

ОСОБЛИВОСТІ СТРУКТУРИ НОРМАЛЬНОЇ ТА ЗВАЛЯНОЇ ВОВНИ УКРАЇНСЬКОЇ ГІРСЬКОКАРПАТСЬКОЇ ПОРОДИ ОВЕЦЬ

Н.Р. МОТЬКО, В.М. ТКАЧУК *, Н.З. ОГОРОДНИК,
А.О. БОЙКО, О.І. ЗАЯЦЬ

Львівський національний університет ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Ґжицького,
вул. Пекарська, 50, Львів, 79010, Україна

E-mail: vitalii-tkachuk@ukr.net, nataliamotko@ukr.net, nataohorodnyk@ukr.net, bujko6666@gmail.com, zaychyk1515@gmail.com

* Автор для кореспонденції: В.М. Ткачук, e-mail: vitalii-tkachuk@ukr.net

Вовна цінна і незамінна сировина для текстильної промисловості, однак значна її кількість є дефектною. Покращення якісних характеристик вовни неможливе без вивчення її структури. З огляду на це, метою нашої роботи було вивчити структуру нормальної та звальної вовни овець української гірськокарпатської породи. Зразки вовни були розділені на ость і пух. Поверхню волокон вивчали за допомогою сканувальної електронної мікроскопії (SEM), поперечні розрізи — трансмісійної електронної мікроскопії (TEM), кератози — обробкою надкислотами та лугом. Кортекс пухових волокон характеризується білатеральною будовою, тобто складається із орто- і паракортикальних клітин, а структурі ості властива радіальна асиметричність. Особливістю структури остьових волокон, є наявний серцевинний шар, який розміщений у центральній частині волоса та побудований із пористої тканини, яка містить порожнини. Кутикулярний шар ості, в порівнянні з пуховими волокнами, містить більшу кількість лусочок, які відрізняються за своєю формою, і саме цей шар зазнає найбільших змін у звальній вовні, на що вказують відшаровані в окремих місцях лусочки зі згладженими краями та деформованою поверхнею, а також суттєве зменшення фракції бета-кератози причому як у остьових (з 15,28 до 11,98 %, $P < 0,01$), так і у пухових (з 12,16 до 9,94 %, $P < 0,001$) волокнах. Отже, звальювання вовни призводить до пошкодження її кутикулярного шару, причому як у остьових, так і у пухових волокнах, а розкриття цих механізмів дозволяє розробити ефективні заходи попередження та ліквідації цієї вади вовни.

Ключові слова: вовняне волокно, ость, пух, кутикула, кортекс, серцевина.

Вступ. Вовна є природним матеріалом, який володіє цілим комплексом унікальних фізико-хімічних властивостей і широкими можливостями поєднання з іншими волокнистими матеріалами, що робить її цінною і незамінною сировиною для текстильної промисловості (Ibrahime et al., 2022; Popescu et al., 2024).

Вовняне волокно побудоване з трьох шарів: тонкої кутикули або лускатого шару, кортексу та серцевини, які об'єднані між собою клітинно-мембранними комплексами. Серцевина властива не усім типам волоса, а лише ості та мертвому, а іноді і перехідному волосу (Baskan-Bayrak et al., 2024; Popescu et al., 2024).

Starkova et al. (2022) вказують, що кутикула, або лускатий шар становить близько 10–15 % від загальної маси волокна та формується щільно з'єднаними між собою зроговілими клітинами (лусочками). Вони можуть мати плоску, гофровану або неправильну форму, і розташовані черепицеподібно або короноподібно у напрямку до верхівки волокна, перекриваючи одна одну, приблизно на половину або на дві третини своєї довжини. У грубих волокнах лусочки мають неправильну форму і охоплюють його навколо не поодинокі, а по дві, а іноді і три. У міру наближення до шкіри типовість лускатого шару зменшується, і біля самої цибулини він відсутній (Giteru et al., 2023; Tkachuk et al., 2024). Цей шар захищає розташовані під ним клітини коркового шару, а отже і волокно в цілому, від шкідливих впливів зовнішніх чинників (Shang et al., 2024).

Електронно-мікроскопічними дослідженнями встановлено, що ширина клітин кутикули становить від 20 мкм, довжина від 30 мкм, а товщина може коливатися в межах 0,5–2,0 мкм, клітини розташовані в один шар і дещо перекривають одна одну з опуклого боку завитка, тобто з боку ортокортексу, і можуть розташовуватися в 1–2 шари з більшою щільністю перекривання клітин з увігнутого боку завитка, тобто з боку паракортексу (Plowman et al., 2022).

Кутикула побудована з трьох шарів (Madan and Chakraborty, 2024), які відрізняються за вмістом цистину. Найбільше його міститься у епікутакулі, а саме в А-шарі — біля 37 %, у екзокутакулі вміст цистину сягає майже 15 %, у

а ендокутикулі — 3 % (Zhang et al., 2022). Поверхня кутикули вкрита ліпідним шаром, який через 18-метилейкозанову кислоту зв'язаний із залишком цистину протеїну і відповідає за гідрофобні властивості волоса (Wang et al., 2024).

Згідно з Ranjit et al. (2022), кортекс, або корковий шар, розташований під кутикулою, і займаючи основну масу волокна визначає фізико-механічні та хімічні властивості вовни. Побудований він з декількох ярусів, щільно притиснутих одна до одної, веретеноподібних клітин, кожна з яких оточена клітинною мембраною. Кортекс становить 70—90 % загальної маси волоса (Fellows et al., 2022). Клітини кортексу побудовані із щільно розміщених циліндричних ниткоподібних макрофібрил, які складаються з мікрофібрил, а ті у свою чергу з інтермедіальних філаментів (Zhang et al., 2021), що занурені в аморфне середовище (Cao et al., 2022).

Серцевинний, або мозковий шар, наявний лише у волокнах грубої та напівгрубої вовни і становить до 15 % (Das and Das, 2022). Клітини серцевинного шару розташовані у центральній частині волокна суцільною, або переривчастою смугою. Цей шар представлений пухкою пористою тканиною із специфічних вакулізованих клітин (Kaneta et al., 2021).

