

Влияние высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки на химический состав термически модифицированного древесного наполнителя

К.В. Саерова^a, Р.Р. Сафин^b, Ю.А. Тимошина^c

Казанский национальный исследовательский технологический университет,
ул. Карла Маркса, 68, Казань, Республика Татарстан

^a senya97@inbox.ru, ^b cfaby@mail.ru, ^c TimoshinaYuA@corp.knrtu.ru

^a <https://orcid.org/0009-0008-5042-9063>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>,

^c <https://orcid.org/0000-0003-4684-1510>

Статья поступила 13.08.2024, принята 12.09.2024

В статье при помощи инфракрасной спектроскопии с преобразованием Фурье рассматриваются вопросы влияния высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки на химический состав древесного наполнителя, прошедшего высокотемпературную термическую модификацию. Во время термической обработки при высоких температурах происходят изменения в химической структуре целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Эти изменения могут включать удаление связанной воды, разрыв водородных связей между полимерными цепями и деполимеризацию гемицеллюлозы. Термическая модификация может также привести к частичному разложению лигнина и изменению его химического состава, уменьшая количество функциональных групп, способных вступать в водородные связи. Плазменная обработка приводит к поверхностной модификации образцов древесной муки, включая введение новых функциональных групп на поверхность или изменение уже существующих групп за счет образования и разрыва химических связей под действием активных частиц плазмы (электронов, ионов, свободных радикалов). Совместное воздействие термической и плазменной обработки увеличивает степень окисления поверхности древесной муки, что также отражается на состоянии ее поверхностных групп. Результаты показали, что после плазменной обработки все образцы древесной муки продемонстрировали увеличение массового соотношения O/C, что указывает на включение кислородсодержащих групп. Плазменная обработка может привести к возбуждению кислорода в воздухе вокруг образца и, следовательно, к образованию различных типов кислородсодержащих групп, что, в свою очередь, улучшает смачиваемость поверхности и способствует повышению адгезии между наполнителем и связующим веществом. Полученные результаты свидетельствуют о повышении смачиваемости и адгезионной составляющей обрабатываемого материала.

Ключевые слова: термическая модификация; высокочастотная плазменная обработка; древесная мука; ИК Фурье-спектроскопия; лигнин; целлюлоза; гемицеллюлоза; химический состав.

The effect of high-frequency low-temperature plasma treatment on the chemical composition of thermally modified wood filler

K.V. Saerova^a, R.R. Safin^b, Yu.A. Timoshina^c

Kazan National Research Technological University; 68, Karl Marx St., Kazan, Republic of Tatarstan

^a senya97@inbox.ru, ^b cfaby@mail.ru, ^c TimoshinaYuA@corp.knrtu.ru

^a <https://orcid.org/0009-0008-5042-9063>, ^b <https://orcid.org/0000-0002-0226-4232>,

^c <https://orcid.org/0000-0003-4684-1510>

Received 13.08.2024, accepted 12.09.2024

In the article, using infrared spectroscopy with Fourier transform, the issues of the influence of high-frequency low-temperature plasma treatment on the chemical composition of wood filler that has undergone high-temperature thermal modification are considered. During heat treatment at high temperatures, changes occur in the chemical structure of cellulose, hemicellulose and lignin. These changes may include the removal of bound water, the breaking of hydrogen bonds between polymer chains, and the depolymerization of hemicellulose. Thermal modification can also lead to partial decomposition of lignin and a change in its chemical composition, reducing the number of functional groups capable of entering into hydrogen bonds. Plasma treatment leads to surface modification of wood flour samples, including the introduction of new functional groups on the surface or modification of existing groups due to the formation and rupture of chemical bonds under the action of active plasma particles (electrons, ions, free radicals). The combined effect of thermal and plasma treatment increases the degree of oxidation of the surface of the wood pulp, which also affects the condition of its surface groups. The results have shown that after plasma treatment, all wood flour samples demonstrated an increase in the O/C mass ratio, which indicates the inclusion of oxygen-containing groups. Plasma treatment can lead to the excitation of oxygen in the air around the sample and, thus, the formation of various types of oxygen-containing groups, which in turn improves the wettability of the

surface and increases adhesion between the filler and the binding substance. The results obtained indicate an increase in the wettability and adhesive component of the processed material.

Keywords: thermal modification; high-frequency plasma treatment; wood flour; IR Fourier spectroscopy; lignin; cellulose; hemicellulose; chemical composition.

Введение. Древесина, благодаря своим уникальным свойствам и возобновляемости, активно используется в самых разных областях — от строительства до производства бумаги. Но, несмотря на ее полезные качества, древесина также подвержена гниению, влиянию влаги, насекомых и может менять свои размеры из-за влажности. Чтобы расширить область применения древесины и продлить срок ее службы, проводят различные виды обработки и модификации.

Модификация древесины — это всеобъемлющий термин, описывающий применение химических, механических, физических или биологических методов для изменения свойств материала.

