którym zostały one znalezione [1-2]. Ważnym zadaniem eksperta jest ustalenie czy włos jest nienaruszony, czy podlegał działaniu czynników zewnętrznych, w wyniku których zaszły w jego morfologii zmiany. Można wyróżnić cztery podstawowe rodzaje uszkodzeń: natury biologicznej, mechaniczne, fizyczne i chemiczne. Uszkodzenia biologiczne zwane inaczej naturalnymi, spowodowane są działaniem na włosy np.: warunków atmosferycznych (słońca, wiatru, mrozu, deszczu), wody (słodkiej, słonej), procesów gnilnych, itp. Do uszkodzeń mechanicznych dochodzi między innymi podczas: czesania, mycia, drapania, zaplatania, ocierania, cięcia lub/i podczas przestępstw, w których doszło do przemocy fizycznej, czyli do szarpania lub wyrwania włosów. Uszkodzenia termiczne, to między innymi zastosowanie zbyt wysokiej temperatury podczas zabiegów kosmetycznych, np.: suszenia, prostowania bądź intencjonalne podpalenie lub zamrożenie włosów związane najczęściej z przestępstwami kryminalistycznymi [3-5]. Uszkodzenia chemiczne to m.in. złe postępowanie z chemią fryzjerską (farby, rozjaśniacze), zażywanie leków lub używek, specjalne destruktywne potraktowanie włosów substancjami chemicznymi itp. Działanie wybranych substancji chemicznych na włosy ludzkie zostało opisane w artykule [6]. Standardowo znaleziony na danym miejscu przestępstwa włos poddawany jest analizie w celu ustalenia jego źródła, czy jest to włos ludzki, czy zwierzęcy, z jakiej rasy, płci, części ciała pochodzi, jaki ma kolor, czy jest naturalny lub farbowany oraz w jaki sposób wypadł – samoistnie, poprzez wyrwanie, odcięcie, itp. [2, 5].

Wszystkie te informacje można uzyskać poprzez porównanie próbki ze znaną budową anatomiczną oraz mikroskopową włosów ludzkich i zwierzęcych pochodzących od różnych osobników. W ogólności włosy złożone są z dość podobnych do siebie łuskowato układających się komórek. Włosy wyrastające z głowy składają się z trzech głównych części: korzenia – części tkwiącej w skórze i sięgającej w głąb tkanki; trzonu/łodygi – części wyrastającej ponad skórę; końca wolnego – części szczytowej, niekiedy ostro zakończone, niespotykanej w innych rodzajach włosów np. pachowych [7-8]. Włosy składają się z licznych związków organicznych i nieorganicznych, dzięki czemu w zdrowym włosie możemy znaleźć takie pierwiastki jak: węgiel (C), tlen (O), azot (N), wodór (H), siarkę (S) oraz wapń (Ca), magnez (Mg), żelazo (Fe), miedź (Cu),

mangan (Mn) i cynk (Zn). Natomiast podstawowym organicznym budulcem włosów jest: białko - keratyna zawierająca aminokwasy: alifatyczne, aromatyczne oraz heterocykliczne. Keratyna w trzonie włosa tworzy długie włókna, które ściśle się ze sobą wiążą poprzez zastąpienie grup S-H wiązaniami S-S oraz poprzez chemiczne krzyżowe łącznie się z innymi białkami. Wynikiem tego jest twardość włosów oraz ich stabilność. Kolejnym ważnym związkiem jest melanina, pigment, który w głównym stopniu odpowiada za barwę włosów. Pozostałymi związkami obecnymi we włosach są materiały lipidowe pochodzące z sebum oraz gruczołów apokrynowych. Składają się one z wolnych kwasów tłuszczowych, mono, di- i trójglicerydów, estrów woskowych, węglowodorów i alkoholi [9-12]. Stężenie występujących związków we włosach zależy od płci, koloru włosów, wieku jak również pory roku, stylu życia, stosowanych kosmetyków i spożywanego produktów [13,14].

W niniejszej pracy wykorzystano metodę skaningowej mikroskopii elektronowej sprzężonej z analizą pierwiastkową SEM/EDX (Scanning Electron Microscopy/ Dispersive X-ray Spectroscopy) ze względu na możliwość jednoczesnego obrazowania (poznanie morfologii) i analizy składu chemicznego próbki. Celem badań było sprawdzenie wpływu uszkodzeń mechanicznych oraz działania wysokiej lub niskiej temperatury na morfologię włosów (ludzkich i zwierzęcych), a także poznanie ich składu.

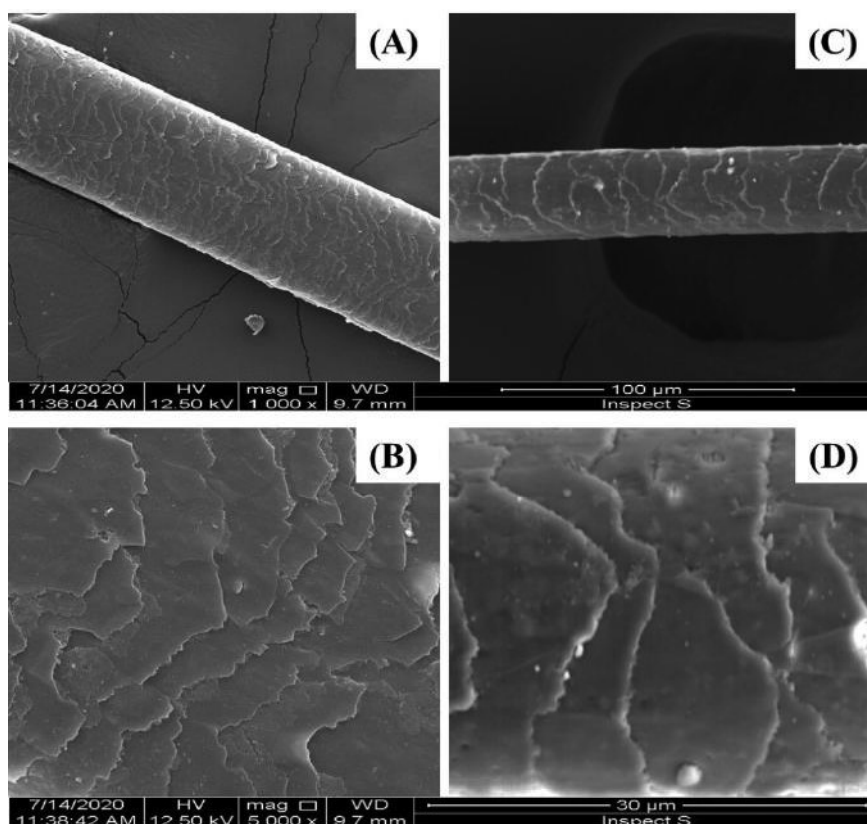
1. METODA

W celu poznania efektów mechanicznych uszkodzeń, włosy poddano działaniu różnych typów narzędzi i porównano je z nienaruszoną morfologią. Wykorzystano do tego: młotek – jako narzędzie tępokrawędziste, skalpel – narzędzie ostre oraz lekko stępione nożyczki – narzędzie pośrednie. Innym istotnym czynnikiem zewnętrznym mającym wpływ na morfologię włosów była zróżnicowana temperatura. W tym celu przechowywano włosy w zamrażarce przez 24 h w temperaturze -20°C , zalano na 10 minut ciekłym azotem (-197°C), a także ogrzewano w piecu w: 100°C , 200°C oraz 300°C przez okres 1 h lub 24 godziny. Do analizy pozyskano włosy: 23 letniej kobiety – rasy słowiańskiej o naturalnie brązowym kolorze oraz psa rasy York.