Boostani et al. (2023) підкреслюють, що овеча вовна, за рахунок незворотного переплетення і зближення вовнових волокон, володіє такою властивістю, як здатністю звалюватися у щільну і міцну масу — звалок (повсть). Ця здатність вовни покладена в основу войлочно-валяльного виробництва при виготовленні войлоку, валянок, фетру (Santos et al., 2022). Однак вовна може звалюватися і на тілі вівці, і це перетворює цю властивість на серйозну ваду.

У вівчарстві відоме явище «підрунювання» вовни (Lawrence, 2003), яке починається у ранньовесняний період і не вважається вадою, оскільки воно полегшує стриження, але звалювання вовняного покриву, яке охоплює 50 % і більше довжини косиці, відносять до суттєвої вади. Її виникненню сприяє збільшення вологи на шкірі та у руні овець, яке виникає, в наслідок прискорення обмінних процесів з посиленням потовиділення, при підвищенні температури навколишнього середовища (Al-Ramamnen, 2024; PulidoRodriguez, et al., 2025). В результаті тертя волокон у косицях, лусочки

кутикулярного шару чіпляються одна за одну, утворюючи звалкоподібний пласт. Найчастіше це зустрічається у грубововнових та напівгрубововнових овець (Vinod et al., 2024).

Зваляну вовну вважають дефектною і оплачують значно нижче за нормальну (Zhang et al., 2022). Руна, з наявністю у них звалку, є малоцінними, оскільки при переробленні їх практично не можливо розчесати, і вони піддаються розриву. До того ж, така вовна втрачає свою міцність (Allafi et al., 2022).

В останні роки у гірських районах українських Карпат (Закарпатська, Чернівецька, Івано-Франківська та Львівська області), де розводять напівгрубововнових овець української гірсько-карпатської породи, зріс попит на вовну. Це зумовлено тим, що вона є ідеальною сировиною для виготовлення таких виробів, як ліжники, килими, ковдри, покривала та інше (Surgun et al., 2021). Однак значна кількість вовни овець цієї породи є зваляною. Попередження виникнення і ліквідація цієї вади потребує глибокого розуміння механізмів що її спричиняють, а воно не можливе без вивчення структури такої вовни. Нажаль дані, які присвячені вивченню структури зваляної вовни напівгрубововнових порід овець і, зокрема, української горсько-карпатської породи, у науковій літературі практично відсутні. З огляду на це, метою даної роботи було дослідити і більш детально розкрити дане питання.

Матеріали та методи. Об'єктом досліджень служили зразки вовни повновікових лактуючих вівцематок української гірськокарпатська породи, які належали ФГ «Прометей» Коломийського району Івано-Франківської області. Тварини перебували на пасовищному утриманні. Вовну для досліджень відбирали у 20 тварин (10 з нормальною за станом вовною і 10 з вираженим звалком) з ділянки руна за лопаткою під час весняної стрижки овець.

Зразки вовни промивали в нейтральному миючому розчині, ополіскували і висушували, після чого вони були розділені на пухові та остьові волокна. Проводили дану процедуру в ручну за допомогою пінцета з урахуванням зовнішніх ознак окремих волокон (остьові — товсті, грубі, довгі, пружні, блискучі, з малою або відсутньою звивистістю; пухові — тонкі, м'які, короткі, еластичні, пухкі, матові, зви-

висті). З метою видалення жиропоту, вовну екстрагували тетрахлорметаном впродовж 5 год в апараті Сокслетта.

Дослідження структури вовни. Поверхню вовняних волокон досліджували за допомогою сканувального електронного мікроскопа JEOL JSM-T220A (Японія), для чого у напилювачі ВУП-5 волокна металізували шляхом термічного нанесення тонкого шару (до 10 нм) міді. Для фотографування поверхні зразків використовувалось збільшення $\times 750$ і $\times 1000$, при прискорюючій напрузі 20 кВ.

Структуру вовни вивчали за допомогою трансмісійного електронного мікроскопа ПЕМ-100. Для цього використовували пучки по 10–20 штук паралельно розміщених волосин довжиною 8–10 мм. Фіксували зразки за допомогою осмієвого фіксатора, при кімнатній температурі, 1,5%-вим розчином чотириокису осмію у 0,2 н какодилатному буфері (рН 7,2) впродовж 24 год, після чого промивали та зневоднювали. В подальшому досліджувані зразки просочували заливним середовищем — розведеним оксидом пропілену у співвідношенні 1 : 1, і чистим заливним середовищем, протягом 12 год за кімнатної температури. Для отримання зображень препарати заливали в епоксидну смолу EPON 812 і MNA. Полімеризацію блоків проводили в термостаті впродовж 48 год при 60 °С. Із отриманих блоків готували зразки на ультратомі УМТП 6М за допомогою алмазного ножа фірми «Diatome» (Швейцарія). Ультратонкі зрізи контрастували цитратом свинцю й ураніл-ацетатом і використовували для перегляду та фотографування. Для досліджень використовували реактиви фірми «Fluka», а оксид осмію — фірми «Sigma». Фотографії отримували за допомогою цифрової фотокамери «Sony H 9» при збільшенні $\times 4000$ та $\times 8000$.

Вивчення кератоз. Фракціонування кератоз проводили методом R.S. Asquith and D.C. Parkinson (1966), згідно якого надкислоти окиснюють дисульфідні зв'язки у молекулі кератину, а за допомогою лугу досягається остаточне розщеплення волокон. З цією метою зразки вовни масою 1 г занурювали у 1,6%-вий розчин надоцтової кислоти у колби Ерленмейера при температурі 25 °С на 48 год, постійно струшуючи на апараті Шуттеля. Після

цього вовну промивали дистильованою водою і висушували при кімнатній температурі.