Наиболее перспективной в последние годы считают термическую обработку. Термическая модификация древесины — это высокоэффективный способ обработки, который с каждым годом набирает все большую популярность в строительстве, дизайне интерьеров и производстве мебели. Суть метода заключается в обработке древесины при высоких температурах в условиях отсутствия кислорода, что приводит к изменению ее физических и химических свойств. Эта технология значительно повышает устойчивость древесины к воздействию влаги, грибка и вредителей, тем самым увеличивая срок ее службы [1]. Кроме того, процесс придает дереву более привлекательный оттенок, что делает его идеальным материалом для декоративных целей [2]. Однако, несмотря на множество преимуществ, термическая модификация древесины также имеет некоторые недостатки. Среди них — снижение механической прочности материала за счет того, что в процессе термической обработки при высоких температурах происходит разрушение важных компонентов стенок древесины, а именно гемицеллюлозы [3] (рис. 1). Она вносит вклад в общую прочность древесины за счет химической связи с лигнином и целлюлозой.

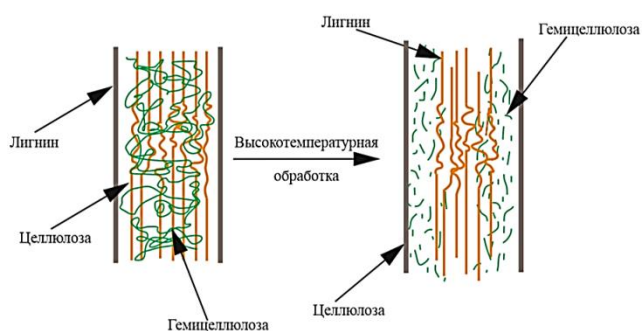


Рис. 1. Наглядная схема разложения структуры древесины за счет термической обработки.

Кроме того, термическая модификация вследствие разрушения гемицеллюлозы придает древесине гидрофобность и тем самым позволяет сохранять свои геометрические формы. Это происходит за счет того, что в процессе изменения химического состава компонентов древесины сокращается количество

гидрофильных гидроксильных групп в целлюлозе и гемицеллюлозе, в результате чего дерево становится менее впитывающим влагу [4]. Однако, кроме положительных моментов, гидрофобность приводит к ухудшению адгезионных свойств, поэтому, например, при создании клееных конструкций будут возникать проблемы с использованием древесины, прошедшей термическую модификацию.

С целью улучшить межмолекулярное воздействие (адгезию) поверхности термически обработанной древесины предлагается технология высокочастотной низкотемпературной плазменной обработки.

Плазменная обработка — это процесс, при котором на поверхность древесины воздействуют низкотемпературной плазмой, состоящей из ионизированных газов. Этот процесс может использоваться для очистки, модификации поверхности или даже для восстановления химических компонентов на поверхности высушенной древесины [5; 19]. За счет бомбардировки поверхности ионами плазмообразующего газа происходят разрыв химических связей и образование новых соединений в молекуле целлюлозы [6–8; 20].

Обработка низкотемпературной плазмой — это хорошо известная технология модификации волокон, которая отличается безвредностью для окружающей среды и минимизацией повреждения волокон. Площадь и степень модификации легко контролировать при использовании низкотемпературной плазменной обработки для модификации волокон. Когда активированные частицы в низкотемпературной плазме попадают на поверхность материалов, образуются новые свободные радикалы [9]. Эти свободные радикалы сильно меняют свойства поверхности материала. Более ранние исследования [10; 11; 17] показали, что холодная плазма низкого давления из O_2 , N_2 , Ar или воздуха может быть использована для улучшения сорбции воды химической и механической целлюлозой. Везель и др. доказали, что кислородная плазма повышает гидрофильность целлюлозных поверхностей [12]. Исследования ученых [13; 18] показывают, что высокоэнергетические частицы, образующиеся при плазменной обработке поверхности, могут быть использованы для инициирования свободнорадикальной полимеризации органических молекул и соответствующей реакции на целлюлозной поверхности. Исследователи научного института в Бразилии [14] разработали систему изменения свойств поверхности целлюлозы под действием плазмы диэлектрического барьерного разряда (DBD), работающей при атмосферном давлении как в воздухе, так и в газовой смеси аммиак/азот, и обнаружили, что угол контакта с водой для целлюлозы, обработанной на воздухе, уменьшился, а шероховатость поверхности значительно увеличилась после воздействия диэлектрического разряда плазмы. Лекобу и др. [15] использовали слабоионизированную плазму

атмосферного давления с аргоном и ацетиленом для нанесения плазменно-полимеризованных покрытий на древесный шпон (береза, клен), целлюлозную бумагу и сосновую древесную муку для изменения свойств их поверхности, в частности, их топографии и смачиваемости. Ученые [16] модифицировали структуру лигноцеллюлозных волокон с помощью плазменной обработки холодным аргоном. Исследование показало, что плазменная обработка может значительно изменить химическую структуру поверхности древесины.