Przygotowane próbki wraz z materiałem referencyjnym zobrazowano za pomocą skaningowego mikroskopu elektronowego (INSPEC S50). W tym celu włosy umieszczono na taśmie węglowej przyklejonej do aluminiowych stolików przeznaczonych do preparatyki materiałów SEM. Dodatkowo materiał poddany analizie pokrywano cienką (5 nm) warstwą złota (Au) uzyskaną za pomocą napyłarki (LEICA EM ACE200). Takie postępowanie powodowało lepsze warunki obrazowania, co wpływało na odpowiednią jakość zdjęć.

2. CHARAKTERYSTYKA WYJŚCIOWYCH WŁOSÓW LUDZKICH I ZWIERZĘCYCH

Otrzymane wyniki SEM i EDX przedstawiono w seriach zależnych od rodzaju użytego czynnika (temperaturowy, mechaniczny) oraz czasu trwania eksperymentu. Poszczególne analizy porównano z materiałem odniesienia, zaprezentowanym na Rys. 1.



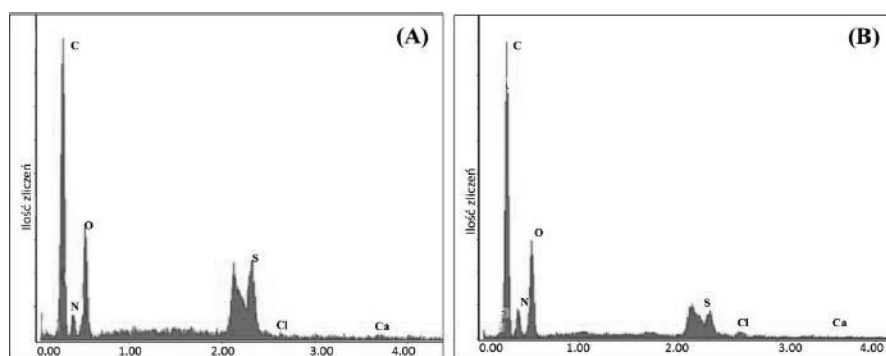
Rysunek 1. Zdjęcie SEM referencyjnych włosów (A, B) ludzkich oraz (C, D) zwierzęcych w powiększeniu odpowiednio: (A, C) – 1000x, (B, D) – 5000x

Figure 1. SEM photo of reference hair: (A, B) human and (C, D) animal magnification: (A, C) - 1000x, (B, D) - 5000x

Zdjęcia SEM przedstawione na rysunku (Rys. 1) to włosy ludzkie oraz zwierzęce (psie) odpowiednio w małym (A, C) – 1000X i większym (B, D) – 5000X powiększeniu. Obrazy przedstawiające mniejsze powiększenie (A, C) umożliwiają ocenę formy włosów na większej powierzchni oraz potwierdzenie ich jednorodności. Zbliżenia (B, D) uwidaczniają szczegóły ułożenia i stopień

postrzępienia łusek włosa. Można zauważyć, że włosy ludzkie charakteryzują się znacznie gęstszym ich upakowaniem, w porównaniu do włosów zwierzęcych (psich). Zróżnicowanie to jest ewidentne, gdyż w tym samym polu widzenia znajduje się znacznie więcej łusek na zdjęciu (B) w porównaniu do (D). W obu przypadkach kolejne warstwy ściśle przylegają do rdzenia, pomimo że ich krawędzie są silnie postrzępione. Świadczy to o dobrej kondycji włosów [8, 10]

W celu poznania składu pierwiastkowego włosów referencyjnych, wykonano analizę pierwiastkową EDX. Wyniki przedstawiono na Rys. 2 oraz w Tabeli 1.



Rysunek 2. Widmo EDX referencyjnych włosów: (A) ludzkich, (B) zwierzęcych

Figure 2. The EDX spectrum of reference hair: (A) human, (B) animal

Tabela 1. Skład pierwiastkowy referencyjnych włosów (A) ludzkich oraz (B) zwierzęcych (ilościowa analiza EDX)

Table 1. Elemental composition of reference hair: (A) human, (B) animal (quantitative EDX analysis)

Pierwiastek	% Wagowy $\pm 0,5\%$	
	Włosy ludzkie	Włosy zwierzece
C	46,2	57,8
N	18,0	13,0
O	29,6	24,6
S	3,6	3,5
Ca	1,8	0
Na	0	0,5
Cl	0,7	0,5

Jakościowe i ilościowe analizy pierwiastkowe (EDX) przedstawione na powyższym rysunku (Rys. 2) oraz w Tabeli 1 odpowiednio potwierdzają, iż skład obu typu włosów jest zbliżony. W większości (powyżej 95% całości) budują je cztery podstawowe pierwiastki tj.: węgiel (C), azot (N), tlen (O), siarka (S), co potwierdzają doniesienia literaturowe na temat składu związków organicznych wchodzących w strukturę włosów [5]. Ponadto stwierdzono również śladowe ilości (nieprzekraczające 1,8% wagowego) wapnia (Ca), chloru (Cl) oraz sodu (Na) które nie są standardowo identyfikowanymi pierwiastkami.

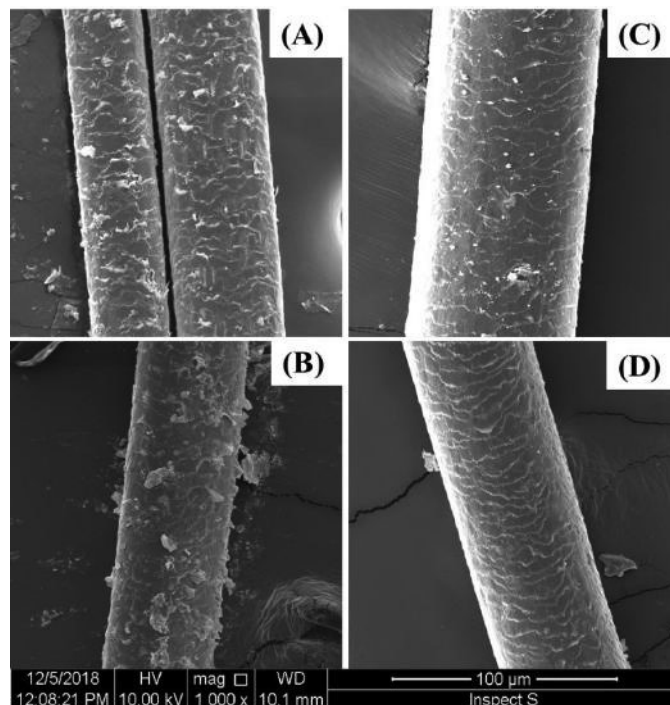
Analiza jakościowa i ilościowa włosów nienaruszonych/referencyjnych/wyjściowych posłużyła do stworzenia wzorca dla próbek modyfikowanych czynnikami temperaturowymi oraz mechanicznymi.

3. CHARAKTERYSTYKA WŁOSÓW LUDZKICH ORAZ ZWIERZĘCYCH PODDANYCH DZIAŁANIU CZYNNIKÓW TERMICZNYCH

3.1. WYMRAŻANIE WŁOSÓW – DZIAŁANIE TEMPERATURY UJEMNEJ

Próbki przygotowane z włosów ludzkich oraz zwierzęcych poddano działaniu ujemnej temperatury, co umożliwiło obserwację wpływu tego czynnika zewnętrznego, który można zaliczyć do naturalnych. W tym celu włosy wymrożono przez 24 godziny w zamrażarce (w temp. -20°C). Dla porównania do wymrożenia użyto również ciekłego azotu (-197°C), czas działania 10 min. Efekt eksperymentów przeprowadzonych na włosach przedstawiono na Rys. 3.

