

УДК 621.3.029.6:674.8

В. В. Кузнецова, М. В. Аникеева, В. И. Врублевская
Белорусский государственный университет транспорта

АНТИФРИКЦИОННЫЙ ПРИРОДНЫЙ КОМПОЗИТ И ЕГО СТРОЕНИЕ

Применяя натуральную древесину в качестве антифрикционного материала, ее всегда рассматривали как капиллярно-пористый или капиллярно-сосудистый блочный материал, который можно уплотнять (прессовать), пропитывать различными модификаторами для придания заданных свойств. Сложное микроскопическое и анатомическое строение, молекулярное строение древесинного вещества и субмикроскопическое строение клеточной стенки, обуславливающие высокие прочностные свойства и износостойкость, не учитывались.

В работе рассмотрены анатомические элементы древесины и их роль в жизнедеятельности дерева. К главным элементам лиственных пород относятся древесные волокна (либриформ), обладающие наибольшими механическими свойствами; сосуды, служащие для проведения воды вдоль ствола дерева. У хвойных пород механическую и проводящую роль одновременно выполняют трахеиды. В лиственных и хвойных породах встречается древесная паренхима, которая является местом отложения питательных веществ. Сердцевинные лучи представляют лентообразное скопление тонкостенных паранхимных клеток, проводящих воду и выработанные деревом органические вещества в горизонтальном направлении. Все клетки, за исключением сердцевинных лучей, располагаются в стволе дерева вертикально и объединяются в единую систему межклеточным веществом. Проанализировано молекулярное строение древесинного вещества клеточных стенок, компонентами которого являются целлюлоза, гемицеллюлозы, лигнин, пектиновые, экстрактивные и неорганические минеральные вещества. В водно-водородных связях с органическими компонентами располагаются молекулы воды, количество которых находится в метастабильном состоянии с влажностью окружающей среды. Особую роль в клеточной стенке играют пектиновые вещества, способствующие удержанию ее тканей в состоянии тургора.

Изучено субмикроскопическое (тонкое) строение древесинного вещества в клеточной стенке. Показано, что все компоненты имеют определенное месторасположение и направление по отношению к оси клетки, образуя в ней оболочки (слои): первичную, переходную, вторичную и третичную. Анализ строения древесины позволяет утверждать, что она является сложным природным композитом, имеет высокую износостойкость.

Ключевые слова: древесина, анатомические элементы, микроскопическое строение, молекулярное строение, субмикроскопическое строение, целлюлоза, гемицеллюлоза, лигнин.

V. V. Kuznetsova, M. V. Anikeeva, V. I. Vrublevskaya
Belarusian State University of Transport

ANTIFRICTION NATURAL COMPOSITE AND IT'S STRUCTURE

Being used as antifrictional material, wood was always considered as capillary-porous or capillary-vascular block material that can be compacted (pressed), impregnated various substances. Complex microscopic and anatomic structure, molecular structure of wood material and submicroscopic structure of the cellular walls, causing a high strength and wear resistance properties weren't considered.

The anatomic elements of wood and their role in activity of a tree are discussed in this work. The main elements of hardwood timber are wood fibers (libreform), that have the highest mechanical properties; the vessels serving for transferring out water along a trunk of a tree. Softwood tracheids perform mechanical and conductive role. Wood parenchyma is found in hardwood and softwood, and is a place of deposition of nutrients. Wood rays are ribbon-shaped cluster of thin-walled paranhimnyh cells transferring water and organic matter developed by a tree in the horizontal direction. All cells, except for the wood rays, are arranged vertically in a tree trunk and are combined into a single system by intercellular substance. The molecular structure of the wood substance of the cellular walls, which components are cellulose, hemicellulose, lignin and pectic, extractive, inorganic mineral substances was analysed. In water-hydrogen communications with organic components there are water molecules in a metastable state. The pectins play a special role in a cellular wall as they hold her fabrics in a condition of turgor.

The submicroscopic (thin) structure of the wood substance in a cellular wall was studied. It is shown that each component has a certain location and direction relative to the axis of the cell, forming its covers (layers): primary; transitional, secondary and tertiary. The analysis of a structure of wood allows to assert that it is a difficult natural composite, that has high wear resistance.

Key words: wood, anatomic elements, microscopic structure, molecular structure, submicroscopic structure, cellulose, hemicellulose, lignin.

Введение. Древесина является высокопрочным капиллярно-пористым природным композитом, на основе которого модифицированием можно создавать новые с заданными свойствами антифрикционные материалы для применения в различных сферах производства, в том числе в машиностроении для изготовления подшипников скольжения [1, 2, 3].

Древесина – анизотропный материал. Ее строение и механические свойства различны на трех основных срезах ствола дерева: поперечном (торцовом) – поперек волокон, продольном радиальном – вдоль волокон по радиусу, продольном тангенциальном – перпендикулярно радиусу (рис. 1) [2, 4].

