

## СТРОИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ

УДК 666.973.2

### ПРИМЕНЕНИЕ МИКРОСКОПИЧЕСКОГО АНАЛИЗА ДЛЯ ОЦЕНКИ ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ОЧЕСОВ ВОЛОКНА ЛЬНА В ПРОИЗВОДСТВЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННОГО МАТЕРИАЛА

*С.А. РОМАНОВСКИЙ; канд. техн. наук, доц. А.А. БАКАТОВИЧ  
(Полоцкий государственный университет)*

*Представлены результаты исследований по изучению микроструктуры очеса волокна льна с помощью светового микроскопа и льняного волокна с применением электронной микроскопии. Установлены морфометрические параметры льняного волокна очеса и элементарных волокон. Определено строение волокна льна, как структуры из плотно соединенных между собой пучков элементарных волокон размером поперечного сечения 50...70 мкм. При исследовании очеса волокна льна с использованием оптического микроскопа подтверждено наличие пустотного канала в элементарном волокне диаметром 4...6 мкм. Выявлены основные факторы, оказывающие положительное влияние на снижение коэффициента теплопроводности изоляционного материала из очесов льна. Возможность формирования сетчатой пространственной структуры из элементарных волокон диаметром 8...12 мкм обеспечивает предпосылки для получения высокоэффективного теплоизоляционного материала на основе очесов льна.*

**Ключевые слова:** световая и электронная микроскопия, очесы волокна льна, элементарные волокна.

**Введение.** Отрасль строительных материалов в настоящее время ориентируется на создание новых эффективных теплоизоляционных материалов, что обусловлено стратегией энергосбережения в условиях повышения цен на энергетические ресурсы. Современные утеплители не лишены эксплуатационных и стоимостных недостатков. При низкой цене материала потребитель получает низкокачественный продукт, а при высокой стоимости основная часть эксплуатационных показателей находится в пределах нормы, но вопросы экологичности и долговечности для большинства теплоизоляционных материалов остаются непроработанными. Современный уровень развития техники и технологий позволяет достичь комплексного сочетания достоинств утеплителей и отсутствия отрицательных качественных показателей материала. Таким образом, основываясь на указанных критериях, создание новых эффективных теплоизоляционных материалов на сырье растительного происхождения является весьма актуальным направлением в промышленности изоляционных материалов, а получение эффективного утеплителя на основе очесов волокна льна можно отнести к разряду перспективных инновационных решений в области экологического строительства.

Процесс выращивания льна и получения льняных очесов достаточно трудоемкий. После созревания лен теребят и расстилают на поле в виде лент для того, чтобы под воздействием естественной влаги на льне начали развиваться грибки, разрушающие пектиновые вещества, соединяющие волокно со стеблем [1]. В результате из льняной соломки получается треста, с облегченным отделением волокна от стебля. Волокна льна от древесины стебля отделяют сплошными лентами из лубяного слоя, представляющего собой техническое волокно. Лубяные волокна характеризуются высокой прочностью на разрыв и низкой упругостью. Полученное льняное сырье поступает на льнозаводы для первичной переработки льна. На мяльно-трепальных агрегатах в процессе мятья и трепания волокна приобретают вид длинных прядей. Часть волокон при этом обрывается и попадает в отходы трепания. Для дальнейшей переработки льноволокно обычно поступает на льнокомбинаты, где длинное трепаное волокно подвергают чесанию. В результате чесания трепаного льна получают от 45 до 55% чесаного льна, 40...50% очеса и 5% костры.