Таким образом, благодаря плазменной обработке можно не только очистить древесину от нежелательных компонентов, но и модифицировать ее поверхность, улучшая физико-химические свойства и повышая прочность связи с покрытиями и клеями.

Целью настоящей работы является определение химических компонентов древесного наполнителя, прошедшего предварительную термическую модификацию и последующую высокочастотную низкотемпературную плазменную обработку, исследуя спектроскопические группы, полученные путем ИК-спектроскопии.

Объекты и методы исследования. Обработке подвергались древесные опилки породы береза. Древесный массив был измельчен на строгальном станке и подвержен термической модификации при 210 °С. Данная температура выбрана ввиду того, что проведенные ранее исследования показали наилучший результат прочностных характеристик именно при температуре 210 °С. Затем термически обработанный наполнитель подвергался высокочастотной низкотемпературной плазменной обработке в течение 10 мин [7].

После двух стадий обработки древесные опилки подвергались измельчению в роторно-ситовом дисмембраторе марки ДРС-2,0 до фракции муки.

В этом исследовании для определения химических компонентов древесины проводили инфракрасную спектроскопию с преобразованием Фурье на спектрометре *Frontier (Perkin Elmar)* с применением приставки нарушенного внутреннего отражения (рис. 2).



Рис. 2. Спектрометр *Frontier (Perkin Elmar)*

Результаты исследований. ИК-спектроскопия была применена для изучения химического состава обработанных образцов березы (контрольный, плазменная обработка, термическая модификация при 210 °С и термическая модификация при 210 °С + плазменная обработка), а также для идентификации и функциональных групп древесной муки.

Полученные спектры и показатели волновых чисел приведены на рис. 3–7. Волновые числа на графике используются для идентификации различных функциональных групп в молекулярной структуре образца на основании характерных зон поглощения.

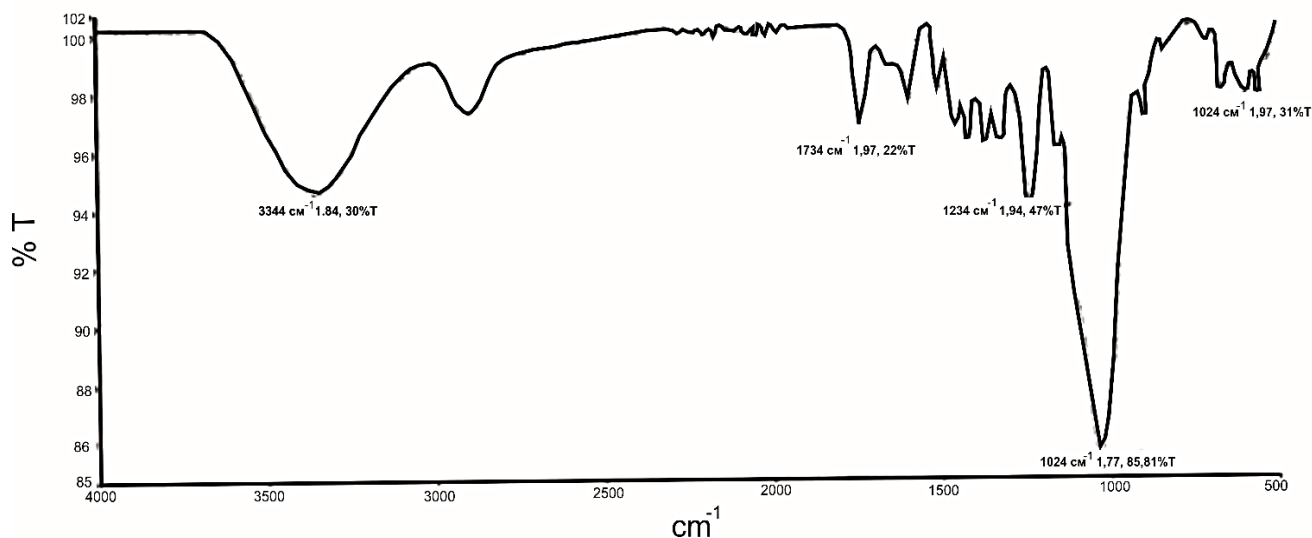


Рис. 3. ИК-спектры пропускания контрольного образца древесной муки

На рис. 3 представлен инфракрасный (ИК) спектр пропускания, записанный в виде графика. Ось абсцисс обозначает волновые числа в cm^{-1} , которые представляют собой обратное к длине волны инфракрасного излучения, т. е. частоту вибраций молекулярных связей. Ось ординат показывает процентное пропускание (обозначено как %T), которое

отражает, какая доля излучения проходит через образец.