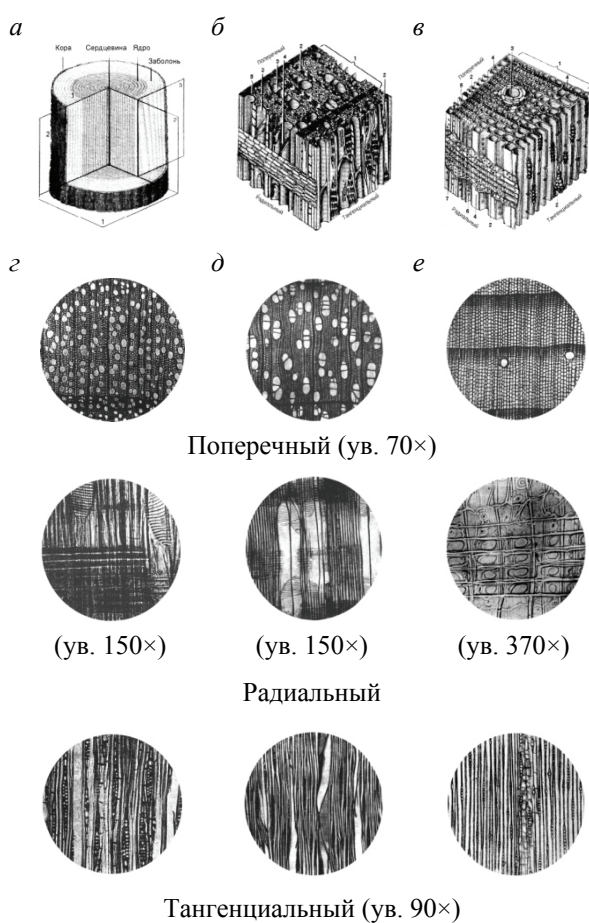


Рис. 1. Структуры древесины на различных срезах:
 а – главные срезы ствола дерева;
 б, в – схемы микроскопического строения древесины березы и сосны соответственно;
 г, д, е – микроструктуры срезов натуральной древесины бакаута, березы, сосны соответственно

В статье рассматривается строение древесины березы, которая является наиболее распространенной лиственной породой, произрастающей в Республике Беларусь, и по запасам она занимает 2-е место после сосны [5].

По микроскопическому строению древесина березы схожа с бакаутом, плотность которого $\rho = 1,15\text{--}1,20 \text{ г/см}^3$ (плотность древесинного вещества $\rho = 1,54 \text{ г/см}^3$). Подшипники скольжения для гребных винтов морских судов дальнего плавания и подлодок набираются только из древесины бакаута [6, 7, 8].

Плотность древесины березы составляет $\rho = 0,6 \text{ г/см}^3$ (40% объема занимает древесинное вещество, 60% – полости капилляр), а прессованной на 50% $\rho = 1,2 \text{ г/см}^3$, как у бакаута. При этом у нее 20–25% объема занимают полости не полностью сформированных капилляров. После прессования при пропитке полости заполняются смазкой. Такая древесина применяется для изготовления износостойких самосмазывающихся подшипников скольжения, работоспособных в различных условиях эксплуатации.

Однако теория высокой износостойкости антифрикционной прессованной модифицированной древесины отсутствует из-за незнания ее молекулярного, субмикроскопического и тонкого строения древесинного вещества клеточных стенок и непонимания процессов, происходящих при трении, что вызывает негативное отношение к этому материалу у производителей и некоторых ученых.

Многочисленные лабораторные и промышленные испытания самосмазывающихся подшипников скольжения из модифицированной древесины в различных абразивно-агрессивных средах, в которых подшипники скольжения и качения выходят из строя, показали удивительное свойство противостоять износу трущихся поверхностей, удалению абразивных частиц из зоны трения во время работы подшипников. Однако теоретическая интерпретация этому отсутствует.

Из вышеизложенного следует, что существует необходимость в изучении микроскопического строения древесины, молекулярного строения древесинного вещества, субмикроскопического строения клеточной стенки и обосновании высокой работоспособности природного композита как антифрикционного материала.

Основная часть. Микроструктура древесины состоит из тесно сросшихся между собой различного рода клеток, весьма разнообразных по своей форме и величине. Клетка состоит из клеточной стенки и полости. Молодая клеточная стенка состоит из целлюлозы, или клетчатки; с возрастом она изменяется, происходит ее одревеснение в результате появления в них лигнина.

Анатомические элементы древесины. Основные типы анатомических элементов (клеток) представлены на рис. 2 [9].

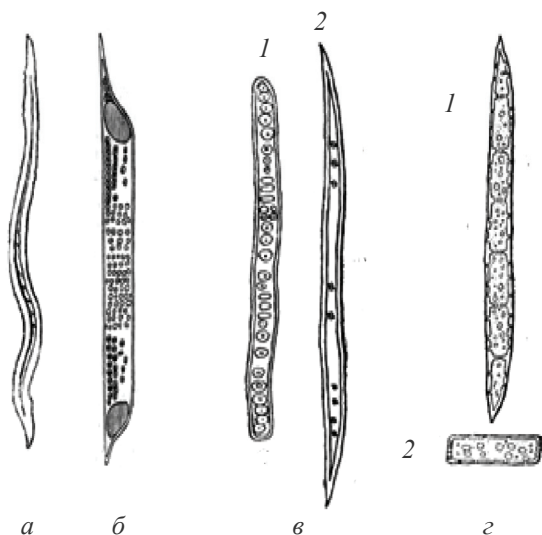


Рис. 2. Анатомические элементы древесины:
 а – древесные волокна, или либриформа;
 б – сосуды; в – трахеиды хвойных пород:
 1 – трахеида ранней древесины; 2 – трахеида
 поздней древесины; z – древесная паренхима,
 или запасающие клетки (1) и паренхимная клетка
 сердцевинных лучей (2)

Древесные волокна, или волокна либриформа, (рис. 2, а) являются наиболее распространенными клетками древесины лиственных пород.

Они представляют собой длинные клетки с заостренными концами, с толстыми оболочками и узкими полостями. Стенки волокон либриформа всегда одеревенелые. Размер древесных волокон у всех пород различен и по длине колеблется от 0,7 до 1,6 мм, а по диаметру – от 20 до 70 мкм. Древесные волокна составляют основную часть древесины лиственных пород, занимая от 36 до 67% ее объема. По своим механическим свойствам они являются наиболее крепкими анатомическими элементами.

Сосуды (рис. 2, б) – система клеток, имеющих только в древесине лиственных пород, служат для проведения воды вдоль ствола дерева. Они представляют собой широкие и очень длинные трубки, состоящие из ряда клеток, расположенных одна над другой, поперечные стенки которых полностью или частично растворились. Стенки сосудов тонкие. Диаметр сосудов весьма различен: у крупнососудистых пород он достигает 500 мкм, у мелкососудистых – 70 мкм и более. Длина сосудов в среднем около 10 см, но могут достигать 2–3 м. Сосуды лиственных пород составляют от 7 до 43% от объема древесины.