Окиснену вовну занурювали у розчин гідроксиду натрію (на 100 мг вовни 10 мл 0,02 н. NaOH), залишаючи на 24 год при постійному струшуванні. За допомогою лійок Бюхнера, через попередньо зважені паперові фільтри (синя стрічка), відфільтровували розчинену фракцію; а нерозчинну частину, що залишалася на них (бета-кератозу) промивали послідовно дистильованою водою, спиртом, спирт-ефіром і ефіром, і гравіметрично визначали вміст бета-кератози.

Альфа-кератозу виділяли із фільтрату, додаючи концентровану оцтову кислоту (рН 4,0), при чому випадав білий осад. А одержаний на фільтрі (синя стрічка) фільтрат, що при цьому залишався, відповідав гамма-кератозі. Його нагрівали до 40 °С і добавляли абсолютний спирт, в наслідок цього він перетворювався у порошок. Вміст отриманих таким чином альфа- та гамма-кератоз обчислювали гравіметрично і виражали у відсотках.

Статистичний аналіз. Аналіз отриманих експериментальних даних проводили за допомогою програми «Excel». Перевірку даних на нормальність проводили за допомогою тесту Шапіро-Уїлка. Результати досліджень опрацьовували статистично з використанням середнього арифметичного та стандартної похибки ($M \pm m$) і достовірного інтервалу для оцінки ступеня вірогідності (p) за допомогою t -критерію Стюдента. Розбіжності вважали статистично вірогідними при $p < 0,05$.

Результати. В результаті проведення сканувальної електронної мікроскопії встановлено, що кутикулярний шар пухових волокон (рис. 1, а) побудований із ороговілих лусочок. Останні розміщені черепицеподібно у напрямку від кореня до кінчика волокна, і уздовж них, від основи до вершини, спостерігаються боріздки, що вказують на орієнтацію їх структурних компонентів. Поверхня ості є дещо іншою (рис. 1, б, в). Перш за все, ці волокна більші у діаметрі. Кількість кутикулярних лусочок у них більша, а їх форма відрізняється від лусочок пухових волокон тим, що вони мають неправильну форму і охоплюють стрижень не поодинокі, а по дві, а іноді і три. Звальяна ж

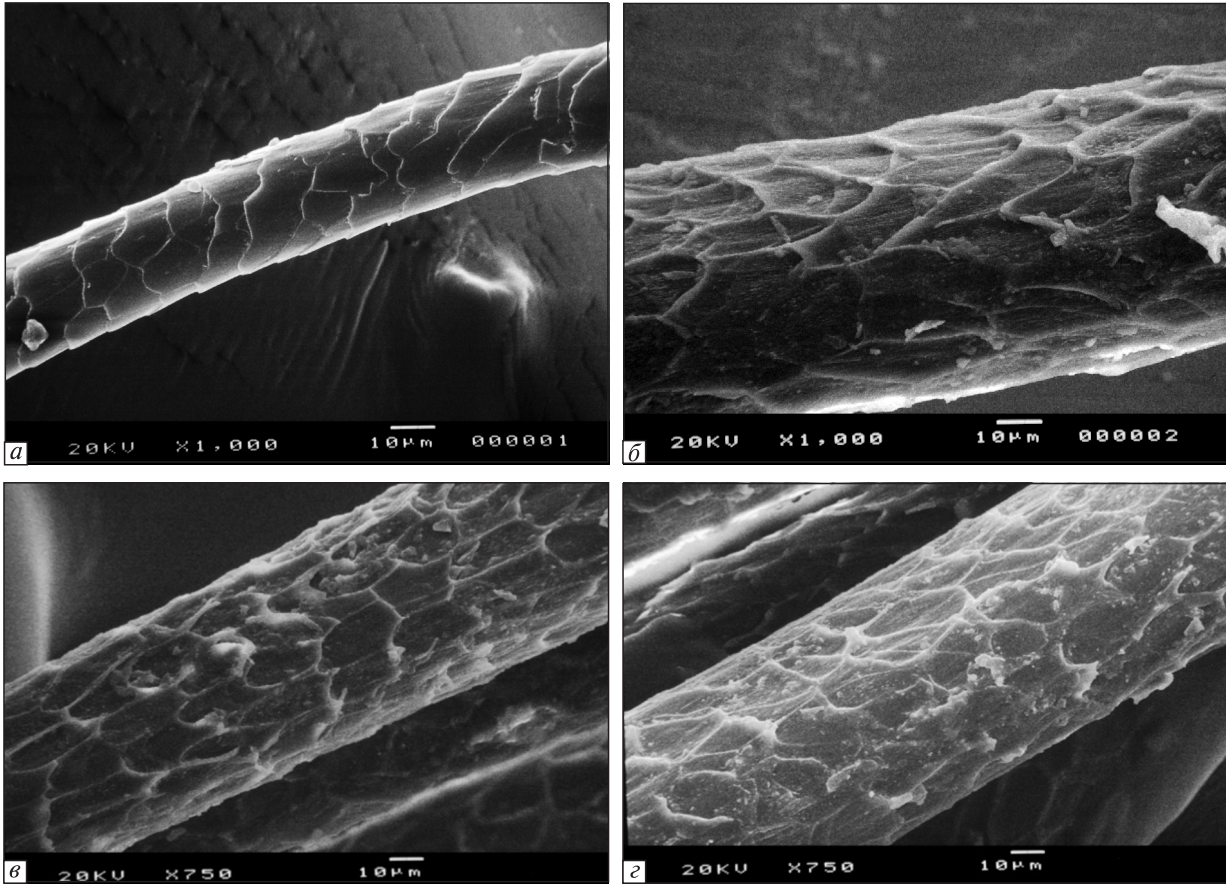


Рис. 1. Зображення зовнішньої поверхні пухового (а), нормального остьового (б, в) та звального остьового волокна (г), $\times 750$, $\times 1000$

вовна характеризується порушенням цілісності кутикулярного шару (рис. 1, г).

Проведені електронно-мікроскопічні дослідження вказують на те, що кутикулярний шар має складну структурну організацію. Зокрема, з рисунка 2, а видно шари кутикули: а — епікутикула, б — екзокутикула і с — ендоктикула, які з'єднані між собою d — клітинно-мембранними комплексами (КМК).