На графике видны различные пики поглощения, которые характерны для определенных химических групп в анализируемом образце. Некоторые из этих пиков имеют отметки с указанием волнового числа и интенсивности поглощения: пик около 3344 cm^{-1} соответствует растягивающим вибрациям О-Н связей,

что характерно для гидроксильных групп в материалах, содержащих влагу или спирты. Пик в районе $1\,734\text{ см}^{-1}$ может указывать на растягивающие вибрации $\text{C}=\text{O}$ связей, например в карбонильных группах кислот,

альдегидов, кетонов или эстеров. Явно выраженный пик в районе $1\,024\text{ см}^{-1}$ связан с растяжением $\text{C}-\text{O}$ или $\text{C}-\text{O}-\text{H}$ связей, характерных для углеводов, таких как целлюлоза.

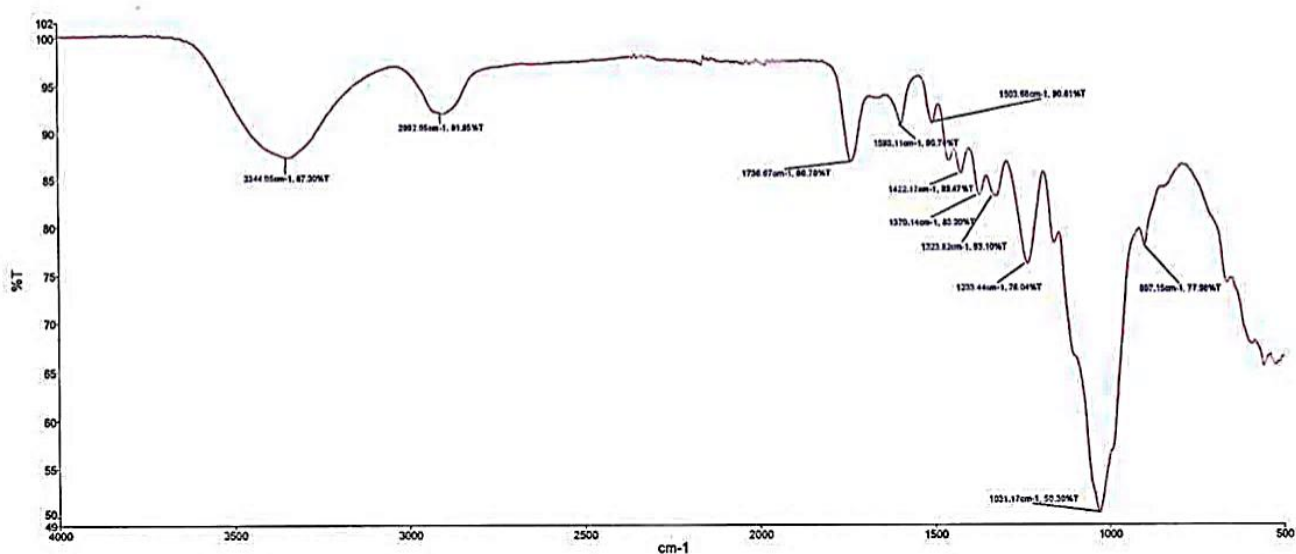


Рис. 4. ИК-спектры пропускания образца древесной муки, прошедшего термическую обработку при 210 °C

На рис. 4 представлено графическое значение ИК-спектров для образцов, прошедших термическую модификацию при 210 °C . Из графика также можно сделать вывод о том, что пик около $3\,344\text{ см}^{-1}$ связан с $\text{O}-\text{H}$ растяжением, что соответствует водосодержащим группам. Область около $2\,927$ и $2\,857\text{ см}^{-1}$ связана с $\text{C}-\text{H}$ растяжением, что типично для метильных и метиленовых групп. Пик в районе $1\,736\text{ см}^{-1}$ указывает на растяжение $\text{C}=\text{O}$ в ацетильных группах или карбоксильных кислотах. Значения вблизи $1\,600$ – $1\,500\text{ см}^{-1}$ могут быть признаком ароматических колец, характерных для лигнина. Значение пиков около $1\,452$

и $1\,423\text{ см}^{-1}$ могут соответствовать деформационным колебаниям $\text{C}-\text{H}$. В диапазоне $1\,370$ – $1\,235\text{ см}^{-1}$ могут быть полосы, связанные с различными деформационными и растягивающими колебаниями в молекулярной структуре древесины. Область ниже $1\,235\text{ см}^{-1}$ может содержать информацию о вибрациях между кислородсодержащими группами и углеводородными компонентами.

Изменения в этих полосах могут отражать изменения в химическом составе и структуре древесины в результате термической обработки.