Obrazy (A, C) na Rys. 3 przedstawiają włosy poddane działaniu przez 24 godziny umiarkowanej temperatury ujemnej (-20°C). Wymrażanie w tych warunkach spowodowało rozpoczęcie procesu odwarstwiania łusek od rdzenia, co uwidocznia się ich odstawaniem (białe plamy), a zatem zwiększeniem nierówności krawędzi włosów [15]. Zdjęcia (B, D) natomiast przedstawiają efekt krótkotrwałego (10 minutowego) działania ciekłego azotu. Widać tu, że nawet tak krótki czas przebywania próbek w ekstremalnie niskiej temperaturze (-197°C) negatywnie wpływa, szczególnie na włosy ludzkie, powodując znaczne odwarstwianie się łusek na całej długości włosa. Na włosach zwierzęcych zmiany morfologiczne nie są tak wyraźnie widoczne, jak w poprzednim przypadku. Ubytki w powierzchni i strzępienie krawędzi są mniej intensywne. Eksperyment ten pokazuje zatem, że działanie niskich temperatur spowodowało znacznie większe zmiany na włosach ludzkich w porównaniu do zwierzęcych (poddanych tym samym testom). Można zatem stwierdzić, że włosy ludzkie są bardziej podatne na degradację wywołaną działaniem niskiej temperatury.

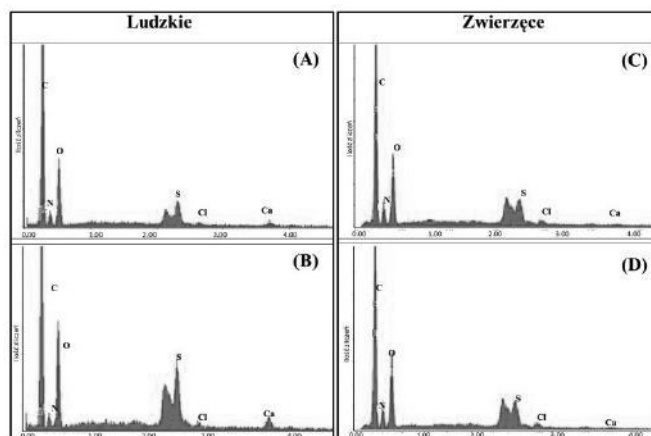


Rysunek 3. Zdjęcia SEM odpowiednio włosów (A, B) ludzkich, (C, D) zwierzęcych, poddanych działaniu temperatury: (A, C) -20°C przez okres 24 godzin, (B, D) 10 minutowe wymrażanie ciekłym azotem

Figure 3. SEM photos of hair (A, B) human, (C, D) animal, subjected to temperature (A, C) -20°C for 24 hours, (B, D) 10 minutes liquid nitrogen, respectively

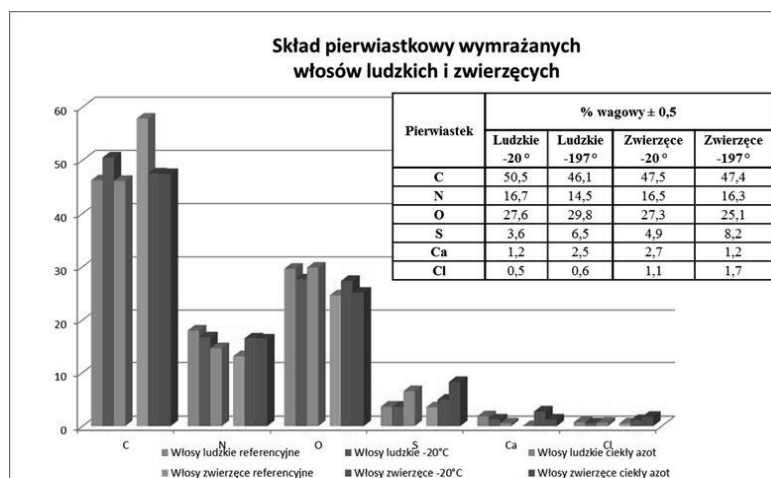
Ilościowe zmiany w składzie pierwiastkowym, zachodzące w obu typach próbek poddanych działaniu ujemnej temperatury przedstawiono na widmach EDX (Rys. 4). Zestawienie zidentyfikowanych pierwiastków wraz z ich udziałem procentowym zobrazowano na wykresie (Rys. 5).

Na rysunku (Rys. 5) zestawiono w kolumnach wyniki, ilościowego udziału procentowego pierwiastków w zależności od sposobu wymrażania (parami: włosy ludzkie oraz zwierzęce, odpowiednio: temperatura -20°C i -197°C) wraz z próbką referencyjną, co umożliwiło porównanie wpływu tych warunków na obecność pierwiastków. Taki sposób analizy pozwala wyciągnąć następujące wnioski: w porównaniu do składu referencyjnego oba typy włosów zmieniają swoje kompozycje. Różnią się one jednak tylko wzajemną relacją podstawowych pierwiastków. Jedyną zbieżną zależność dotyczy wymrażania obu typów włosów w ciekłym azocie, co powoduje dwukrotny wzrost zawartości siarki w stosunku do włosów niewymrażanych. Skład włosów nie jest bardzo wrażliwy na temperatury ujemne.



Rysunek 4. Widma EDX przedstawiające zmiany składu odpowiednio włosów (A, B) ludzkich, (C, D) zwierzęcych, poddanych działaniu temperatury: (A, C) -20°C przez okres 24 godzin, (B, D) 10 minutowe wymrażanie ciekłym azotem

Figure 4. EDX spectra representing changes in the chemical composition of hair (A, B) human, (C, D) animal, subjected to temperature (A, C) -20°C for 24 hours, (B, D) 10 minutes of liquid nitrogen, respectively



Rysunek 5. Wykres przedstawiający ilościowy skład pierwiastkowy włosów ludzkich i zwierzęcych wymrażanych w -20°C przez 24 godziny oraz przez 10 minut w ciekłym azocie (-197°C)

Figure 5. Graphical presentation of the elemental composition of human and animal hair subjected to temperature -20°C for 24 hours and 10 minutes of liquid nitrogen (-197°C)

We włosach ludzkich poziom węgla (C) wzrasta o 4% wagowe, natomiast poziom azotu (N), i tlenu (O) maleje o maksymalnie 2% po wymrażaniu w temperaturze -20°C . Włosy zwierzęce natomiast wykazują odwrotną zależność.