Рисунок 2, б відображає дві морфологічно різні ділянки волоса, а саме кутикулу і кортекс. Останній займає основну частину волокна. Дослідження показали, що практично усі кортексальні клітини округлої форми, щільно розміщені одна біля одної, та орієнтовані вздовж осі волоса. Натомість прилеглі до кутикули клітини, у переважній більшості сплюснені у тому ж напрямку, що й кутикула.

Нашими дослідженнями встановлена наявність певних породних особливостей структури вовни української гірськокарпатської породи овець, що виражається у різній будові кортекса вовняного волокна, а саме у розміщенні орто- і параклітин. Так, рис. 2 видно, що кортекс пухового волокна має білатеральну будову, тобто складається із орто- і паракортексальних клітин, які різняться за морфологічною будовою. Так, клітини ортокортексу в основному округлої форми, невеликі за розміром, сплюснуті і щільно прилягають одна до одної. Натомість паракортексальні клітини пухових волокон мають овальну форму і у них спостерігаються залишки ядер, які розкидані по всій площі клітин. Клітинна мембрана чітка, і має добре виражену двох-контурність.

З даних рис. 3, є видно, що характерною особливістю остьових волокон вівцематок укра-

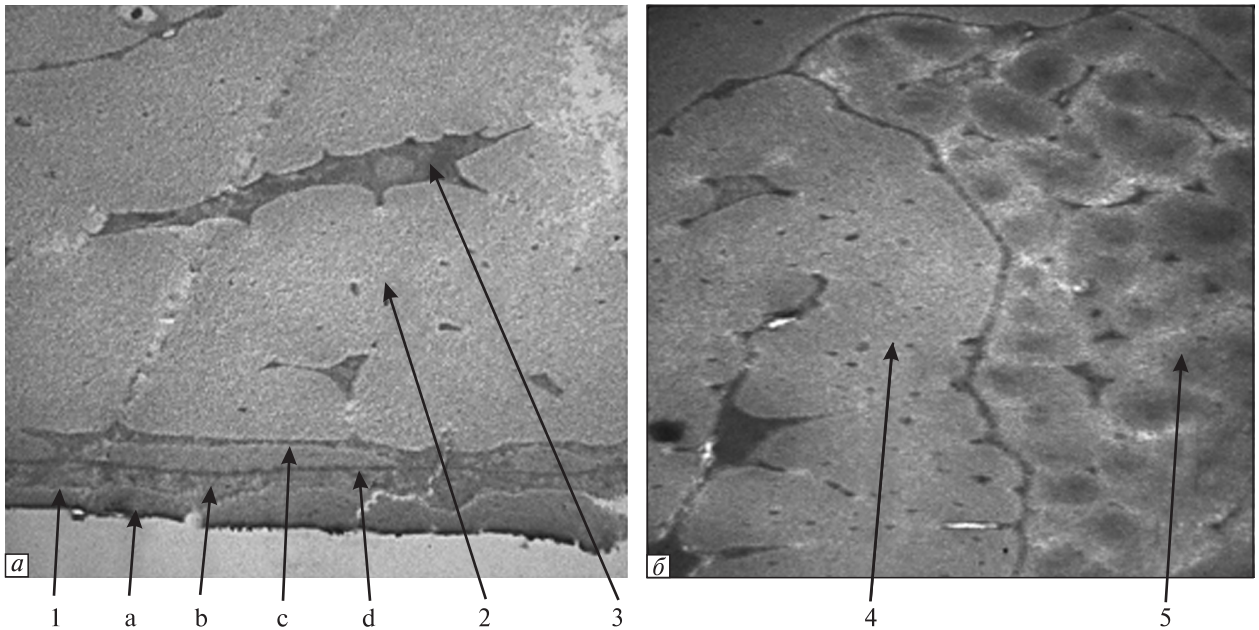


Рис. 2. Поперечний зріз пухового волокна (1 – кутикула, а – епікутикула, b – екзокутикула, с – ендокутікула, d – КМК, 2 – паракортекальна клітина, 3 – залишки ядра, 4 – паракортекс, 5 – ортокортекс, $\times 4000$)

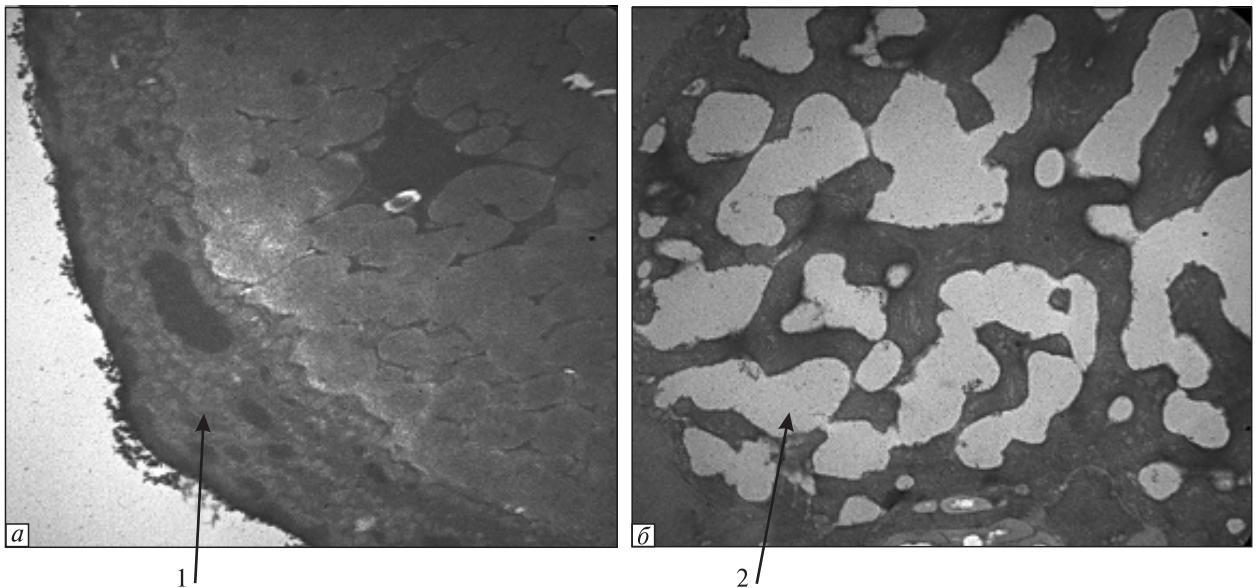


Рис. 3. Поперечний зріз остьового волокна. Загальна картина $\times 4000$ (a) та пориста тканина серцевини $\times 8000$ (б). 1 – кутикулярний шар, 2 – порожнини