Трахеиды (рис. 2, в) – это механические или опорные клетки, служащие одновременно для проведения воды у хвойных пород. Они представляют собой замкнутые клетки, имеющие

веретенообразную форму, длиной до 6,5 мм и диаметром 25–38 мкм. Трахеиды имеют довольно толстые стенки (более толстые у поздней древесины) и составляют почти всю массу древесины (90–95% по объему). Сосуды у хвойных пород отсутствуют.

У хвойных пород встречаются смоляные ходы (рис. 1, е; рис. 3, а), которые служат для накопления и выделения смолы.

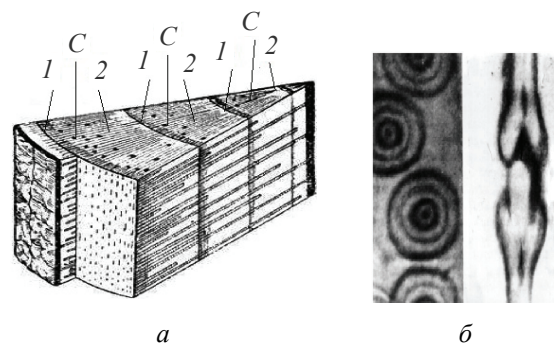


Рис. 3. Расположение сердцевинных лучей в стволе дерева (а) и поры в стенках сосудов либриформа и трахеид (б):

1 – осенняя часть годичного слоя; 2 – весенняя часть годичного слоя; С – смоляные ходы

Смолы – это экстрактивные вещества. Смоляные ходы бывают вертикальными, тянущимися параллельно оси ствола, и горизонтальными, встречающимися только в сердцевинных лучах. Диаметр вертикальных смоляных ходов обычно равен сумме диаметров четырех трахеид. Длина смоляных ходов колеблется от 10 до 80 см. Смоляные ходы располагаются главным образом в летнем слое годичного кольца. Они занимают от 0,10 до 0,17% объема древесины.

Древесная паренхима (рис. 2, z) – живые клетки, являющиеся местом отложения питательных (органических) веществ. Она имеет вид продольного волокна из паренхимных клеток, разделенных поперечными перегородками одна от другой. Стенки клеток древесной паренхимы сравнительно тонкие, одеревенелые. В клетках паренхимы могут накапливаться белки, жиры, пигменты и др. Древесная паренхима встречается в древесине хвойных и лиственных пород. Количество ее у хвойных пород в среднем равно 1% от объема всей древесины, у лиственных пород она занимает от 2 до 15% по объему.

Серцевинные лучи (рис. 3, а) служат для проведения воды и выработанных деревом органических веществ в горизонтальном направлении по радиусам его поперечного сечения. Они представляют собой лентообразное скопление тонкостенных клеток шириной 0,05–1,00 мм. На 1 см² тангенциального среза их приходится

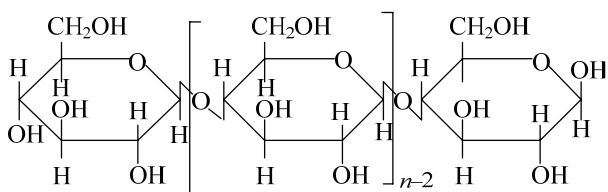
до 3000 штук. От общего объема они составляют от 2 до 7%. Клетка сердцевинных лучей является паренхимной (запасующей).

Все клетки, за исключением сердцевинных лучей, располагаются в стволе дерева вертикально. Они объединяются в единую систему межклеточным веществом и сообщаются между собой через **поры** (отверстия) (рис. 3, б) диаметром от 4 до 8 мкм. На 1 мм² клеточной стенки насчитывается 50–60 пор.

Сосуды и трахеиды у многих древесных пород часто закупориваются **тиллами**, представляющими собой выросты паренхимных клеток, проникающие внутрь полостей сосудов и трахеид через поры в их стенках. Тиллы, закрывая полости сосудов и трахеид, значительно уменьшают водопроницаемость древесины и сильно препятствуют пропитке. Чаще всего тиллы образуются в старых сосудах.

Молекулярное строение древесинного вещества клеточных стенок [10]. Древесинное вещество клеточных стенок – это многокомпонентный природный композит, у которого плотность $\rho = 1,54 \text{ г/см}^3$, состоящий из целлюлозы ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$)_n (40–50%); гемицеллюлоз (18–35%); лигнина (16–25% – в лиственных породах, 23–33% у хвойных); экстрактивных веществ: жиры, воски, смолы (5–15%); пектиновых веществ ($\approx 1,5\%$). Неорганические минеральные вещества (0,25–1,00%) находятся в паренхимных клетках. При сжигании древесины они образуют золу.

Целлюлоза ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$)_n – наиболее изученный компонент древесины, представляющий собой линейный высокоориентированный полимер. Фрагмент макромолекулы целлюлозы имеет вид



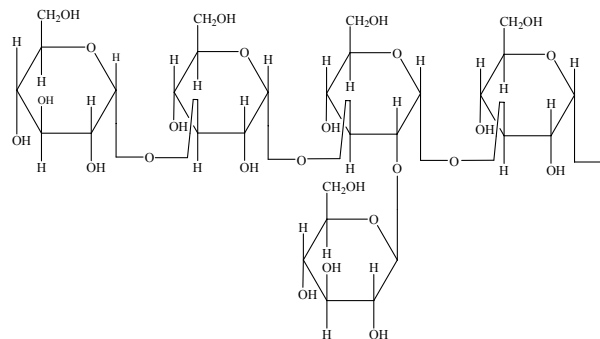
Степень полимеризации его колеблется от 50–200 до 5000–10 000 и более.

Элементарное звено макромолекулы целлюлозы (мономер) $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$ содержит три полярные спиртовые группы OH, которые расположены в строго определенном порядке и обуславливают высокую реакционную способность целлюлозы. Все реакции и превращения, которые могут быть осуществлены на целлюлозе, ограничиваются превращениями только гидроксильных OH-групп.