Льняные волокна используют для изготовления тонких и прочных ажурных кружев, тонких батистов, материи для постельного и нательного белья, декоративных тканей. Для производственных целей из льняного сырья изготавливают такие грубые и особо прочные изделия, как брезенты, парусину, рыболовные сети, пожарные рукава [2]. Белорусская компания ОАО «АКОТЕРМ ФЛАКС» предлагает теплоизоляционные плиты, изготавливаемые из льняного волокна (85%) и связующего компонента – бикомпонентного полиэфирного волокна (15%), равномерно распределенного по всему объему плиты [3]. Применяют материал в малоэтажном строительстве для утепления стен и перекрытий. Срок эксплуатации плит не менее 70 лет. Плиты «АКОТЕРМ ФЛАКС» имеют плотность 30 кг/м<sup>3</sup>, обеспечивают теплопроводность 0,038 Вт/(м·°С), звукопоглощение – 0,84 и паропроницаемость – 0,4 мг/(м·ч·Па).

Также в Беларуси производят «Льноватин» – материал, состоящий из коротких льняных волокон длиной менее 25 см [4]. Волокнистые остатки подвергают специальной обработке в чесальных машинах и формируют равномерное полотно. Полученный материал уплотняют с помощью пробивных игл, спутывающих волокна между собой. «Льноватин» характеризуется плотностью 72...100 кг/м<sup>3</sup> и теплопроводностью 0,038 Вт/(м·°С).

Наиболее известны теплоизоляционные плиты «Экотеплин», производимые в России, содержащие в составе льняные волокна, являющиеся наполнителем [5]. В качестве связующего используют натуральный крахмал, а соли бора применяют как огне- и биозащиту. Технология производства утеплителя предусматривает получение плит без применения синтетических добавок. Плиты применяют как в малоэтажном строительстве, так и для утепления и звукоизоляции многоквартирных домов. Материал «Экотеплин» является гипоаллергенным и полностью безопасным для здоровья. При плотности 32 кг/м<sup>3</sup> утеплитель имеет коэффициент теплопроводности 0,038 Вт/(м·°С), коэффициент звукопоглощения – 0,98, коэффициент паропроницаемости – 0,4 мг/(м·ч·Па), группа горючести Г1. Регламентируемый срок службы материала составляет более 60 лет.

Из очесов льна длиной 5...10 см изготавливают материалы для производства широкого ассортимента тканей технического и бытового назначения: обивочных, тарных, портьерных, мебельных и пр. Также очесы льна применяют для получения основы под отделочные материалы и напольные покрытия. Очесы, не подвергнутые прядению, используют для уплотнения резьбовых соединений трубопроводов [6]. Таким образом, очесы льна имеют достаточно широкую область применения, однако *поиск путей максимального эффективного использования очесов для среды обитания человека на сегодняшний день остается открытым вопросом.*

Представляется, что наиболее актуальное решение поставленной задачи – получение эффективных утеплителей из очесов волокна льна с пониженной горючестью, обеспечивающих экологическую безопасность для человека и не содержащих в своих составах органических, синтетических связующих, а также полимерных компонентов наполнителей. На первоначальном этапе необходимо исследовать и проанализировать микроструктуру льняного очеса, а также волокна льна для установления параметров, позволяющих обеспечить высокие физико-механические характеристики теплоизоляционных материалов.