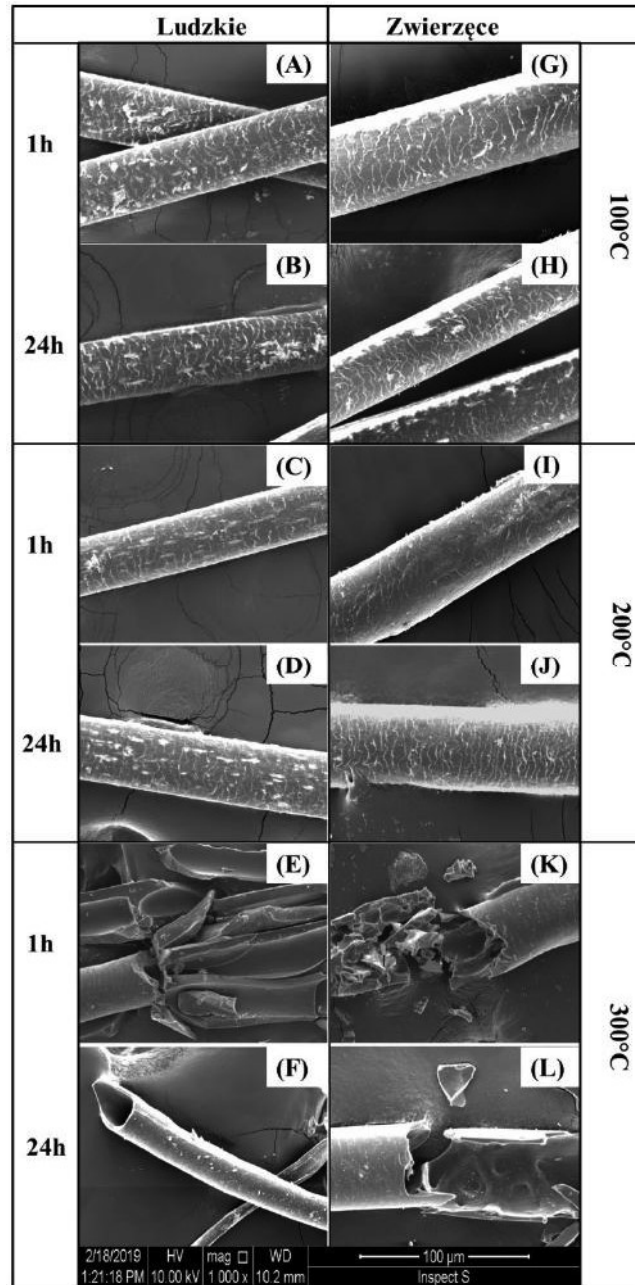
Tutaj drastycznie maleje zawartość węgla (C), bo o około 10% wagowych, bez względu na temperaturę, a wzrasta ilość azotu (N) i tlenu (O) w stosunku do próbki referencyjnej.

3.2. WYGRZEWANIE WŁOSÓW – DZIAŁANIE PODWYŻSZONEJ TEMPERATURY

W badaniach imitujących naturalne czynniki zewnętrzne, prócz działania niskiej temperatury, konieczne jest również sprawdzenie, co dzieje się wtedy, gdy zadziałamy podwyższoną temperaturą na włosy. Zaplanowano zatem serię eksperymentów, w których takie warunki zostały stworzone (temperatura: 100°C, 200°C, 300°C, czas 1 h, 24 h) i wybrano do badań te same dwie serie włosów (ludzkie i zwierzęce), które testowano obniżoną temperaturą.

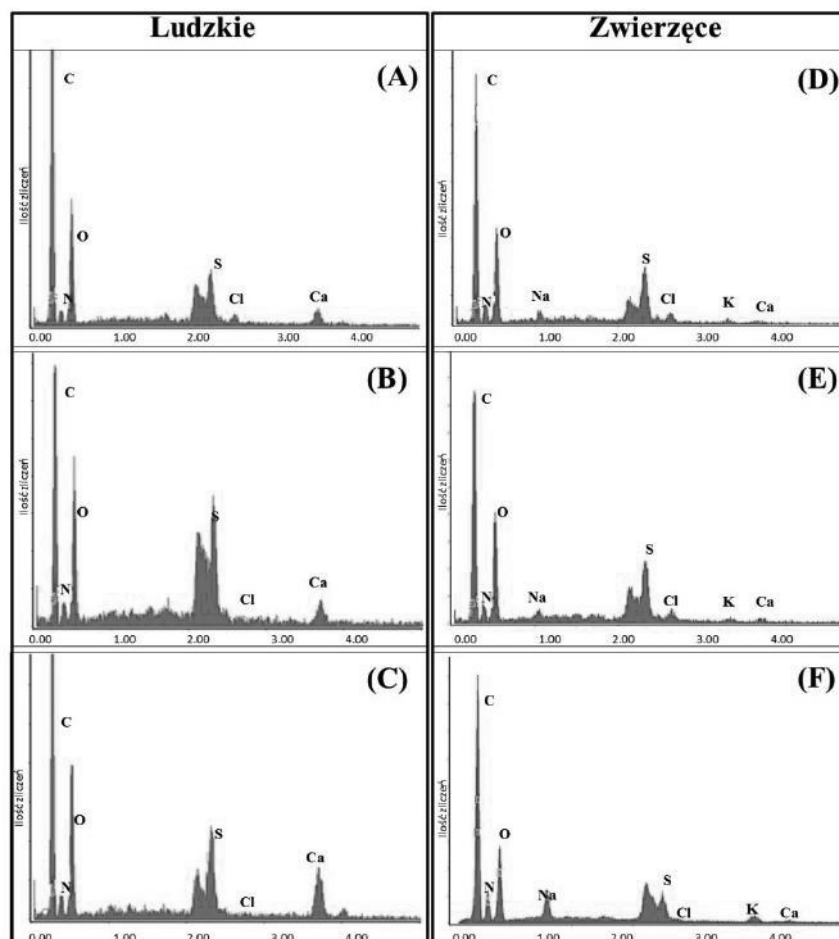
Przedstawione na rysunku (Rys. 6) zdjęcia SEM uwidaczniają kolejne etapy procesu degradacji termicznej materii organicznej, zależnej odpowiednio od czasu trwania eksperymentu (1 h lub 24 h) i temperatury wygrzewania (100°C, 200°C, 300°C). Występujące na obiektach jaśniejsze plamy (A-J) świadczą o zachodzących nieodwracalnych zmianach w morfologii włosów [11]. Do temperatury maksymalnie 200°C zachowana jest jednak pierwotna forma łusek. Zadziałanie tą samą temperaturą (100°C lub 200°C) przez 24 h powoduje bardziej zauważalne uszkodzenia struktury włosów nie tylko na powierzchni, ale również wewnątrz. Objawia się to nieregularną zmianą ich średnicy. Podwyższenie temperatury do 200°C i wydłużenie czasu do 24 h skutkuje zaawansowanymi zmianami formy wyjściowych obiektów, co szczególnie jest widoczne na zdjęciu (D, J). Kształt i regularność łusek są zachowane, ale ewidentne jest rozdęcie włosów [16], będące symptomem zachodzących nieodwracalnych zmian organicznych związków chemicznych wchodzących w skład włosów. Zdjęcia (E, F, K, L) przedstawiają zmiany wywołane działaniem temperatury 300°C. Widać, że już po godzinie trwania eksperymentu materia organiczna ulega degradacji. Tak bardzo wzrosło ciśnienie wewnątrz włosów, że spowodowało ich rozsądzenie [16]. W przypadku obu typów włosów, zauważalny jest zanik elastycznych wewnętrznych włókien widocznych na przecięciach włosów, co skutkuje powstaniem pustki. Zmiany te doprowadzają do złamania i kruszenia włosów już po delikatnym ich dotknięciu.

Na Rys. 7 przedstawiono przykładowe widma EDX zarejestrowane dla włosów ludzkich (A-C) i zwierzęcych (D-F) wygrzewanych przez 24 godziny w temperaturach 100°C, 200°C, 300°C. Ilościowe zestawienie wyników zaprezentowano na wykresach (Rys. 8), gdzie wskazano zależność temperaturową i czasową zidentyfikowanych pierwiastków odpowiednio we włosach: (A) ludzkich, (B) zwierzęcych.