їнської гірськокарпатської породи, в порівнянні з пуховими, є значно товстіший кутикулярний шар, що підтверджено нами і при дослідженні макроструктури волокон, про що буде сказано нижче. Головною ж особливістю

структури коркового шару остьових волокон є відсутність у ньому диференціації на окремі сегменти.

Також характерною особливістю структури остьових волокон є наявність мозкового або

Макроструктура нормальної та зваленої вовни УТКП, % (M ± m, n = 5)

Кератоза	Вовна	
	нормальна	звалена
<i>Осткові волокна</i>		
Альфа	60,08 ± 2,13	62,42 ± 1,78
Бета	15,28 ± 1,13	11,98 ± 1,25 **
Гамма	24,64 ± 2,29	25,60 ± 1,47
<i>Пухові волокна</i>		
Альфа	60,82 ± 1,53	63,24 ± 1,55 *
Бета	12,16 ± 0,72	9,94 ± 0,04 ***
Гамма	27,02 ± 1,39	26,82 ± 1,46

Примітки: * P < 0,05, ** P < 0,01, *** P < 0,001.

серцевинного шару, який розміщений у центрі волоса і побудований із пористої тканини (рис. 3, б).

З цифрових даних таблиці видно, що макроструктура вовни залежить, в основному, від тонини волокон. Так пухові волокна гірськокарпатських вівцематок характеризуються низьким вмістом β-кератози, а у остьових її кількість є значно вищою. Ці результати узгоджуються з даними електронної мікроскопії, яка підтверджує наявність у остьових волокнах значно товстішого кутикулярного шару, а саме β-кератоза відповідає кутикулі волокон.

При дослідженні макроструктури вовни, тобто визначення у ній окремих фракцій кератоз, встановлено, що у зваленій вовні суттєво зменшується фракція бета-кератози причому як у остьових (з 15,28 до 11,98 %, P < 0,01), так і у пухових (з 12,16 до 9,94 %, P < 0,001) волокнах. Натомість у пошкодженій вовні відмічено збільшення альфа-кератози, причому в пухових волокнах воно вірогідне (P < 0,05).

Отже, отримані нами дані вказують на особливості морфоструктури остьових та пухових волокон української гірськокарпатської породи овець, та вплив процесів звалювання на структуру вовняних волокон.

Обговорення. Серед багатьох факторів, які впливають на фізико-хімічні властивості вовни, одне з найважливіших місць належить генетичним чинникам, тобто породним особливостям. Вони також мають важливе значен-

ня у виникненні такої вади вовни як патологічне звалювання. З огляду на це нами проведено дослідження структури нормальної та зваленої вовни овець української гірськокарпатської породи.

За даними Paul et al. (2023) вовняні волокна різних порід овець різняться за своєю морфологією. Наші дослідження показали, що морфологічні різниці будови волоса можливі й у межах однієї породи, якщо вовна цих овець не однорідна, як в української гірськокарпатської породи. Зокрема показано, що поверхня остьових волокон, в порівнянні з пуховими, є іншою. Вони характеризуються більшою кількістю кутикулярних лусочок неправильної форми, які охоплюють стрижень не поодинокі як у пухових, а по дві, а іноді і три.

Silva et al. (2022) зауважують, що на процес звалювання вовни впливає її діаметр. Зокрема, волокна з більшим діаметром мають вищі значення повітропроникності у міжволоконних просторах, а саме до таких належать остьові волокна української гірськокарпатської породи овець.

Показано, що у лусочки волокон орієнтовані в одному напрямку (Tkachuk et al., 2014), забезпечує краще зчеплення їх між собою і захищає кортекс, тобто основну частину волокна, від впливу негативних, як хімічних, так і фізичних чинників. Однак Branisa et al. (2024), Li et al. (2025) вказують, що коли відбувається тертя одних волокон з поверхнею інших, які мають протилежною орієнтацією лусочок, вони захоплюються й заплутуються одне з одним, в результаті чого виникає звалок. Цей процес, за даними (Zhao et al., 2025), є результатом механічної дії тертя волокон при підвищеній вологості. Проведені нами дослідження показали, що звалена вовна характеризується порушенням цілісності кутикулярного шару, на що вказують відшаровані в окремих місцях лусочки, краї яких згладжені, а поверхня деформована. Це в кінцевому результаті може призвести до повного руйнування кутикулярного шару.

Кортекс має вирішальне значення при формуванні фізико-механічних властивостей волоса. Наші дослідження показали, що корковий шар пухових волокон української гірськокарпатської породи овець побудований з двох

видів клітин, які відрізняються за формою і утворюють два сегменти — орто- і паракортекс. За даними Shi et al. (2024) паракортекс у волосі розташований на внутрішній стороні згину, а ортокортекс — на зовнішній, що впливає на звивистість волокон (Harland et al., 2018). З отриманих нами даних видно, що паракортикальні клітини значно більші ортокортикальних і мають овальну форму. Кожна клітина має чітко виражену клітинну мембрану, а в центрі спостерігаються залишки ядра. Структурі ості властива радіальна асиметричність розміщення клітин, при якій пара- і ортоклітини розміщені рівномірно по всій площині поперечного зрізу волокна, натомість пухові волокна характеризуються білатеральною будовою. Patrucco et al. (2024) вказують на те, що саме від співвідношення орто- та паракортикальних клітин у значній мірі залежить здатність вовни до звалювання.