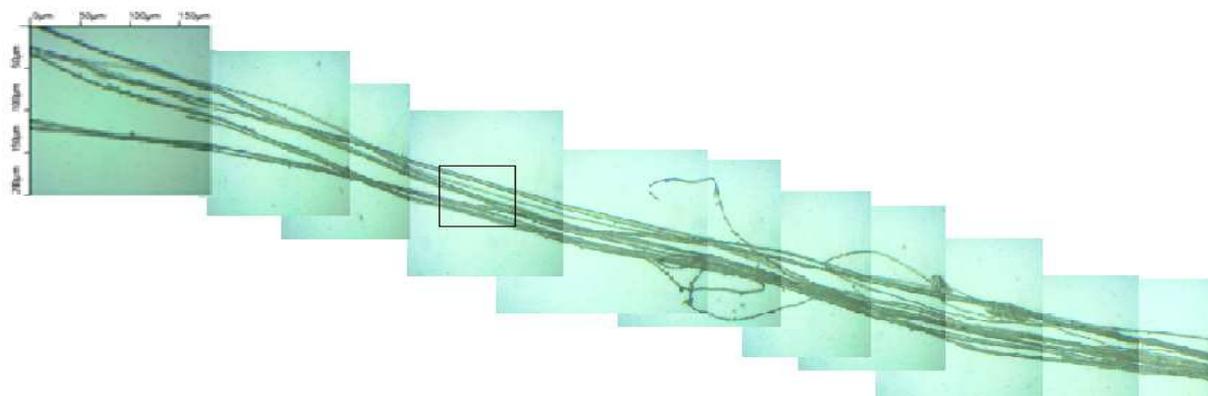
**Методика эксперимента.** Изучение микроструктуры очеса волокна льна проводили с помощью световой микроскопии на оптическом микроскопе «Альтами МЕТ 5С», который позволяет получить изображения структуры поверхности исследуемых объектов. Данный микроскоп имеет специальный осветитель, установленный со стороны объектива, и построен по схеме отраженного света. Система призм и зеркал направляет свет на объект, далее свет отражается от непрозрачного объекта и направляется обратно в объектив. Образец помещали на предметный столик и фиксировали с помощью стеклянной пластинки толщиной 3 мм. Полученное изображение выводилось на экран монитора и записывалось на жесткий диск компьютера. Использование *компьютерной программы «Altami Stadio»* позволяет совмещать полученные последовательные фотоснимки фрагментов образцов для увеличения участка изображения исследуемого материала.

Сканирующая электронная микроскопия является чувствительным инструментом для изучения технических волокон различного назначения. Исследование морфологических особенностей льноволокна осуществляли с использованием сканирующего электронного микроскопа «JSM-5610 LV». Наличие низковакуумного режима работы микроскопа дает возможность исследовать непроводящие объекты без пробоподготовки и нанесения проводящих покрытий, т.е. получать изображение с реальной поверхности. Наличие двух типов детекторов позволяет получать изображения в режимах вторичных и обратно отраженных электронов. Все действия с микроскопом проводятся с помощью программного компьютера. Интерфейсная часть программного обеспечения микроскопа, состоящая из управляющей программы INCA Energy 450, запускается на персональном компьютере и служит для отображения, обработки и сохранения результатов измерений. Результаты измерений заносятся в протокол, генерируемый программой, и хранятся на жестком диске компьютера. Искажение данных при передаче через интерфейс связи исключается параметрами протокола.

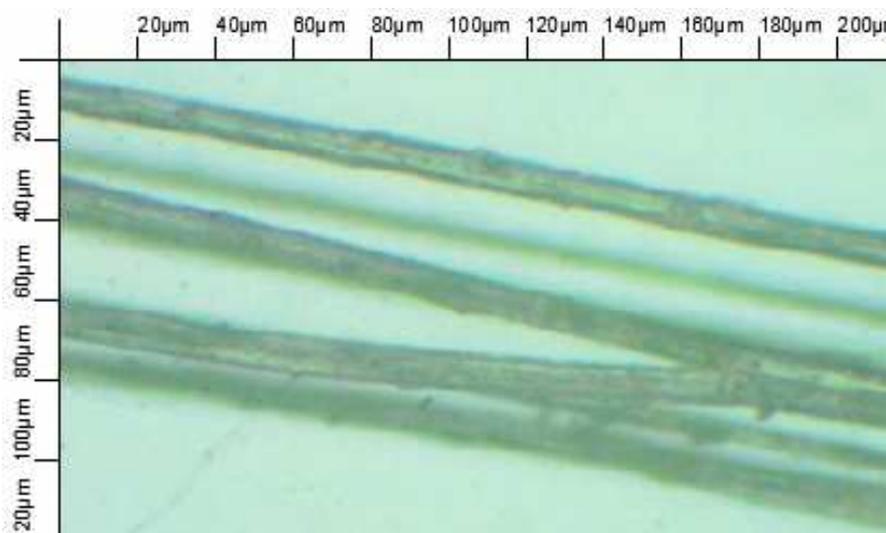
**Результаты и обсуждение.** С помощью световой микроскопии получены изображения внешнего вида очеса льна путем совмещения фотоснимков последовательно расположенных участков исследуемого образца. На рисунке 1, *а* представлено изображение льняного очеса длиной 6 см; на изображении очеса волокна льна рамкой выделен увеличенный фрагмент (рисунок 1, *б*).