Rysunek 6. Zdjęcia SEM włosów odpowiednio: (A-F) ludzkich, (G-L) zwierzęcych, poddanych działaniu temperatury: (A, B, G, H) 100 °C, (C, D, I, J) 200 °C, (E, F, K, L) 300 °C przez (A, C, E, G, I, L) 1 godzinę, (B, D, F, H, J, L) 24 godziny

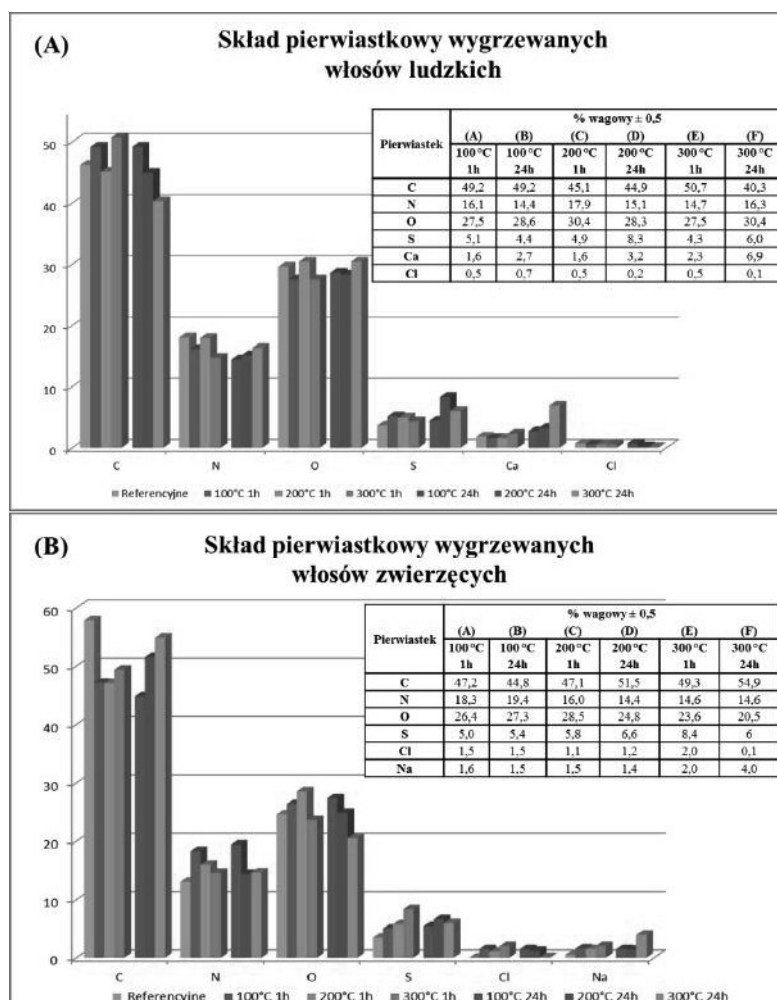
Figure 6. SEM images of: (A-F) human and (G-L) animal hair subjected to temperature: (A, B, G, H) 100°C, (C, D, I, J) 200°C, (E, F, K, L) 300°C for (A, C, E, G, I, L) 1 hour and (B, D, F, H, J, L) 24 hours, respectively



Rysunek 7. Widma EDX przedstawiające zmiany składu włosów odpowiednio: (A-C) ludzkich, (D-F) zwierzęcych powstające w wyniku ogrzewania w: (A, D) 100 °C, (B, E) 200 °C, (C, F) 300 °C przez 24 godziny

Figure 7. EDX spectra representing changes in the chemical composition of: (A-C) human, (D-F) animal hair resulting from temperature (A, D) 100°C, (B, E) 200°C, (C, F) 300°C for 24 hours, respectively

Na podstawie wykresów A i B (Rys. 8) można stwierdzić, że składy obu typów włosów zależne są od temperatury wygrzewania oraz czasu trwania eksperymentu. Na tendencje zmian mają wpływ oba czynniki. Obserwuje się ponadto, że o ile włosy są stosunkowo stabilne, biorąc pod uwagę skład przy krótkotrwałym wygrzewaniu, to znacznie bardziej zmieniają się podczas długotrwałego działania podwyższonej temperatury.



Rysunek 8. Wykres przedstawiający skład pierwiastkowy włosów (A) ludzkich i (B) zwierzęcych poddanych działaniu podwyższonej temperatury.

Figure 8. Graphical presentation the elemental composition of (A) human and (B) animal hair resulting from heat treatment.

Porównanie składów pierwiastkowych wygrzewanych włosów (Rys. 8) z wyjściowymi (Tabela 1) można, również podsumować następująco: włosy ludzkie są mniej wrażliwe na ten czynnik w porównaniu do włosów zwierzęcych.

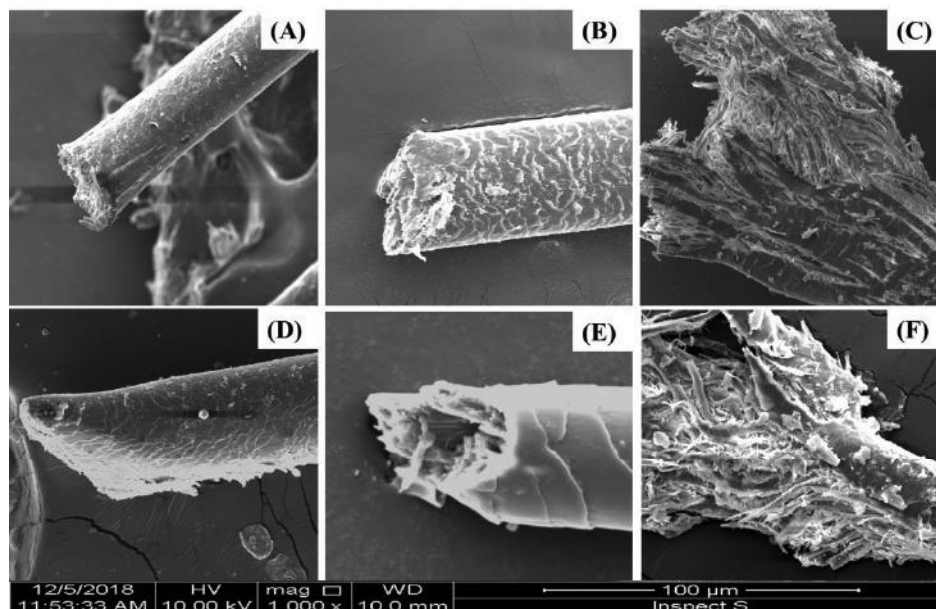
Ilość węgla, która we włosach ludzkich krótkotrwanie wygrzewanych w temperaturze 100-300°C wzrasta maksymalnie 3-4%, powyżej składu wyjściowego, znacząco maleje natomiast po 24 godzinnym działaniu temp. 300°C (o około 6%). Włosy zwierzęce wykazują odwrotną tendencję zmian. Średnia zawartość węgla jest niższa od referencyjnej przeciętnie o około 12% (wygrzewanie

krótkotrwałe). Wygrzewanie długotrwałe wpływa znacznie bardziej na wahania ilości węgla, po pierwotnym spadku o ponad 14%, w stosunku wartości referencyjnej, następuje stopniowy jego wzrost do poziomu niewiele mniejszego niż 5% poniżej pierwotnej wartości. Wahania zawartości azotu oraz tlenu podobnie zachowują się wraz z temperaturą. W serii włosów ludzkich widoczny jest w większości niewielki (maksymalnie 4%) spadek ilości tych pierwiastków. W próbkach zwierzęcych natomiast, w obu przypadkach, obserwowany jest wzrost zawartości N i C w odniesieniu do próbki referencyjnej. Natomiast w obu seriach próbek ilość siarki wzrasta niemalże dwukrotnie, co również obserwowano w testach niskotemperaturowych.