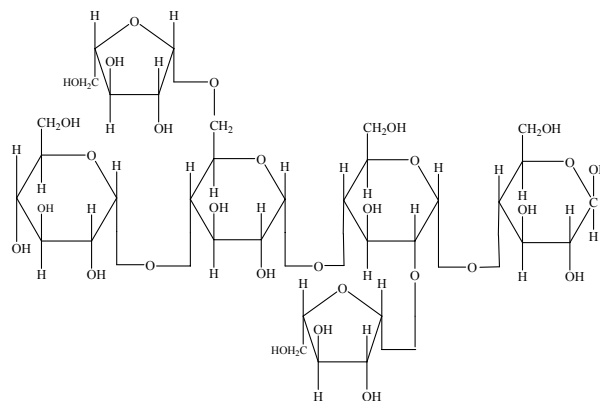
Никаких разветвлений в макромолекуле целлюлозы нет, они сильно вытянуты, поэтому имеет место интенсивное межмолекулярное взаимодействие.

Целлюлоза обуславливает высокую механическую прочность, гибкость, упругие свойства древесины.

Гемицеллюлозы – нецеллюлозные полисахариды, сопутствующие целлюлозе и представляющие группу веществ – гексозаны ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$)_n:



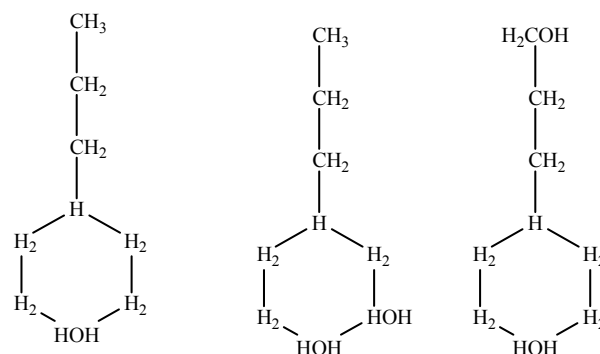
и пентозаны ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_5$)_n:



Степень полимеризации их в среднем 100–200. В клеточной стенке они находятся, как правило, вместе с лигнином, образуя с ним аморфное вещество, которое окутывает целлюлозные микрофибриллы и фибриллы и придает монолитность и прочность клеточным стенкам.

В древесине гемицеллюлоз содержится от 17 до 43%, причем в лиственной древесине их в 1,5 раза больше, чем в хвойной.

Лигнин до настоящего времени не получен в чистом виде, так как нет точного представления о нем как о химическом веществе. Он является смесью веществ, имеющих как ароматические, так и алифатические группы:



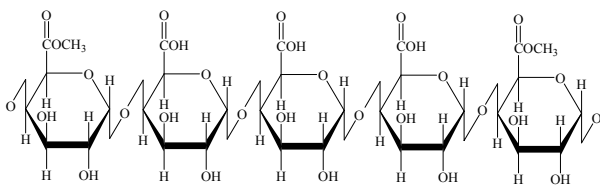
Лигнин не может образовывать прочных систем, так как имеет сравнительно небольшой молекулярный вес (от 200 до 1000), степень полимеризации составляет 20–35; структура его рыхлая, непрочная. Плотность абсолютно сухого лигнина $1,5 \text{ г/см}^3$. О связи лигнина с другими компонентами древесины определенной теории нет. При помощи ацетилирования установлено, что лигнин содержит около 10% свободных гидроксильных групп. Он прочно связывает около 1% азота. Лигнин с целлюлозой химической связи не образует, а по-видимому, связан с ней механически, что позволяет удалять целлюлозу или лигнин из клеточных оболочек.

Интересен способ выделения лигнина биологическим методом, когда воздействуют на древесину некоторыми грибами, разрушающими углеводы и не затрагивающими лигнин.

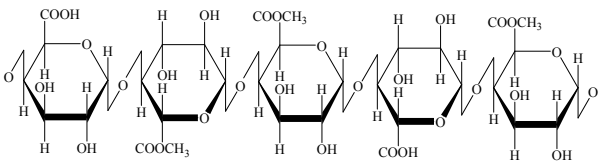
Прессование древесины происходит вследствие размягчения лигнина при нагревании, так как он становится термопластичным. Это свойство лигнина учитывается при переработке древесных материалов в производстве пластиков и плит [11, 12, 13].

Содержание лигнина в лиственной древесине – 16–25%, в хвойной – 23–33%. Некоторые породы деревьев, например акация, шелковица и др., содержащие незначительное количество лигнина, имеют очень твердую и плотную древесину.

Пектиновые вещества (пектины) – кислые полисахариды, представляющие собой высокомолекулярные сложные углеводы растений:



Они образованы остатками частично метоксилированной D-галактуроновой кислоты, в которой атом водорода заменен на группу OCH_3 :



Пектиновые вещества присутствуют в древесном веществе клеточной стенки; их содержится 1,5% от абсолютно сухой массы. Они способствуют поддержанию тканей в состоянии тургора, сохраняя целостность структуры клеточных стенок [4, 14, 15].

Экстрактивные вещества в древесине представляют сложную смесь разнообразных органических соединений: алифатические и аро-

матические углеводороды, кислоты, терпены, смоляные и жирные кислоты, эфирные масла, жиры, стеарины и др. В лиственных породах их менее 1%, а в хвойных – до 25%. Основная часть смолы – живица, которая находится в смоляных ходах (рис. 1, е; рис. 3, а), а в лиственной – почти полностью в лучевых паренхимных (запасующих) клетках. Экстрактивные вещества гидрофобны.

Неорганические минеральные вещества в древесине содержатся до 1% и находятся в лучевых паренхимных клетках. При сжигании древесины они образуют золу, которая частично растворяется в воде (10–15%). Растворяющаяся часть состоит из углекислого калия и натрия, растворимых солей соляной, серной и кремниевой кислот. Нерастворимыми веществами являются силикаты, фосфаты, окислы железа, магния, марганца, окись кальция.

В каждом растении присутствует 10 элементов: углерод, водород, кислород, азот, кальций, калий, фосфор, сера, магний и железо, которые имеют величайшее значение для его нормального роста [16]. Количественный состав компонентов древесинного вещества приведен в таблице.