Полученные данные свидетельствуют о том, что очес волокна льна состоит из растрепанных пучков элементарных волокон (см. рисунок 1, *а*). В очесе элементарные волокна периодически связываются друг с другом за счет хаотически расположенных контактных соединений. В результате формируется сетчатый волокнистый каркас, обеспечивающий прочное продольное соединение всей структуры очеса льна. Очесы связываются между собой благодаря боковым ответвлениям в виде элементарных волокон, образуя сетчатую пространственную волокнистую систему. Элементарное волокно представляет собой

растительную клетку веретенообразной формы. На микроснимке (см. рисунок 1, б) в элементарных волокнах отчетливо просматриваются узкие внутренние каналы диаметром 4...6 мкм. Длина элементарных волокон варьируется от 10 до 40 мм, при диаметре 8...12 мкм.



*a*



*б*

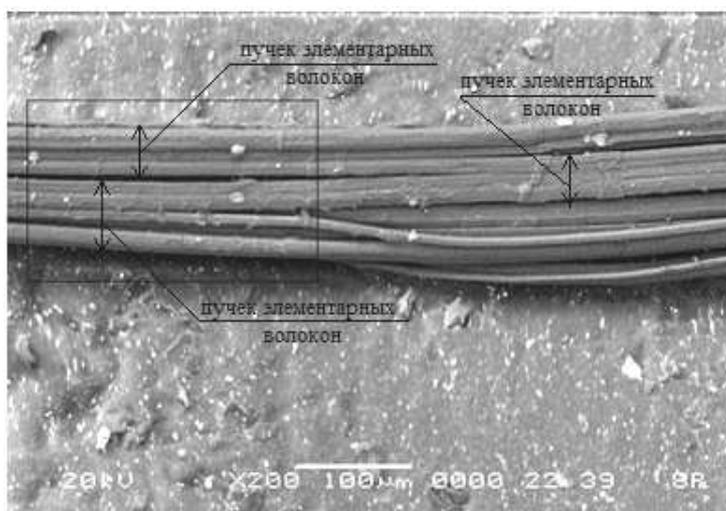
*a* – внешний вид очеса; *б* – элементарные волокна в очесе

**Рисунок 1. – Световая микроскопия очеса волокна льна**

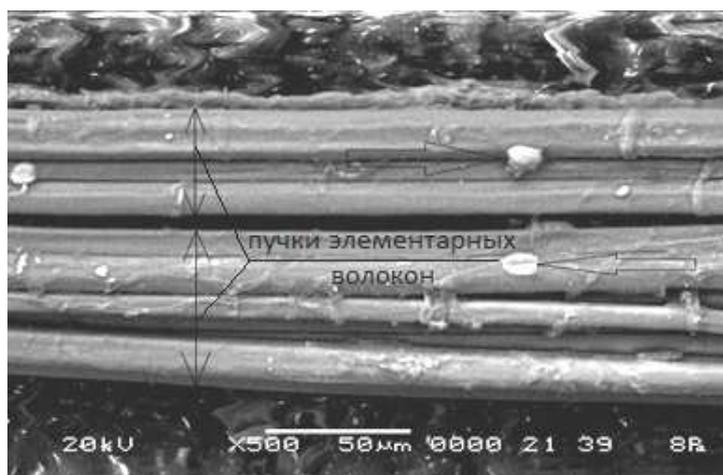
В структуре элементарного волокна различают несколько концентрически расположенных слоев, отличающихся различным светопреломлением [7]. Первая область оболочки является довольно тонкой и состоит в основном из пектиновых веществ, склеивающих клетки между собой. Состоящая из целлюлозы первичная стенка со значительным содержанием гемицеллюлозы, пектинов и часто лигнина образует следующую область. Вторичная стенка также структурирована из целлюлозы и характеризуется различными показателями светопреломления из-за меньшего количества примесей указанных веществ. В начале развития элементарные волокна представляют собой клетки округлой формы, заполненные плазменным содержимым. По мере роста соответствующей зоны данные клетки удлиняются, оболочка их сильно утолщается с внутренней стороны и достигает такой толщины, что внутренняя полость с плазменным содержимым становится заметной лишь в виде очень узкого канала. Таким образом, полученные результаты световой микроскопии по изучению строения волокна (см. рисунок 1, б) полностью подтверждают наличие пустотного канала в элементарном волокне.