Характерною особливістю структури остових волокон української гірськокарпатської породи овець, є наявність мозкового або серцевинного шару, який розміщений у центрі волокна і побудований із вакуолізованої пористої тканини. Це збігається з даними Sandt and Borondics (2021), які вказують на те, що основу цього шару становить аморфна речовина з високим умістом ліпідів, яка формує пористу структуру, що містить заповнені повітрям вакуолі. Однак Fellows et al. (2021) показали, що мозковий шар містить хаотично розміщені фібрилярні структури, які зв'язані з вакуолями через пептидні зв'язки із залишками цитруліну. Мозкова речовина виконує кілька важливих функцій і відповідає за підтримку об'єму, міцності, еластичності та текстури волоса (Oladele et al., 2024; Zhou et al., 2025).

Petek et al. (2024) і Shubha et al., 2024 зазначають, що при фракціонуванні окисненої вовни можна отримати три фракції, які відомі як альфа-, бета і гамма-кератози. Альфа кератоза складає 50—60 % маси волокна і відповідає білку макро- і мікрофібрил клітин коркового шару. Бета кератоза — це оболонка волокна, тобто його кутикула, мембрани веретеніоподібних клітин, мембрани клітинних ядер, а також найбільш стійкі фібрили коркового шару. На частку цієї фракції припадає 10—15 % маси волокна. Гамма кератоза — між-

волоконна субстанція, або цементуюча речовина, тобто матрикс волокна, який становить біля 30 % маси волоса (Yalcin and Top, 2024; Banasaz and Ferraro, 2024). Наші дослідження показали, що звальна вовна, характеризується порушенням співвідношення між альфа, бета і гамма-кератозами. Так, у звальній вовні міститься суттєво менша кількість бета-кератози причому це твердження стосується як остових ($P < 0,01$), так і пухових ($P < 0,001$) волокон. До речі, якщо співставити ці результати із результатами мікроскопічних досліджень, то бачимо чітке їх співпадіння, оскільки вони також вказують на пошкодження кутикулярного шару волоса.

Отже, у результаті проведених досліджень встановлено характерні особливості будови вовняних волокон української гірськокарпатської породи овець, та виявлено зміни які відбуваються у них в результаті виникнення патологічного звалку.

Висновки. Дослідження остових та пухових вовняних волокон української гірськокарпатської породи овець надає більше інформації щодо їх структурної організації. Важливе значення має розкриття змін які характерні для звальної вовни. Зокрема, це стосується пошкодження кутикулярного шару, на яке вказують: відшаровані в окремих місцях лусочки зі згладженими краями та деформованою поверхнею; а також суттєве зменшення фракції бета-кератози, причому як у остових ($P < 0,01$), так і у пухових ($P < 0,001$) волокнах. Дані дослідження відкривають перспективу розробки методів попередження та ліквідації такої вади вовни як звалок і, як результат, покращення якості вовнової сировини для текстильної промисловості.

Дотримання етичних норм. Усі маніпуляції з вівцями проводились з дотриманням міжнародних принципів Конвенції Ради Європи «Про захист хребетних тварин, які використовуються в експериментальних та інших наукових цілях» (Meulen-Frank et al., 2017), резолюцій Національного конгресу України з біоетики (2010 р.), та Закону України № 3447-IV «Про захист тварин від жорстокого поводження» зі змінами від 15.11.2024. Згідно з протоколом № 2 (25.03.2025) біоетичної комісії Львівського

національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С.З. Гжицького отримано етичне схвалення на проведення досліджень.

Конфлікт інтересів. Автори заявляють про відсутність конфлікту інтересів у будь-якій формі; стаття не була і не буде предметом комерційного інтересу чи винагороди.

Фінансування. Це дослідження не отримувало будь-якого конкретного гранту від фінансуючих установ у державному, комерційному, або некомерційному секторах.

FEATURES OF THE STRUCTURE OF NORMAL AND FELTED WOOL OF UKRAINIAN MOUNTAIN CARPATHIAN BREED OF SHEEP

N.R. Motko, V.M. Tkachuk, N.Z. Ohorodnyk, A.O. Boyko, O.I. Zayats

Stepan Gzhytskyi National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies of Lviv, Ukraine, 79010, Lviv, Pekarska Street, 50

E-mail: vitalii-tkachuk@ukr.net, nataliamotko@ukr.net, nataohorodnyk@ukr.net, bujko6666@gmail.com, zaychuk1515@gmail.com

Wool is a valuable and irreplaceable raw material for the textile industry, but a significant amount of it is defective. Improving the qualitative characteristics of wool is impossible without studying its structure. Accordingly, the purpose of this research was to study the structure of normal and felted wool of sheep of the Ukrainian Carpathian mountain breed. Samples wool were studied, which were divided into awn and down. The surface of the fibers was studied using scanning electron microscopy (SEM), while cross-sections were analyzed using transmission electron microscopy (TEM), and keratosis was examined through treatment with peracids and alkali. Studies have shown that the cortex of downy fibers is characterized by a bilateral structure, i.e., it consists of ortho- and paracortical cells, and the structure of the awn is characterized by radial asymmetry. A feature of the structure of the awn fibers is the presence of a medullary layer, which is located in the central part of the hair and is composed of porous tissue containing cavities. The cuticular layer of the awn, in comparison with the downy fibers, contains a larger number of scales that differ in their shape, and it is this layer that undergoes the greatest changes in felted wool, as indicated by the scales exfoliated in some places with smoothed edges and a deformed surface, as well as a significant decrease in the beta-keratosis fraction, both in the awn (from 15.28 to 11.98 %, $P < 0.01$) and in the

downy (from 12.16 to 9.94 %, $P < 0.001$) fibers. Felting of wool leads to damage to its cuticular layer, both in the awn and downy fibers, and the discovery of these mechanisms allows the development of effective means of preventing and eliminating this wool defect.

Key words: wool fiber, awn, down, cuticle, cortex, medulla.