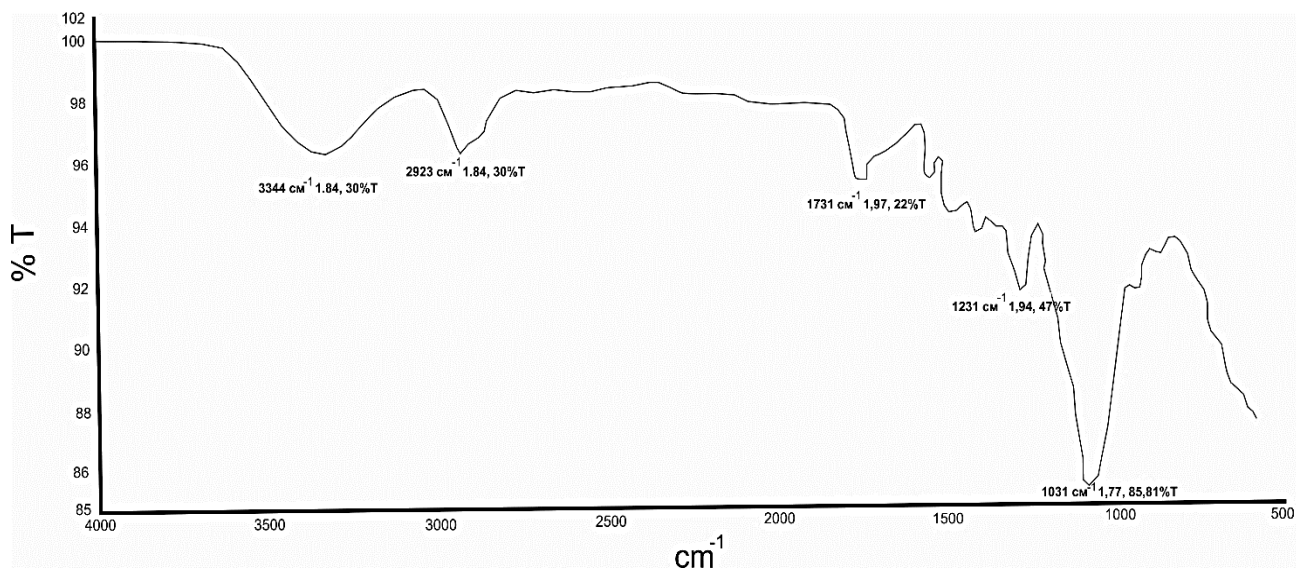


Рис. 5. ИК-спектры пропускания образца древесной муки, прошедшего плазменную обработку

На рис. 5 также видны несколько характерных пиков. Пик около $3\,344\text{ см}^{-1}$, как и на рис. 2, 3, указывает на наличие $\text{O}-\text{H}$ связей, пик в районе $2\,923\text{ см}^{-1}$ указывает на растягивание вибрациями $\text{C}-\text{H}$ связей. Пик

приблизительно $1\,731\text{ см}^{-1}$ указывает на растягивающие вибрации связей $\text{C}=\text{O}$, что характерно для карбонильных групп. Пики около $1\,600$ и $1\,507\text{ см}^{-1}$ соответствуют вибрациям ароматических кольцевых структур или

двойных связей C=C. Пики около 1 231 и 1 030 cm^{-1} указывают на растягивающие вибрации C-O связей.

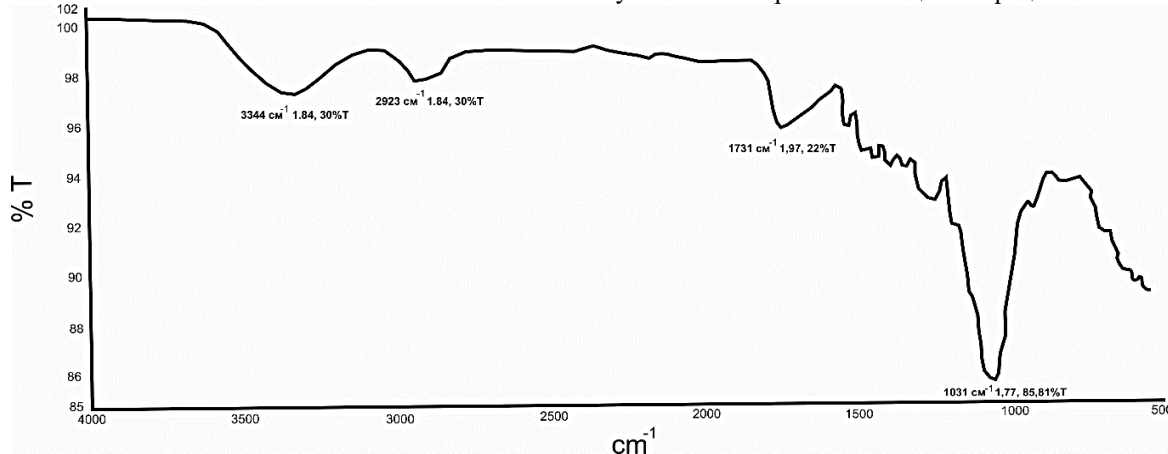


Рис. 6. ИК-спектры пропускания образца древесной муки, прошедшего термическую обработку при 210 °С и последующую плазменную обработку

На рис. 6 представлен ИК-спектр пропускания древесного наполнителя, прошедшего термическую предобработку и последующую плазменную обработку, диапазон волновых чисел от 500 до 4 000 cm^{-1} . Характерное отличие от рис. 3 и 4 заключается в том, что на рис. 5 и 6, где присутствует плазменная обработка, ярко выражено наличие C-H и C=O связей, это свидетельствует о том, что плазменная обработка сопровождается наличием кислородсодержащих групп.