Применение сканирующего электронного микроскопа позволило установить, что волокно льна состоит из пучков элементарных волокон (рисунок 2, а). На внешнем изображении волокна рамкой выделен увеличенный фрагмент (рисунок 2, б). Обозначенные стрелкой белые образования представляют собой микрофибриллы, обусловленные присутствием нецеллюлозных полисахаридов и пектина. Проведенный электронно-микроскопический анализ подтверждает морфометрические параметры элементарных воло-

кон, полученные при исследовании очеса волокна льна с помощью световой микроскопии, а также позволяет установить, что размеры пучков в диаметре составляют 50...70 мкм, при содержании в структуре от 10 до 20 элементарных волокон. Данные микроскопического анализа свидетельствуют, что из волокна льна формируется более «грубая» и менее эффективная теплоизоляционная сетчатая структура.



*a*



*б*

*a* – увеличение 200 крат; *б* – увеличение 500 крат

Рисунок 2. – Электронная микроскопия волокна льна

Теплоперенос в волокнистых материалах осуществляется за счет передачи тепла от одного волокна к другому, а также конвективным переносом воздуха, находящегося между волокнами. С уменьшением толщины волокон теплоперенос затрудняется, так как при передаче тепла от одного волокна к другому затрачивается тепловая энергия. Чем тоньше волокно, тем меньше площадь контакта между волокнами, что повышает сопротивление материала передаче тепла. Несмотря на то, что при наличии ультратонких волокон увеличивается количество контактов между ними, общая сумма площадей точек соприкосновения значительно меньше, чем площадь контактов в структуре из волокон льна. Таким образом, наилучшими теплотехническими показателями должны обладать утеплители на основе очесов волокна льна, характеризующиеся в 2...5 раз меньшей длиной и в 5...6 раз меньшим размером поперечного сечения по сравнению с волокном льна, состоящим из пучков элементарных волокон. При этом наибольшее положительное влияние на теплоизоляционные свойства льняного очеса оказывает малый диаметр элементарных волокон 8...12 мкм, сопоставимый по размерам с диаметром волокон минеральной ваты, равным 2...50 мкм [8].

Снижению теплопроводности также должно способствовать разнонаправленное в объеме расположение элементарных волокон в структуре утеплителя. Такое распределение волокон препятствует

конвективному переносу воздуха за счет уменьшения размеров тонких воздушных прослоек неправильной формы и их частичной локализации в виде отдельных замкнутых микропустот.

**Заключение.** По результатам световой микроскопии установлено, что очёсы льна представляют собой растрепанные пучки элементарных волокон, имеющих хаотически расположенные контактные соединения между собой. Такая структура обуславливает формирование сетчатого волокнистого каркаса в очесе льна. При контакте между собой очёсы образуют пространственную сетчатую тонковолокнистую систему, что создает предпосылки для получения высокоэффективного теплоизоляционного материала.