REFERENCES

- Allafi, F., Hossain, M.S., Lalung, J., et al., Advancements in applications of natural wool fiber: a review, *J. Nat. Fibers*, 2022, vol. 19, no. 2, pp. 497–512. <https://doi.org/10.1080/15440478.2020.1745128>
- AL-Ramamneh, D., Thermoregulation in sheep and goats: a review, *Asian. J. Biol.*, 2023, vol. 17, no. 1, pp. 34–42. <https://doi.org/10.9734/ajob/2023/v17i1315>
- Asquith, R.S., and Parkinson, D.C., The morphological origin and reactions of some keratin fractions, *Text. Res. J.*, 1966, vol. 36, no. 12, pp. 1064–1071. <https://doi.org/10.1177/004051756603601206>
- Banasaz, S., and Ferraro, V., Keratin from animal by-products: structure, characterization, extraction and application: a review, *Polymers*, 2024, vol. 16, no. 14, pp. 1999. <https://doi.org/10.3390/polym16141999>
- Baskan-Bayrak, H., and Karakas, H., Morphology and chemical structure of a wool fiber, in *The wool handbook*, Seiko, J., Sabu, T., and Gautam, B., Eds., Amsterdam: Elsevier Ltd, 2024, pp 181–194. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99598-6.00020-7>
- Boostani, B., Bidoki, S.M., and Fattahi, S., Using an eco-friendly deep eutectic solvent for waterless anti-felting of wool fibers, *J. Clean. Prod.*, 2023, vol. 386, pp. 135732. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.135732>
- Branisa, J., Koosova, K., and Porubska, M., Selective modifications of sheep wool usable in non-textile applications, *Polymers*, 2024, vol. 16, no. 10, pp. 1380. <https://doi.org/10.3390/polym16101380>
- Cao, G.S., Zhang, Z.P., Rong, M.Z., et al., A novel strategy for producing high-performance continuous regenerated fibers with wool-like structure, *Sus-Mat*, vol. 20222, no. 1, pp. 90–103. <https://doi.org/10.1002/sus2.46>
- Das, D., and Das, S., Wool structure and morphology, in *Wool fiber reinforced polymer composites*, Sabu, T., and Seiko, J., Eds., Amsterdam: Elsevier Ltd., 2022, pp. 13–32. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824056-4.00013-3>
- Giteru, S.G., Ramsey, D.H., Hou, Y., et al., Wool keratin as a novel alternative protein: a comprehensive review of extraction, purification, nutrition, safety, and food applications, *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, 2023, vol. 22, no. 1, pp. 643–687. <https://doi.org/10.1111/1541-4337.13087>

- Harland, D.P., Vernon, J.A., Woods, J.L., et al., Intrinsic curvature in wool fibres is determined by the relative length of orthocortical and paracortical cells, *J. Exp. Biol.*, 2018, vol. 221, no. 6, pp. 172312. <https://doi.org/10.1242/jeb.172312>
- Kaneta, D., Goto, M., Hagihara, M., et al., Visualizing intra-medulla lipids in human hair using ultra-multiplex CARS, SHG, and THG microscopy, *Analyst*, 2021, vol. 146, pp. 1163–1168. <https://doi.org/10.1039/D0AN01880E>
- Santos, H.N., Lana, S.L.B., and Neto, J.H.M., Wool felt: Characterization, comparison with other materials, and investigation of its use in hospital accessories, *Text. Res. J.*, 2022, vol. 92, no. 21–22, pp. 3940–3955. <https://doi.org/10.1177/0040517520915836>
- Shi, A., Ma, S., Yang, Z., et al., Proteomic analysis of crimped and straight wool in chinese tan sheep, *Animals*, 2024, vol. 14, no. 19, pp. 2858. <https://doi.org/10.3390/ani14192858>
- Fellows, A.P., Casford, M.T.L., and Davies, P.B., Using hybrid atomic force microscopy and infrared spectroscopy (AFM-IR) to identify chemical components of the hair medulla on the nanoscale, *J. Microsc.*, 2021, vol. 284, no. 3, pp. 189–202. <https://doi.org/10.1111/jmi.13052>
- Fellows, A.P., Casford, M.T.L., and Davies, P.B., Chemically characterizing the cortical cell nano-structure of human hair using atomic force microscopy integrated with infrared spectroscopy (AFM-IR), *Int. J. Cosmet. Sci.*, 2022, vol. 44, no. 1, pp. 42–55. <https://doi.org/10.1111/ics.12753>
- Lawrence, C.A., Fundamentals of spun yarn technology, Boca Raton, Florida: CRC Press LLC., 2003, pp. 1–63
- Li, R., Zhu, Q., Zhou, M., et al., Effective removal of scales from wool surface through the combination of thioglycolic acid compounds and proteases for anti-felting finishing, *Int. J. Biol. Macromol.*, 2025, vol. 306, no. 3, pp. 141698. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.141698>
- Madan, P.P.S., and Chakraborty, J.N., Simultaneous application of acid protease and transglutaminase on wool and its optimisation to achieve machine washable care claim, *AATCC J. Res.*, 2024, vol. 11, no. 5, pp. 376–385. <https://doi.org/10.1177/24723444241257544>
- Oladele, D.B., Markiewicz, E., and Idowu, O.C., The genomic variation in textured hair: implications in developing a holistic hair care routine, *Cosmet.*, 2024, vol. 11, no. 6, pp. 183. <https://doi.org/10.3390/cosmetics11060183>
- Patrucco, A., Zoccola, M., and Anceschi, A., Exploring the potential applications of wool fibers in composite materials: a review, *Polymers*, 2024, vol. 16, no. 16, pp. 2360. <https://doi.org/10.3390/polym16162360>
- Paul, S., Hewitt, A., Rana, S., et al., Development of novel parameters for characterising scale morphology of wool fibre and its correlation with dye diffusion coefficient of acid dye, *Sci. Rep.*, 2023, vol. 13, pp. 18444. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45689-w>
- Petek, B., Vodusek, M., Accetto, T., et al., Isolation and characterization of highly active keratinolytic microorganisms with promising potential for waste sheep wool processing, *J. Mater. Cycle Waste Manag.*, 2024, vol. 26, pp. 360–372. <https://doi.org/10.1007/s10163-023-01830-5>
- Plowman, J.E., Harland, D.P., Richena, M., et al., Wool fiber curvature is correlated with abundance of K38 and specific keratin-associated proteins, *Proteins*, 2022, vol. 90, no. 4, pp. 973–981. <https://doi.org/10.1002/prot.26289>
- Popescu, C., and Stanescu, M.D., Eco-friendly processing of wool and sustainable valorization of this natural bioresource, *Sustainability*, 2024, vol. 16, no. 11, pp. 4661. <https://doi.org/10.3390/su16114661>
- Pulido-Rodríguez, L.F., Pereira, A.M.F., Henrique, F.L., et al., Effect of shearing for improving the thermoregulatory responses of crossbred sheep during heat stress, *Veterinary Sciences*, 2025, vol. 12, no. 4, pp. 358. <https://doi.org/10.3390/vetsci12040358>
- Ranjit, E., Hamlet, S., George, R., et al., Biofunctional approaches of wool-based keratin for tissue engineering, *J. Sci. Advan. Mater. Dev.*, 2022, vol. 7, no. 1, pp. 100398. <https://doi.org/10.1016/j.jsam.2021.10.001>
- Sandt, C., and Borondics, F., A new typology of human hair medullas based on lipid composition analysis by synchrotron FTIR microspectroscopy, *Analyst*, 2021, vol. 146, pp. 3942–3954. <https://doi.org/10.1039/d1an00695a>
- Shang, X., Wang, Q., Ma, H., et al., Effect of liquid ammonia on the structure and properties of superfine wool fibers, *AATCC J. Res.*, 2024, vol. 11, no. 5, pp. 319–332. <https://doi.org/10.1177/24723444241246307>
- Shubha, A., Sharmita, G., and Manaswi, R., Recent advances in preparation and biomedical applications of keratin based biomaterials, *Biotechnol. Sustain. Mater.*, 2024, vol. 1, pp. 16. <https://doi.org/10.1186/s44316-024-00016-9>
- Silva, P., Navarro, M., Bessa, J., et al., Influence of fibre diameter on the wool-based felt properties, *MCE*, 2022, vol. 4, pp. 3. <https://doi.org/10.1007/s42824-021-00047-x>
- Starkova, O., Sabalina, A., Voikiva, V., et al., Environmental effects on strength and failure strain distributions of sheep wool fibers, *Polymers*, 2022, vol. 14, no. 13, pp. 2651. <https://doi.org/10.3390/polym14132651>
- Suprun, I., Getya, A., Fychak, V., et al., Prospects of