Porównując efekty uszkodzeń oraz wyniki analiz pierwiastkowych, można stwierdzić, że wygrzewanie przyczynia się do niedotlenienia komórek, a tym samym do uszkodzenia białek i lipidów zawartych we włosach. Skorelowane jest to ze spadkiem ilości węgla i azotu oraz zwiększającą się zawartością siarki i wapnia [17-18]. Spadek zawartości C i N jest wynikiem degradacji m.in. białka keratynowego i uwolnienia do otoczenia związków nieorganicznych oraz gazów w postaci np. NO₂, NO₃, CO₂, CO, C, NH₃, SCS, SCO [11, 19-22]. Natomiast obserwowany wzrost siarki to przyczyna wnikania grup budulcowych materii w wiązania dwusiarczkowe cystyny. Zwiększona ilość wapnia (tylko włosy ludzkie) wynika z procesu spalania oraz zwęglania struktury włosów [11, 23]. Przyczyną degradacji na powierzchni włosów wygrzewanych jest wystąpienie rozkładu cystyny w procesie denaturacji termicznej, co objawia się m.in. postrzępionym naskórkiem lub złamaną łuską [19, 24].

4. CHARAKTERYSTYKA WŁOSÓW LUDZKICH PODDANYCH DZIAŁANIU CZYNNIKÓW MECHANICZNYCH

W celu odtworzenia działania czynników mechanicznych zaplanowano doświadczenia, na dwóch seriach próbek włosów (ludzkich i zwierzęcych). W tym celu włosy referencyjne oraz potraktowane niską (-20°C, -197°C) i wysoką (100°C, 200°C i 300°C) temperaturą poddano: ciciu skalpelem, nożyczkami oraz uderzeniu młotkiem. Wyniki przedstawiające zmianę morfologii włosów wywołanych tymi czynnikami zestawiono na Rys. 9 - 12.



Rysunek 9. Zdjęcia SEM włosów: (A-C) ludzkich, (D-F) zwierzęcych poddanych (A, D) cięciu skalpelem, (B, E) cięciu nożyczkami, (C, F) uderzeniu młotkiem

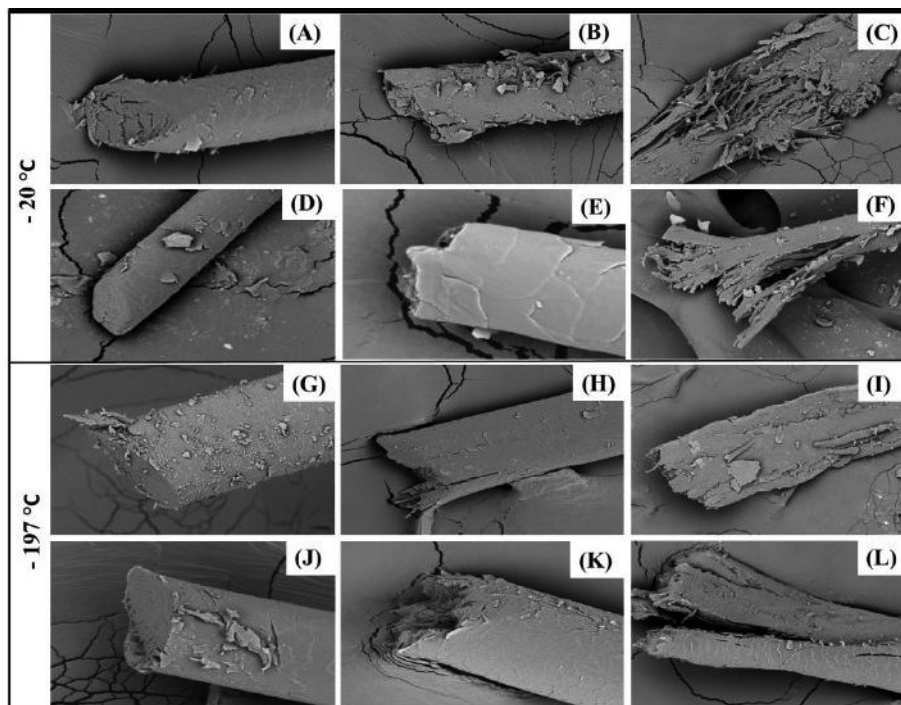
Figure 9. SEM images of hair: (A-C) human, (D-F) animal subjected to (A, D) a scalpel, (B, E) a scissors, (C, F) a hammer, respectively

Rys. 9 (A, D) przedstawia obrazy krawędzi włosów przeciętych skalpelem, który zaliczany jest do narzędzi ostrych. Czynność ta doprowadziła do uzyskania gładkiego brzegu włosa. Widoczne są tylko nieliczne postrzępienia włókien w ich wnętrzu. Skalpel pozostawił charakterystyczne skośne przecięcie w stosunku do osi włosa.

Rys. 9 (B, E) pokazuje efekt wykonania cięcia stępionymi nożyczkami, które możemy zaliczyć do narzędzi średnio-ostrych. W tym przypadku, na przekroju widoczne są wyraźnie postrzępione krawędzie z licznymi rozgniecionymi włóknami.

Rys. 9 (C, F) przedstawia morfologię włosów po uderzeniu młotkiem, który zaliczany jest do narzędzi tępokrawędzistych. Czynność ta doprowadziła do zmiążdżenia, postrzępienia i rozerwania ciągłej krawędzi włosów. Widoczne są tu liczne poszarpane włókna przypominające „frędzle”.

Wygląd przecięcia i powstałych w ten sposób nienaturalnych krawędzi pozwala na identyfikację sposobu działania czynnika mechanicznego na włosy. Zaobserwowane różnice w wyglądzie przecięć umożliwiają również, za pomocą badań porównawczych, na wskazanie właściciela włosa. W szczególności wtedy, kiedy są to różne gatunkowo osobniki [11, 15].



Rysunek 10. Zdjęcia SEM włosów: (A-C, G-I) ludzkich, (D-F, J-L) zwierzęcych, poddanych działaniu niskiej temperatury oraz: (A, D, G, J) skalpelem, (B, E, H, K) nożyczkami, (C, F, I, L) uderzeniu młotkiem

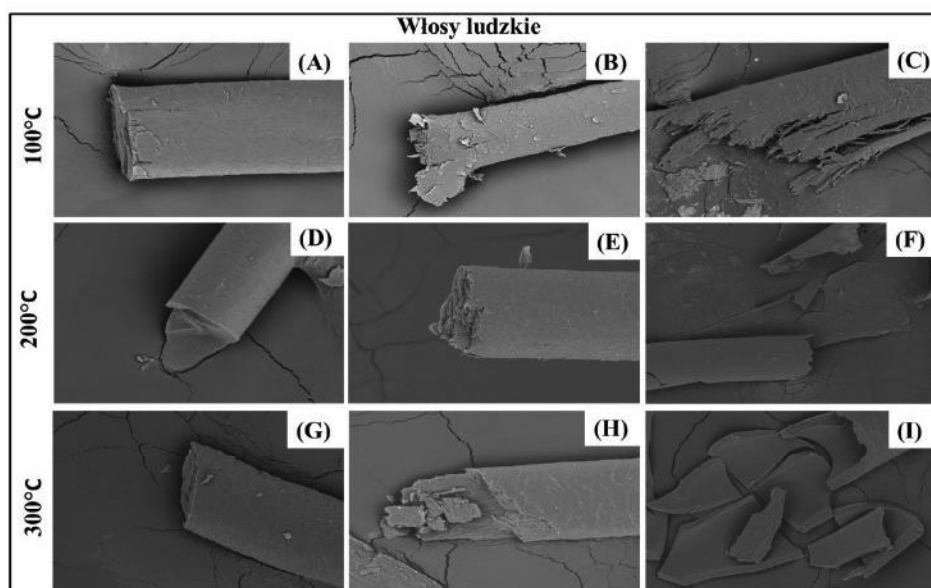
Figure 10. SEM images of hair: (A-C, G-I) human, (D-F, J-L) animal subjected to low temperature and then subjected to: (A, D, G, J) a scalpel, (B, E, H, K) a scissors, (C, F, I, L) a hammer, respectively