Низкая теплопроводность утеплителя будет обеспечиваться за счет отделенных друг от друга элементарных волокон, представляющих собой микротрубки диаметром 8...12 мкм с пустотным каналом диаметром 4...6 мкм, что сопоставимо с размерами полнотелых волокон минеральной ваты, обеспечивающих формирование эффективной изолирующей структуры.

На основании результатов проведенного исследования можно предположить, что существенное влияние на снижение коэффициента теплопроводности волокнистых утеплителей оказывают следующие факторы: присутствие волокон диаметром менее 20 мкм; наличие пустотных каналов в волокнах; хаотично-ориентированное в объеме расположение волокон, обеспечивающее формирование сетчатого структурного каркаса; снижение общей площади контактов волокон; уменьшение размеров и локализация микропустот в структуре утеплителя.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Технология производства [Электронный ресурс] / Сайт проекта «LinenMoscluster». – Режим доступа: [http://linen.moscluster.com/?page\\_id=43/](http://linen.moscluster.com/?page_id=43/). – Дата доступа: 01.05.2017.
2. Продукты изо льна [Электронный ресурс] / Сайт проекта «LinenMoscluster». – Режим доступа: [http://linen.moscluster.com/?page\\_id=54/](http://linen.moscluster.com/?page_id=54/). – Дата доступа: 01.05.2017.
3. ООО «АКОТЕРМ ФЛАКС» [Электронный ресурс] / Сайт компании ОАО «АкотермФлак». – Режим доступа: <http://akoterm-flaks.deal.by/>. – Дата доступа: 01.05.2017.
4. ЛЬНОВАТИН – СВОЙСТВА И СФЕРА ПРИМЕНЕНИЯ [Электронный ресурс] / Сайт «Тверской лен». – Режим доступа: <http://tverskoy-len.ru/lnovatin-1.shtml/>. – Дата доступа: 01.05.2017.
5. Обзор Экотеплина [Электронный ресурс] / Сайт «TutKnow.ru». – Режим доступа: <http://tutknow.ru/building/uteplenie/6610-obzor-ekoteplina.html/>. – Дата доступа: 01.05.2017.
6. Очёсы льняные из длинного льноволокна [Электронный ресурс] / Сайт компании «Flagma». – Режим доступа: <https://minsk.flagma.by/ochyosy-lyanyue-dlinnogo-lnovolokna-o1858990.html/>. – Дата доступа: 01.05.2017.
7. Рогаш, А.Р. Льноводство / А.Р. Рогаш, Н.Г. Абрамов, Я.А. Лебедев. – М. : Изд-во Колос, 1967. – 139 с.
8. Минвата. Виды и основные характеристики [Электронный ресурс] / Сайт проекта «ТеплоLiVam». – Режим доступа: <http://teplolivam.ru/yteplenie/teploizolyacionnye-materialyi/minvata-charakteristiki.html/>. – Дата доступа: 01.05.2017.

Поступила 05.06.2017

#### APPLICATION OF THE MICROSCOPIC ANALYSIS FOR ASSESSMENT OF PROSPECT OF USE OF NOILS OF FIBRE OF THE FLAX IN PRODUCTIONS OF HEAT-INSULATING MATERIAL

S. ROMANOVSKIY, A. BAKATOVICH

*Results of researches on studying of a microstructure of noil of fiber of flax with the help of a light microscope and linen fiber with application of electronic microscopy are presented. Morphometric parameters of linen fiber of noil and elementary fibers are set. The flax fiber structure as structures from the bunches of elementary fibers of cross section in size of 50...70 microns which are densely connected among themselves is defined. At a flax fiber noil research with use of an optical microscope existence of the hollow channel in elementary fiber with a diameter of 4...6 microns is confirmed. The major factors exerting positive impact on decrease in coefficient of heat conductivity of insulating material from flax noils are revealed. The possibility of formation of mesh spatial structure from elementary fibers with a diameter of 8...12 microns provides prerequisites for receiving highly effective heat-insulating material on the basis of flax noils.*

**Keywords:** *light and scanning electronic microscopy, flax fiber noils, elementary fibers.*