- use of genetic resources of sheep in Ukraine, *Acta Fytotech. Zootech.*, 2021, vol. 24, no. 1, pp. 35–43. <https://doi.org/10.15414/afz.2021.24.01.35-43>
- Tkachuk, V.M., Havrylyak, V.V., Stapay, P.V., et al., Internal lipids of felted, yellowed and pathologically thin wool, *Ukr. Biochem. J.*, 2014, vol. 86, no. 1, pp. 131–138. <https://doi.org/10.15407/ubj86.01.131>
- Tkachuk, V.M., Stapay, P.V., Ohorodnyk, N.Z., et al., Internal lipids and their fatty acids composition in a sheep wool fiber under biodestruction with fleece microorganisms, *Ukr. Biochem. J.*, 2024, vol. 96, no. 3, pp. 97–107. <https://doi.org/10.15407/ubj96.03.097>
- Vinod, K., Seiko, J., Ajay, K., et al., Diversified applications of coarse wool in various technical and industrial sectors: a review, *Indian. J. Small Rumin.*, 2024, vol. 30, no. 2, pp. 218–232. <https://doi.org/10.5958/0973-9718.2024.00052.2>
- Wang, Q., Phang, J.M., Chakraborty, S., et al., Atomistic characterization of healthy and damaged hair surfaces: a molecular dynamics simulation study of fatty acids on protein layer, *ChemBioChem*, 2024, vol. 25, no. 15, pp. e202400128. <https://doi.org/10.1002/cbic.202400128>
- Yalcin, D., and Top, A., Evaluation of partially reduced keratins extracted from wool fibers as a hydrogel forming biomaterial, *Braz. Arch. Biol. Technol.*, 2024, vol. 67, pp. e24231028. <https://doi.org/10.1590/1678-4324-2024231028>
- Zhang, W., and Fan, Y., Structure of keratin, in *Methods in Molecular Biology*, Ling, S., Ed., New York: Humana, 2021, pp. 41–53. https://doi.org/10.1007/978-1-0716-1574-4_5
- Zhang, N., Lai, H., Gautam, A., et al., Facile and efficient enzymatic methods for harvesting or removal of cuticle cells from human hair shafts, *J. Nat. Fibers*, 2022, vol. 19, no. 15, pp. 11036–11049. <https://doi.org/10.1080/15440478.2021.2009397>
- Zhang, N., Zhang, N., Zhang, J., et al., Thiourea dioxide-mediated surface functionalization: a novel strategy for anti-felting and dyeability improvement of wool, *J. Text. Inst.*, 2022, vol. 113, no. 11, pp. 2491–2501. <https://doi.org/10.1080/00405000.2021.1992947>
- Zhao, L., Ma, X., Ding, H., et al., Engineering a protease K for efficient degradation of wool scale layer using a substrate pocket modification, *Fermentation*, 2025, vol. 11, no. 2, pp. 51. <https://doi.org/10.3390/fermentation11020051>
- Zhou, H., Bai, L., Li, S., et al., Wool: from properties and structure to genetic insights and sheep improvement strategies, *Animals*, 2025, vol. 15, no. 19, pp. 2790. <https://doi.org/10.3390/ani15192790>

Надійшла в редакцію 20.12.2025
Після доопрацювання 10.01.2026
Прийнята до друку 18.05.2026