Na Rys. 10 (A-L) przedstawiono morfologię włosów, które przed działaniem czynników mechanicznych poddano niskiej temperaturze (wymrażaniu w -20°C oraz -197°C). Tak przygotowane włosy przecięto skalpelem (A, D, G, J) lub nożyczkami (B, E, H, K) oraz zmiądzono młotkiem (C, F, I, L).

W przypadku włosów ciętych skalpelem (A, D, G, J) oraz nożyczkami (B, E, H, K) wygląd przecięć jest bardzo zbliżony do wyjściowych (Rys. 9). Skalpel pozostawił ukośne gładkie przecięcie krawędzi. Natomiast cięcie nożyczkami doprowadziło do postrzępienia krawędzi włosów.

Dużo wyraźniejszy jest wpływ pierwotnych czynników zewnętrznych na efekt uderzenia włosów młotkiem, co przedstawiają obrazy (C, F, I, L). Tu widoczna jest różnica pomiędzy zdjęciami (C, F), a obrazami (I, L), czyli wpływem bardziej ujemnej temperatury. W pierwszym przypadku uderzenie młotkiem doprowadziło do postrzępienia, zmiążdżenia oraz rozerwania krawędzi włosów, podobnie jak w zobrazowanych włosach pierwotnych, bez względu na ich pochodzenie

(Rys. 9 (C, F)). W drugim przypadku, widoczny jest efekt działania ciekłego azotu. Po zamrożeniu włosy stały się bardziej elastyczne, przez co mocniejsze i mniej kruche. Uderzenie spowodowało jedynie zmiażdżenie (spłaszczenie) pierwotnej formy włosów ludzkich lub naderwanie krawędzi, w przypadku włosów zwierzęcych (psich).



Rysunek 11. Zdjęcia SEM włosów ludzkich, poddanych działaniu wysokiej temperatury oraz cięciu: (A, D, G) skalpelem, (B, E, H) nożyczkami, (C, F, I) uderzeniu młotkiem

Figure 11. SEM images of human hair, subjected to high temperature and then to: (A, D, G) a scalpel, (B, E, H) a scissors, (C, F, I) a hammer, respectively

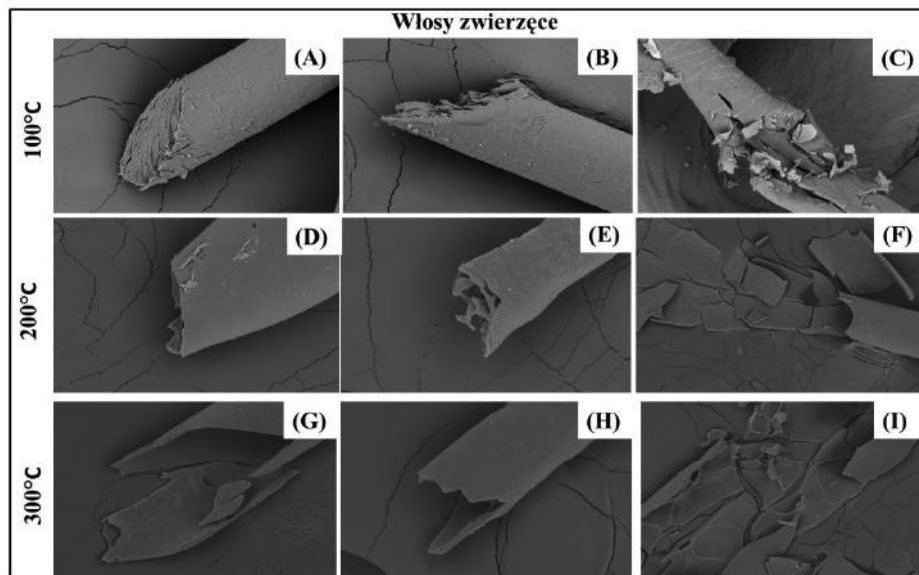
Na Rys. 11 zestawiono obrazy włosów ludzkich, początkowo wygrzewanych przez 24 godziny w temperaturze 100°C, 200°C lub 300°C, a następnie poddanych doświadczeniom imitującym czynniki mechaniczne, tak jak omawiano wcześniej.

Przejęcia skalpelem zebrano za zdjęciach (A, D, G). Widać, że bez względu na historię temperaturową rezultatem jest gładki niepostrzępiony brzeg włosa.

Włosy przecięte nożyczkami, bez względu na zastosowaną temperaturę (B, E, H), mają poszarpaną krawędź przekroju.

Rys. 11 (C, F, I) przedstawia obrazy włosów uderzonych młotkiem. W tym przypadku ewidentna jest różnica pomiędzy włosami wygrzewanymi w 100°C, a tymi poddanymi działaniu 200°C lub 300°C. Temperatura 100°C nie zmieniła włosów na tyle, żeby nie doszło do postrzępienia oraz rozerwania włókien włosów, tak jak jest to obserwowane w przypadku włosów pierwotnych (Rys. 9). Temperatuty 200°C i 300°C zmieniły natomiast strukturę wewnętrzną włosów, tak

znacznie, że uderzenie młotkiem powoduje ich zmiążdżenie i rozerwanie na kawałki (warstwowo 200°C, a całkowicie 300°C), powstaje w nich pustka.



Rysunek 12. Zdjęcia SEM włosów zwierzęcych, poddanych działaniu wysokiej temperatury oraz cięciu: (A, D, G) skalpelem, (B, E, H) nożyczkami, (C, F, I) uderzeniu młotkiem

Figure 12. SEM images of animal hair, subjected to high temperature and then to: (A, D, G) a scalpel, (B, E, H) a scissors, (C, F, I) a hammer, respectively

Na Rys. 12 zebrano analogiczną serię do Rys. 11 dotyczącą włosów psich, gdzie poddano je działaniu wysokich temperatur (100°C, 200°C lub 300°C) przed zadziałaniem czynnikami mechanicznymi.

Zdjęcia A, D, G (Rys. 12) przedstawiają wygrzane włosy zwierzęce przecięte skalpelem. Widoczna jest wyraźna różnica pomiędzy nimi, na włosach wygrzanych w 100°C skalpel pozostawił ukośne przecięcie z nielicznymi postrzępioniami, co jest podobne do włosów pierwotnych. Istotne różnice widoczne są jednak już w przypadku włosów ogrzewanych w 200°C, tu cięcie ujawnia zmiany w strukturze wewnętrznej, która staje się bardziej porowata. Włosy wygrzewane w 300°C ulegają całkowitej destrukcji po cięciu.