Сравнивая все ИК-спектры, можно сделать вывод, что контрольный образец характеризуется стабильным уровнем пропускания на всем протяжении спектра с небольшими пиками, типичными для необработанной древесины. Главные характеристические пики можно увидеть около 3 344; 2 924 и 1 734 cm^{-1} , которые соответствуют наличию O-H, C-H и C=O связей соответственно. Образец после термической обработки при 210 °С показывает изменение в интенсивности спектра по сравнению с контрольным образцом, особенно в области ряда пиков, что указывает на изменение в химическом составе в результате термообработки. Такие изменения могут быть связаны с дегидратацией, декомпозицией гемицеллюлозы и другими изменениями структуры полимеров древесины. Образец, прошедший только плазменную обработку имеет некоторые измененные пики по сравнению с контрольным спектром, которые могут указывать на введение новых

функциональных групп или модификацию существующих. Плазменная обработка может вызвать окисление поверхности, изменяющее характеристики материала. Образец после термической обработки при 210 °С с последующей плазменной обработкой отличается от остальных спектров больше всего. Сочетание термической и плазменной обработки приводит к существенным изменениям в спектре с низким уровнем пропускания в некоторых областях с большим числом пиков, что говорит о значительном изменении молекулярной структуры древесины. Такое изменение пиков связано с глубокой модификацией химического состава и физических свойств древесной муки.

Сравнивая спектры, можно увидеть, как различные типы обработки влияют на молекулярный уровень, изменяя как структуру, так и химический состав древесной муки. Эти изменения могут быть результатом разложения органических компонентов, потери влаги, изменений в степени кристалличности целлюлозы и модификации лигнина, а также образования новых функциональных групп или изменений на поверхностных слоях материала в результате плазменной активации.

В таблице представлены данные по пропускным способностям образцов, прошедших обработку.

Таблица. Значения пропускных способностей образцов, прошедших обработку

| Контрольный образец | Термически модифицированный образец | Обработка плазмой | Термическая модификация с последующей плазменной обработкой |
|---------------------|-------------------------------------|-------------------|---|
| 3 354,06 | 3 344,05 | 3 344,17 | сл. |
| сл. | 2 902,05 | 2 925,37 | 2 921,84 |
| сл. | 1 736,67 | 1 692,24 | 1 726,01 |
| сл. | 1 593,11 1 503,68 | сл. | сл. |
| сл. | 1 422,17 | сл. | сл. |
| сл. | 1 370,14 | 1 371,49 | 1 317,73 |
| 1 234,26 | 1 233,44 | 1 231,93 | сл. |
| 1 031,77 | 1 031,17 | 1 028,53 | 1 030,62 |
| 873,44 | 897,15 | сл. | сл. |

| | | | |
|--------|-----|-----|--------|
| 592,75 | сл. | сл. | 601,51 |
|--------|-----|-----|--------|

Примечание: сл. — интенсивность полосы слабая/размытая.

Исходя из данных таблицы, можно сделать следующий анализ изменений полос пропускания:

– Контрольный образец. Значения волновых чисел для полос пропускания свидетельствуют о характерном состоянии древесной муки без обработки. Пики в области 3 354,06 и 1 234,26 см⁻¹ относятся к вибрациям О-Н и С-О связей соответственно, что характерно для целлюлозы и лигнина в древесной муке.

– Термически обработанный образец. Наблюдаются некоторые изменения в интенсивности и положении полос пропускания, что указывает на химические изменения в структуре полимеров после воздействия высокой температуры. Полосы в области 2 902,05 и 1 736,67 см⁻¹ могут быть связаны со снижением содержания влаги и изменением в карбонильных группах.

– Образец, обработанный плазмой. Полосы поглощения демонстрируют смещение к более высоким волновым числам (например, 2 925,37 и 1 692,24 см⁻¹), что может свидетельствовать об окислении поверхности образца и модификации функциональных групп.

– Образец, прошедший термическую и последующую плазменную обработку. Смещение полос или их отсутствие в ИК-спектре указывает на наиболее значительные изменения в химической структуре древесной муки. Сдвиг пиков может быть связан с более глубокой деградацией лигнина и целлюлозы, потерей малых молекул или образованием новых химических связей в результате комбинированного термического и плазменного воздействия.

Закключение. Во время термической обработки при высоких температурах происходят изменения в химической структуре целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина. Эти изменения могут включать удаление связанной воды, разрыв водородных связей между полимерными цепями и деполимеризацию гемицеллюлозы. Термическая модификация может также привести к частичному разложению лигнина и изменению его химического состава, уменьшая количество функциональных групп, способных вступать в водородные связи.