Содержание основных органических веществ в клеточных стенках древесины, %

Наименование компонентов древесинного вещества	Породы древесины	
	лиственные	хвойные
Целлюлоза	39–47	41–58
Лигнин	17–27	28–34
Гемилцеллюлозы, в том числе:	20–38	15–23
– пентозаны	15–30	5–12
– гексозаны	до 8	9–17
Пектиновые вещества	1,5	
Экстрактивные дубильные вещества, смолы (гидрофобные)	5–15	
Неорганические минеральные вещества	0,25–1,00	

Все компоненты образуют древесинное вещество, плотность которого составляет $\rho = 1,54 \text{ г/см}^3$. Они имеют строго определенное месторасположение и направление в клеточной стенке, обуславливая ее субмикроскопическое строение, которое находится за пределами разрешающей силы оптических микроскопов [2, 17].

Субмикроскопическое (тонкое) строение древесинного вещества в клеточной стенке. Представление о субмикроскопическом строении клеточной стенки складывается на основе исследований на электронных микроскопах [2].

При последовательном удалении из клеточной стенки составляющих компонентов

древесинного вещества микроструктурный рисунок древесины сохраняется.

При разрушении целлюлозы грибом четко выделяется **срединная пластинка**, состоящая в основном из лигнина, которая объединяет все клетки (капилляры) в единую капиллярную структуру (рис. 4, з).

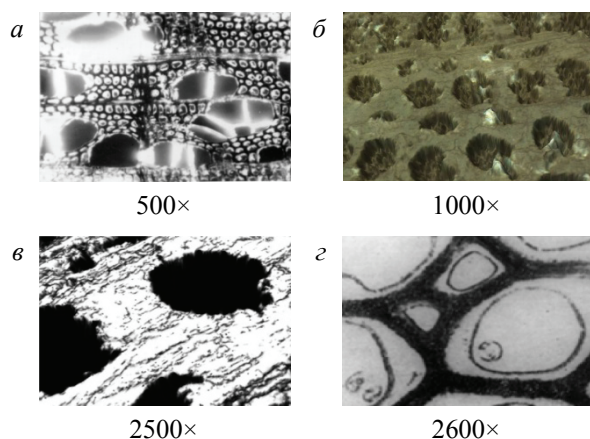


Рис. 4. Микроструктуры торцовых (поперечных) срезов древесины березы:
а, б, в – натуральной; з – лигнинный скелет березовой древесины (целлюлоза разрушена грибом *Polyporus betulinus*)

После изучения строение клеточной стенки с помощью электронного микроскопа была разработана модель тонкого субмикроскопического строения клеточной стенки лиственной и хвойной древесины, в которой различают несколько слоев, или оболочек (рис. 5, а).

Известно, что целлюлоза находится в клеточной стенке в виде фибрилл диаметром 25–40 нм, длиной 1000–2500 нм, а они состоят из более тонких микрофибрилл (мицеллярных прядей) диаметром ≈ 10 нм, длиной 50–60 нм. Было установлено расположение и ориентация микрофибрилл в различных слоях клеточной стенки.

К срединной пластинке примыкает **первичная** оболочка толщиной ≈ 100 нм, в которой микрофибриллы целлюлозы перекрещиваются, образуя сетку (рис. 5, а, б), свободное пространство которой заполняют лигнин, гемицеллюлозы, пектиновые вещества.

К **первичной оболочке** примыкает **переходный** ко вторичной оболочке слой толщиной примерно 200 нм. Он состоит из концентрических слоев, расположенных под углом 40–50° к оси клетки микрофибрилл, пересекающихся друг с другом (рис. 5, а). В переходном слое содержание лигнина уменьшается, а гемицеллюлоз увеличивается.

К **переходному слою** прилегает самый мощный **вторичный** слой, толщиной 1000–5000 нм, состоящий из 95% целлюлозных высокоориен-

тированных, параллельных микрофибрилл, расположенных под небольшим углом к оси клетки (рис. 5, а, в).



Рис. 5. Модель тонкого строения клеточной стенки лиственной (слева) и хвойной (справа) древесины (а) и электронные микрофотографии:
б – первичной оболочки (ув. 38 800×); в – вторичной оболочки (ув. 23 000×); волокон целлюлозы:
з – египетского хлопка; д – еловой древесины (ув. 47 000×)

К **вторичному слою** примыкает **третичная, или внутренняя, оболочка**, смежная с полостью капилляра. Толщина ее около 100 нм. Она состоит из микрофибрилл целлюлозы, параллельных оси клетки (капилляра). Внутренняя поверхность третичной оболочки, граничащая с полостью, у трахеид хвойной древесины покрыта гранулами, которые образуются при высыхании питательных веществ, содержащихся в полостях растительной клетки. У капилляров лиственной древесины внутренняя поверхность гладкая.

В **третичной и первичной оболочках** присутствуют **пектиновые вещества**, которые способствуют удержанию тканей клетки в состоянии тургора. Благодаря тургору третичная оболочка обладает большой упругостью и конструктивной прочностью [4]. Пектиновые вещества в третичной оболочке, по-видимому, обуславливают четкое ее изображение (рис. 4, з).

В древесинном веществе клеточной стенки присутствует гигроскопическая влага, молекулы воды которой связаны с компонентами древесинного вещества водно-водородными связями. Количество их находится в метастабильном состоянии с влажностью окружающей среды.

Гигроскопичность изучалась на построенных пространственных сферических моделях кристалла целлюлозы [2, 16].

Геометрические размеры кристаллической решетки (рис. 6, а) приняты по размерам элементарной ячейки Мейера – Миша, которая характеризуется следующими параметрами: $a = 0,835$, $b = 1,03$, $c = 0,79$ нм и $\beta = 84^\circ$.