Rys. 12 (B, E, H) to obrazy wykonane dla włosów przeciętych nożyczkami. Przecięcia włosów wygrzewanych w temperaturze 100°C charakteryzują się poszarpaną krawędzią przecięcia z licznymi włókami, analogicznie do zdjęć na Rys. 9 i 11. Włosy wygrzewane w 200°C to obraz (E). Krawędź tego przecięcia jest bardzo nierówna, co jest spowodowane obecnością pustych przestrzeni wewnątrz

włosów wywołanych degradacją materii organicznych w temp 200°C. Przecięcie włosów poddanych działaniu temp. 300°C ujawnia całkowicie pusty środek włosa oraz bardzo nierówną krawędź.

Włosy uderzone młotkiem zestawiono na zdjęciach C, F, I (Rys. 12). Działanie tego czynnika na wygrzewanych włosach zwierzęcych wskazuje na zmiany mechaniczne włosów zachodzące pod wpływem wysokich temperatur. W przypadku włosów poddanych temperaturze 100°C - efektem uderzenia jest częściowe zmiżdżenie oraz rozerwanie włókien. Natomiast włosy poddane eksperymentowi, po wygrzewaniu w temperaturze 200°C oraz 300°C, uległy całkowitemu zniszczeniu i rozpadowi na małe kawałki. Widoczny jest całkowity zanik elastycznych włókien wewnętrznych.

Podobnej serii eksperymentów poddano włosy wygrzewane w wysokich temperaturach przez 1 godzinę. Efekty wpływu temperatury nie są tak drastyczne, jak po czasie 24 godzin. Jednak potwierdzają, że włosy zwierzęce są mniej odporne na działanie wysokiej temperatury, w porównaniu do włosów ludzkich, co ujawnia się w zmianie ich charakterystyki mechanicznej.

UWAGI KOŃCOWE

a) Działanie niskiej temperatury

Morfologia włosów poddanych działaniu -20°C oraz ciekłego azotu (-197°C) wykazuje liczne wymrożenia łusek, co skutkuje odstawianiem ich od rdzenia. Składy pierwiastkowe włosów wyjściowych oraz podanych eksperymentowi tylko nieznacznie się różnią, co oznacza, że odtworzone warunki nie mają większego wpływu na skład pierwiastkowy włosów.

b) Działanie wysokiej temperatury

Ogrzewanie włosów w podwyższonej temperaturze przez okres 1 godziny i 24 godzin pokazuje ich trwałość temperaturową. Stosowanie temperatury 100°C oraz 200°C (niezależnie od czasu działania) może powodować powstawanie na powierzchni włosów jaśniejszych plam, zmianę ich średnicy oraz niewielkie rozdęcia. Jednak, w tym zakresie temperaturowym, w każdym przypadku łuski są wyraźne zachowane. Inaczej wyglądają włosy po zadziałaniu temperaturą 300°C. Wtedy ewidentnie dochodzi do trwałego uszkodzenia wewnętrznej struktury włosów. Powstają pęcherzyki powietrza w ich wnętrzu, które doprowadzają do rozsadzenia poprzedzonego zanikiem włókien. Włosy stają się kruche i łamliwe nawet przy lekkim dotknięciu. Analiza ilościowa składu pierwiastkowego wygrzewanych włosów ludzkich i zwierzęcych pozwala stwierdzić, że wysoka temperatura ma wyraźniejszy wpływ na zawartość pierwiastków w obu rodzajach włosów.

Wykazano, iż temperaturowe czynniki skutkują odmiennymi zmianami składu włosów w zależności od pochodzenia (ludzkie czy zwierzęce), co może być spowodowane częściową adaptacją ludzi do warunków życia.

c) Działanie czynników mechanicznych

Poddanie włosów działaniu czynników zewnętrznych takich jak: cięcie i uderzenie, pozwoliło ustalić, jaki ślad pozostawia każdy rodzaj narzędzi. Zależne jest to od jego typu i ostrości. Skalpel jako narzędzie ostre pozostawia gładkie przecięcie, z nielicznymi postrzępionymi. Nożyczki, które są średnio-ostre pozostawiają wyraźnie rozgałęzione krawędzie z pogniecionymi włóknami. Natomiast uszkodzenia wykonane narzędziem tępokrawędzistym, typu młotek, powoduje zmiażdżenie i rozerwanie włosów, co przejawia się ich poszarpaniem, a nawet całkowitą degradacją.

Powstałe we włosach zmiany są łatwe do zidentyfikowania, ale zależą również od rodzaju włosów (ich pochodzenia).

PIŚMIENNICTWO CYTOWANE

- [1] I. Bogusz, M. Bogusz, Technika Kryminalistyczna, ślady biologiczne, Centrum Szkolenia Policji, Legionowo, 2013.
- [2] M. Goc, J. Moszyński, Ślady kryminalistyczne - Ujawnianie, zabezpieczanie, wykorzystanie, Warszawa, 2007.
- [3] W.D. Douglas, Forensic Science Communications, 2000, **5** [archives.fbi.gov 15.10.2020].
- [4] M.M. Houck, Forensic Sci Rev., 2005, **17**, 51.
- [5] K. Steck-Flynn, Forensic Science, Trace & DNA, 2013 [crimeandclues.com 15.10.2020].
- [6] M. Dobosz, B. Kalska – Szostko, Wiadomości Chemiczne, **74**, 2020, 453.
- [7] A. Bochenek, M. Reicher, Anatomia człowieka V, PZWL, Warszawa, 2008.
- [8] B. Bhushan, Nanomechanical, and Nano Tribological Studies, 2010.
- [9] P. Staroń, M. Banach, Z. Kowalski, Chemik, 2011, **65**, 1019.
- [10] N. Chen, B. Bhushan, J. Microsc., 2005, **220.2**, 96.
- [11] R. Włodarczyk, Historia, teraźniejszość i perspektywy kryminalistycznych badań włosów ludzkich, Wyższa Szkoła Policyjna, Szczytno, 2007.
- [12] R.D.C. Comis – Wagner, P.K. Kiyohara, M. Silveira, I. Joekes, J. Microsc., 2017, **226**, 54.
- [13] F.I. Abdulrahman, J.C. Akan, Z.M. Chellube, M. Waziri, World Environment 2012, **2**, 81.
- [14] S. Robertson, News Medical Life Sciences, 2019.
- [15] K. Świech; Prokuratura I Prawo, 2012, **10**, 133.
- [16] E. Pangerl, K. Igowsky, JASTEE, 2015, **6**, 17.
- [17] P. Hallegot, R. Peteranderl, C. Lechene, J. Invest. Dermatol., 2004, **122**, 381.
- [18] A. Coroaba, A.E. Chiriac, L. Sacarescu, T. Pinteala, B. Minea, S.A. Ibanescu, M. Perlea, A. Moraru, I. Esanu, S. Maier, A. Chiriac, M. Pinteala, PeerJ, 2020, **8**.
- [19] C. Popescu, C. Gummer, J. Coset. Sci., 2016, **38**, 433.
- [20] C.R.R.D. Lima, L.D.B. Machado, M.V.R. I Velasco, in., J Therm Anal Calorim, 2018, **132**, 1429.
- [21] M. Brebu, L. Spiridon, J. Anal. Appl. Pyrolysis, 2011, **91**, 288.
- [22] R. Rigoletto, G. Zhang, T. Gilecce, L. Foltls, i in., JCS, 2011, **62**, 265.
- [23] F.J. Wortmann, G. Wortmann, J. Marsh, K. Meinert, J. Struct. Biol., 2012, **177**, 533.

- [24] C.E. Cruz, C. Costa, A.C. Gomes, T. Matama, P.A. Cavaco, *Cosmetics*, 2016, **3**.

Praca wpłynęła do Redakcji 18 grudnia 2020 r.