Плазменная обработка приводит к поверхностной модификации образцов древесной муки, включая введение новых функциональных групп на поверхность или изменение уже существующих групп за счет образования и разрыва химических связей под действием активных частиц плазмы (электронов, ионов, свободных радикалов).

Совместное воздействие термической и плазменной обработки увеличивает степень окисления поверхности древесной муки, что также отражается на состоянии ее поверхностных групп.

После плазменной обработки все образцы древесной муки продемонстрировали увеличение массового соотношения О/С, что указывает на включение кислородсодержащих групп. Плазменная обработка может привести к возбуждению кислорода в воздухе вокруг образца и, таким образом, образованию различных типов кислородсодержащих групп, что, в свою очередь, улучшает смачиваемость поверхности и способствует повышению адгезии между наполнителем и связующим веществом.

Литература

- Хасаншин Р.Р. Исследование водостойкости древесно-стружечных плит на основе термически модифицированного наполнителя // Вестн. Казанского технологического ун-та. 2014. № 22. С. 169-171.
- Lovrić A., Zdravković V., Popadić R., Milić G. Properties of plywood boards composed of thermally modified and non-modified poplar veneer // BioResources. 2017. 12 (4). P. 8581-8594.
- Vaziri M., Sandberg D. Welding of thermally modified wood and thermal modification of the welded wood: Effects on the shear strength under climatic conditions // BioResources. 2021. 16 (2). P. 3224-3234.
- Colom X., Carrillo F., Nogués F., Garriga P. Structural analysis of photodegraded wood // Polymer Degradation and Stability. 2003. 80 (3). P. 543-549.
- Хасаншин Р.Р., Разумов Е.Ю., Сафин Р.Р. Изменение наноструктуры древесных частиц в плазме ВЧ-разряда пониженного давления // Вестн. МГУЛ. Лесной вестн. 2010. № 4. С. 91-94.
- Саерова К.В., Мухаметзянов Ш.Р., Хасаншин Р.Р. Исследование механических свойств полимерного композита, полученного двухступенчатой обработкой древесного наполнителя // Деревообрабатывающая промышленность. 2022. № 3. С. 51-57.
- Саерова К.В., Мухаметзянов Ш.Р., Ефремов Д.Г. Изменение прочностных характеристик древесных образцов, прошедших термическую и плазменную обработку, к клеяемому соединению // Взаимодействие ионов с поверхностью «ВИП-2023»: тр. XXVI Междунар. конф. (Ярославль, 21-25 авг. 2023 г.). М., 2023. С. 199-202.
- Соколов О.М., Васильев М.Н., Чухчин Д.Г. Исследование изменения состава древесины при обработке низкотемпературной электронно-пучковой плазмой // Изв. высш. учеб. заведений. Лесной журнал. 1999. № 2-3. С. 167-174.
- Huang C., Zhao Y., Liu Y., Chen Y., Li C., Li Z. Surface characterization of plasma-treated eucalyptus alkaline peroxide mechanical pulp using electronic spectroscopy chemical analysis and atomic force microscopy // BioResources. 2018. 13 (2). P. 3500-3510.
- Carlsson G.C.M., Gilbert S.G., Eriksson I., Lindstrom E. Improved wettability of CTMP by oxygen plasma treatment // Nordic Pulp and Paper Research Journal. 1994. № 9. P. 72-75.
- Carlsson G.C.M., Stroem G., Annergren G. Water sorption and surface composition of untreated or oxygen plasma-treated chemical pulps // Nordic Pulp and Paper Research Journal. 1995. № 10. P. 17-23.
- Vesel A., Mozetic M. Surface functionalization of organic materials by weakly ionized highly dissociated oxygen plasma, Second International Workshop on Non-Equilibrium Processes in Plasmas and Environmental Science. Petrovic Z.L., Malovic G., Maric D. (eds.), J. Phys. Conf. Ser. 2009. 162. article no. 012015.