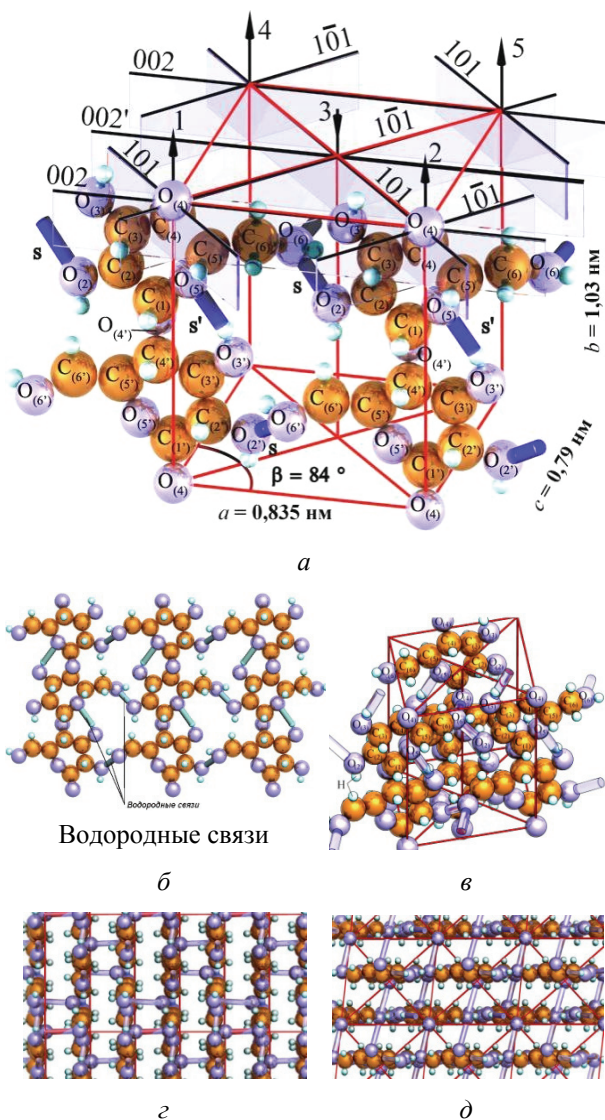


Рис. 6. Пространственная модель целлюлозы: а – плоскости кристаллической решетки и расположение звеньев в кристалле; б – расположение молекул целлюлозы во фронтальной плоскости $ab(002)$; в – межмолекулярные водородные связи в кристалле целлюлозы; з, д – молекулярное строение микрофибриллы вторичного слоя клеточной стенки капилляра: з – вид в плоскости bc (вид сбоку); д – вид в плоскости ac (вид сверху)

Плоскость ячейки ab (плоскость 002) содержит четыре глюкозных кольца $C_6H_{10}O_5$. Оси целлюлозных цепей расположены вдоль ребер b .

В соседней плоскости 002' глюкозные кольца повернуты на 180° [2].

Данная модель позволяет рассмотреть взаимное расположение молекул и межмолекулярных связей с любой точки. Мультиплицирование кристаллической решетки до уровня макрокристалла позволило представить четко просматриваемую его слоистую структуру на виде сбоку (рис. 6, з) и виде сверху (рис. 6, д).

На рис. 6, б представлена пространственная модель расположения молекул целлюлозы во фронтальной плоскости $ab(002)$. Совокупность однонаправленных макромолекул целлюлозы составляет ее кристаллическую структуру – это множество слоев, состоящих из параллельных и вертикально ориентированных макромолекул (рис. 6, в, з, д). Межмолекулярные связи осуществляются посредством H -взаимодействия.

Каждое глюкозное звено $C_6H_{10}O_5$ имеет одну межмолекулярную связь в слое $O_{(2)}H-O_{(6)}$; вторую – между слоями $O_{(2)}H-O_{(4)}$ соседнего слоя, третью – внутримолекулярную связь $O_{(3)}H-O_{(5)}$.

Эти три вида связей обеспечивают единство структуры вторичного и третичного слоев клеточной стенки с параллельными и ориентированными макромолекулами целлюлозы вдоль оси клетки (капилляра). Последние обуславливают анизотропию древесины.

Клетки, объединенные в единую систему межклеточным веществом (рис. 4, з), представляют контактную зону подшипников скольжения самосмазывающихся торцово-прессового деформирования древесных карточек (ПСС ТПД).

О расположении компонентов древесинного вещества в контактной зоне ПСС ТПД.

В данных подшипниках скольжения все клетки (капилляры) перпендикулярны к контактной зоне [18]. Следовательно, все волокна направлены по радиусу подшипника. На рис. 7 представлена модель торцового сечения капилляра, которое является контактной поверхностью в подшипнике. В зоне трения присутствуют все компоненты древесинного вещества. Во всех оболочках стенки капилляра находятся фибриллы целлюлозы. Они в первичной оболочке толщиной $t = 200$ нм перекрещиваются, а в переходном слое толщиной $t = 100$ нм пересекаются под углом $40-50^\circ$; между ними присутствует аморфный лигнин и гемицеллюлозы. В оболочках вторичной $t = 1000-5000$ нм и третичной $t \approx 100$ нм микрофибриллы целлюлозы параллельны и высокоориентированы вдоль оси капилляра (рис. 6, б, з).

Трение во вторичной и третичной оболочках осуществляется поперек микрофибрилл целлюлозы, которые являются основным несущим слоем.

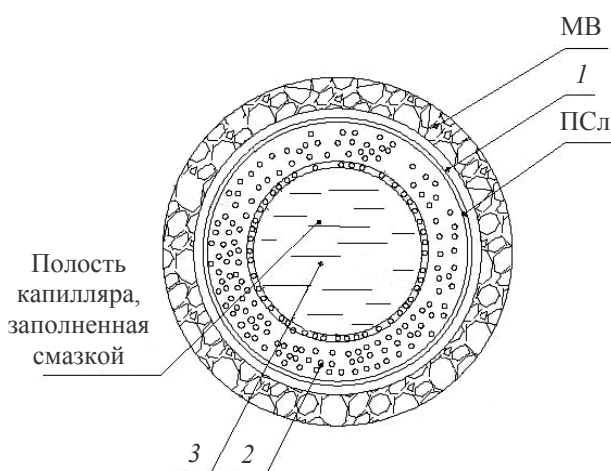


Рис. 7. Модель торцевого сечения клетки на субмикроскопическом уровне:

МВ – межклеточное вещество; 1 – первичный слой (оболочка); ПСл – переходный слой; 2, 3 – вторичная и третичная оболочки с торцовым расположением фибрилл

При трении происходит комплекс реакций на контактной поверхности подшипников скольжения. Все реакции, которые могут быть осуществлены на целлюлозе, ограничиваются превращением только гидроксильных ОН-групп через разрыв их химической связи Н–О, энергия которой составляет $E = 466$ кДж/моль.

В контактной зоне под действием генерируемого тепла разрываются химические связи и у высокомолекулярных модификаторов смазки.

Так, например, у полиэтилена $(-CH_2-CH_2-)_n$ энергия разрыва химической связи CH_2-CH_2 составляет $E = 710$ кДж/моль. При этом образуются реакционноспособные радикалы, которые вступают в химические реакции с целлюлозой через связи Н–О и формируют адсорбционный граничный смазочный слой из макромолекул

модификатора, эффективно разделяющий соприкасающиеся поверхности, экранируя их.

Так как в контактной зоне также находятся гемицеллюлозы, лигнин, пектиновые вещества, то и у них будет происходить разрыв химической связи О–Н, взаимодействующей с модификатором смазки, образуя в комплексе граничный смазочный слой. Под действием нагрузки и скорости скольжения высокомолекулярные присадки в контактной зоне формируют высокоориентированный граничный смазочный слой.

Износ контактной поверхности природного антифрикционного композита в основном обусловлен разрывом внутримолекулярной связи целлюлозных макромолекул, энергия разрушения которой $CO \rightarrow C + O$ составляет $E = 1076,4$ кДж/моль. Это происходит при температуре генерируемого тепла на микроконтактах свыше $180-190^\circ C$. Для предотвращения деструкции макромолекул целлюлозы предельное значение скорости и давления ограничивается параметром pv до $3,5$ МПа · м/с, при котором температура в контактной зоне не превышает $150^\circ C$. Данный параметр в 7–10 раз больше, чем у всех антифрикционных полимеров.

Заключение. Из вышеизложенного следует, что древесина является сложным природным композиционным материалом, имеющим уникальное микроскопическое строение, сложное молекулярное строение древесинного вещества с определенным расположением его компонентов в клеточной стенке, обуславливающим ее субмикроскопическое (тонкое) строение.

Такое сочетание капиллярно-пористого строения древесины, молекулярного и субмикроскопического строения древесинного вещества в оболочках клеточной стенки обуславливают высокие демпфирующие, физико-механические и антифрикционные свойства природного композита.

Литература

1. Врублевская В. И., Невзорова А. Б., Врублевский В. Б. Износостойкие самосмазывающиеся антифрикционные материалы и узлы трения из них. Гомель: БелГУТ, 2000. 324 с.
2. Невзорова А. Б., Врублевский В. Б., Матусевич В. О., Врублевская В. И. Подшипники скольжения самосмазывающиеся на основе модифицированной древесины (теория, технология и практика): монография. Гомель: БелГУТ, 2011. 254 с.
3. Шамаев В. А., Никулина Н. С., Медведев И. Н. Модифицирование древесины: монография. М.: ФЛИНТА, 2013. 448 с.
4. Лесная энциклопедия: в 2-х т. М.: Сов. энциклопедия. Т. 1. 1985. 563 с.; Т. 2. 1986. 631 с.
5. Лесной фонд [Электронный ресурс] / Министерство лесного хозяйства Республики Беларусь. URL: <http://www.mlh.by/ru/forestry/resources.html> (дата обращения: 25.10.2016).
6. Rain N. Lignum Vitae: Wood So Bad-Ass, It's Used to Make Shaft Bearings for Nuclear Submarines (and More) // Library Core77. 2013. URL: <http://www.core77.com/posts/25224/> (accessed: 11.10.2016).
7. Балацкий Л. Т., Бегагоен Т. Н. Дейдвудные устройства морских судов: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Транспорт, 1980. 192 с.
8. Рубин М. Б., Бахарева В. Е. Подшипники в судовой технике: справочник. Л.: Судостроение, 1987. 344 с.
9. Уголев Б. Н. Древесиноведение и лесное товароведение: учебник. М.: Академия, 2006. 272 с.

10. Кононов Г. Н. Химия древесины и ее основных компонентов: учеб. пособие. М.: МГУЛ, 2002. 260 с.
11. Азаров В. И., Буров А. В., Оболенская А. В. Химия древесины и синтетических полимеров: учебник. 2-е изд., испр. и доп. СПб.: Лань, 2010. 624 с.
12. Утгоф С. С. Термомеханически модифицированная древесина ольхи и березы для изготовления лицевого слоя паркетных изделий: дис. ... канд. техн. наук. Минск, 2014. 104 с.
13. Карманов А. П., Демин В. А., Давыдов В. Д. Разветвленность полимерных цепей лигнина // Химия древесины. 1990. № 3. С. 114–116.
14. Пектиновые вещества [Электронный ресурс] // Энциклопедия Wikipedia. URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Пектины> (дата обращения: 10.10.2016).
15. Пектины: свойства, получение, применение [Электронный ресурс] // Аналитический портал химической промышленности. URL: http://newchemistry.ru/letter.php?n_id=6344 (дата обращения: 10.10.2016).
16. Самин Д. К. Закон минимума // Сто великих научных открытий. М.: Вече, 2012. С. 85–89.
17. Врублевская В. И., Матусевич В. О., Кузнецова В. В. Гигроскопичность древесины на молекулярном уровне и обоснование СВЧ-излучений для ее сушки // Труды БГТУ. 2015. № 2: Лесная и деревообработ. пром-сть. С. 196–201.
18. Врублевский В. Б. Исследование процесса торцово-прессового деформирования древесины и создание высокопроизводительного оборудования для изготовления из нее подшипников скольжения: автореф. ... канд. техн. наук. Минск, 2002. 20 с.

References

1. Vrublevskaya V. I., Nevzorova A. B., Vrublevskiy V. B. *Iznosostoykie samosmazyvayushchiesya antifriktsionnye materialy i uzly treniya iz nikh* [Wear resistance self-lubricating antifriction materials and friction units of them]. Gomel, BelGUT Publ., 2000. 324 p.
2. Nevzorova A. B., Vrublevskiy V. B., Matusевич V. O., Vrublevskaya V. I. *Podshipniki skol'zheniya samosmazyvayushchiesya na osnove modifitsirovannoy drevesiny (teoriya, tekhnologiya i praktika): monografiya* [The self-lubricating plain bearings based on modified wood (theory, technology and practice): monograph]. Gomel, BelGUT Publ., 2011. 254 p.
3. Shamaev V. A., Nikulina N. S., Medvedev I. N. *Modifitsirovanie drevesiny: monografiya* [Modification of wood: monograph]. Moscow, FLINTA Publ., 2013. 448 p.
4. *Lesnaya entsiklopediya* [Forest Encyclopedia]. Moscow, Sov. entsiklopediya Publ., 1985, vol. 1, 563 p.; 1986, vol. 2, 631 p.
5. *Lesnoy fond* [Forest fund]. Available at: <http://www.mlh.by/forestry/resources.html> (accessed: 25.10.2016).
6. Rain N. Lignum Vitae: Wood So Bad-Ass, It's Used to Make Shaft Bearings for Nuclear Submarines (and More). Library Core77. 2013. Available at: <http://www.core77.com/posts/25224/> (accessed: 11.10.2016).
7. Balatskiy L. T., Begagoen T. N. *Deydvudnye ustroystva morskikh sudov* [Deadwood devices of sea vessels]. Moscow, Transport Publ, 1980. 192 p.
8. Rubin M. B., Bakhareva V. E. *Podshipniki v sudovoy tekhnike* [Bearings in shipbuilding]. Leningrad, Sudostroenie Publ., 1987. 344 p.
9. Ugolev B. N. *Drevesinovedenie i lesnoe tovarovedenie* [Wood science and forest commodity]. Moscow, Akademiya Publ., 2006. 272 p.
10. Kononov G. N. *Khimiya drevesiny i ee osnovnykh komponentov* [Wood chemistry and its main components]. Moscow, MGUL Publ., 2002. 260 p.
11. Azarov V. I., Burov A. V., Obolenskaya A. V. *Khimiya drevesiny i sinteticheskikh polimerov* [Wood chemistry and synthetic polymers]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2010. 624 p.
12. Utgof S. C. *Termomekhanicheski modifitsirovannaya drevesina ol'khi i berezy dlya izgotovleniya litsevogo sloya parketnykh izdeliy*: dis. ... kand. tekhn. nauk [Thermomechanical modified wood of alder and birch trees for making the surface layer of parquet products: dissertation PhD (Engineering)]. Minsk, 2014. 104 p.
13. Karmanov A. P., Demin V. A., Davydov V. D. Lignin branching of the polymer chains. *Khimiya drevesiny* [Chemical wood], 1990, no. 3, pp. 114–116 (in Russian).
14. *Pektinovyie veshchestva* [Pectin substance]. Available at: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Пектины> (accessed: 10.10.2016).
15. *Pektiny: svoystva, poluchenie, primenenie* [Pectin: properties, production, application]. Available at: http://newchemistry.ru/letter.phpn_id=6344 (accessed: 10.10.2016).

16. Samin D. K. Law of the minimum. *Sto velikikh nauchnykh otkrytiy* [One hundred of the great scientific discoveries], Moscow, Veche Publ., 2012, pp. 85–89 (in Russian).

17. Vrublevskaya V. I., Matusевич V. O., Kuznetsova V. V. Hygroscopicity of wood at the molecular level and justification of microwave radiation for its drying. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2015, no. 2: Forestry and Woodworking industry, pp. 196–201 (in Russian).

18. Vrublevskiy V. B. *Issledovanie protsessa tortsovo-pressovogo deformirovaniya drevesiny i sozdanie vysokoproizvoditel'nogo oborudovaniya dlya izgotovleniya iz nee podshipnikov skol'zheniya: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk* [Investigation of butt-pressing deformation of timber and creation of high-performance equipment for the manufacture of it plain bearings: abstract of thesis PhD (Engineering)]. Minsk, 2002. 20 p.

Информация об авторах

Кузнецова Вероника Владиславовна – магистр технических наук, ассистент кафедры «Промышленные и гражданские сооружения». Белорусский государственный университет транспорта (246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34, Республика Беларусь).

Аникеева Марта Владиславовна – соискатель ученой степени кандидата технических наук, инженер 2 категории кафедры «Материаловедение и технология материалов». Белорусский государственный университет транспорта (246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34, Республика Беларусь). E-mail: marta.anikeeva@yandex.ru.

Врублевская Валентина Ивановна – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Детали машин, подъемные и строительные машины». Белорусский государственный университет транспорта (246653, г. Гомель, ул. Кирова, 34, Республика Беларусь).

Information about the authors

Kuznetsova Veronika Vladislavovna – Master of Engineering, assistant lecturer of the Department “Industrial and Civil Construction”. Belarusian State University of Transport (34, Kirova str., 246653, Gomel, Republic of Belarus).

Anikeyeva Marta Vladislavovna – competitor of scientific degree of PhD (Engineering), engineer 2 category of Department “Materials Science and Materials Technology”. Belarusian State University of Transport (34, Kirova str., 246653, Gomel, Republic of Belarus). E-mail: marta.anikeeva@yandex.ru

Vrublevskaya Valentina Ivanovna – DSc (Engineering), Professor, Professor of the Department “Details of Machines, Lifting and Construction Machines”. Belarusian State University of Transport (34, Kirova str., 246653, Gomel, Republic of Belarus).

Поступила 02.11.2016