13. Alf M.E., Asatekin A., Barr M.C., Baxamusa S.H., Chelawat H., Özaydin-Ince G., Petruczok C.D., Sreenivasan R., Tenhaeff W.E., Trujillo N.J. Chemical vapor deposition of conformal, functional, and responsive polymer films, *Advan. Mater.* 2010. 22 (18). P. 1993-2027.
14. Flynn C.N., Byrne C.P., Meenan B.J. Surface modification of cellulose via atmospheric pressure plasma processing in air and ammonia-nitrogen gas // *Surface & Coatings Technology.* 2013. 233. P. 108-118.
15. Lekobou W.P., Englund K.R., Laborie M.P., Pedrow P.D. Influence of atmospheric pressure plasma treatments on the surface properties of ligno-cellulosic substrates // *Holzforschung.* 2016. 70 (1). P. 55-61.
16. Zanini S., Riccardi C., Canevali C., Orlandi M., Zoia L., Tolppa E.L. Modifications of lignocellulosic fibers by Ar plasma treatments in comparison with biological treatments // *Surface and Coatings Technology.* 2005. 200 (1). P. 556-560.
17. Inari G.N., Mounquengui S., Dumarcay S., Petrissans M., Gerardin P. Evidence of char formation during wood heat treatment by mild pyrolysis. *Polym. Degrad. Stabil.* 2007. 92. P. 997-1002.
18. Kral P., Rahel J., Stupavska M., Šrajcar J., Klímek P., Mishra P.K., Wimmer R. XPS depth profile of plasma-activated surface of beech wood (*Fagus sylvatica*) and its impact on polyvinyl acetate tensile shear bond strength // *Wood Sci. Technol.* 2015. 49. P. 319-330.
19. Абдуллин И.Ш. Модификация древесных опилок высокочастотным разрядом пониженного давления для создания древесно-композиционных материалов // *Вестн. Казанского технологического ун-та.* 2002. № 1-2. С. 63-68.
20. Аминов Л.И. Композиционные материалы на основе модифицированных древесных опилок, обработанных ВЧ плазмой // *Деревообрабатывающая пром-сть.* 2009. № 1. С. 24-26.
1. Hasanshin R.R. Investigation of the water resistance of chipboard based on thermally modified filler // *Herald of Kazan Technological University.* 2014. № 22. P. 169-171.
2. Lovrić A., Zdravković V., Popadić R., Milić G. Properties of plywood boards composed of thermally modified and non-modified poplar veneer // *BioResources.* 2017. 12 (4). P. 8581-8594.
3. Vaziri M., Sandberg D. Welding of thermally modified wood and thermal modification of the welded wood: Effects on the shear strength under climatic conditions // *BioResources.* 2021. 16 (2). P. 3224-3234.
4. Colom X., Carrillo F., Nogués F., Garriga P. Structural analysis of photodegraded wood // *Polymer Degradation and Stability.* 2003. 80 (3). P. 543-549.
5. Hasanshin R.R., Razumov E.Yu., Safin R.R. Changing the nanostructure of wood particles in a plasma of a low-pressure RF discharge // *Moscow state forest university bulletin - Lesnoy vestnik (Forestry bulletin).* 2010. № 4. P. 91-94.
6. Saerova K.V., Muhametzyanov Sh.R., Hasanshin R.R. Investigation of the mechanical properties of polymer composite obtained by two-stage processing of wood filler *Woodworking industry // Derevoobrabativalushaya promishlennost' (Woodworking industry).* 2022. № 3. P. 51-57.
7. Saerova K.V., Muhametzyanov Sh.R., Efremov D.G. Changing the strength characteristics of wood samples that have undergone plasma and thermal treatment to an adhesive joint // *Vzaimodejstvie ionov s poverhnost'yu «VIP-2023»: tr. XXVI Mezhdunar. konf. (Yaroslavl', 21-25 avg. 2023 g.). M., 2023. P. 199-202.*
8. Sokolov O.M., Vasil'ev M.N., Chuhchin D.G. Investigation of changes in the composition of wood during processing with low-enthalpy electron-beam plasma // *Lesnoy zhurnal (Forestry journal).* 1999. № 2-3. P. 167-174.
9. Huang C., Zhao Y., Liu Y., Chen Y., Li C., Li Z. Surface characterization of plasma-treated eucalyptus alkaline peroxide mechanical pulp using electronic spectroscopy chemical analysis and atomic force microscopy // *BioResources.* 2018. 13 (2). P. 3500-3510.
10. Carlsson G.C.M., Gilbert S.G., Eriksson I., Lindstrom E. Improved wettability of CTMP by oxygen plasma treatment // *Nordic Pulp and Paper Research Journal.* 1994. № 9. P. 72-75.
11. Carlsson G.C.M., Stroem G., Annergren G. Water sorption and surface composition of untreated or oxygen plasma-treated chemical pulps // *Nordic Pulp and Paper Research Journal.* 1995. № 10. P. 17-23.
12. Vesel A., Mozetic M. Surface functionalization of organic materials by weakly ionized highly dissociated oxygen plasma, *Second International Workshop on Non-Equilibrium Processes in Plasmas and Environmental Science.* Petrovic Z.L., Malovic G., Maric D. (eds.), *J. Phys. Conf. Ser.* 2009. 162. article no. 012015.
13. Alf M.E., Asatekin A., Barr M.C., Baxamusa S.H., Chelawat H., Özaydin-Ince G., Petruczok C.D., Sreenivasan R., Tenhaeff W.E., Trujillo N.J. Chemical vapor deposition of conformal, functional, and responsive polymer films, *Advan. Mater.* 2010. 22 (18). P. 1993-2027.
14. Flynn C.N., Byrne C.P., Meenan B.J. Surface modification of cellulose via atmospheric pressure plasma processing in air and ammonia-nitrogen gas // *Surface & Coatings Technology.* 2013. 233. P. 108-118.
15. Lekobou W.P., Englund K.R., Laborie M.P., Pedrow P.D. Influence of atmospheric pressure plasma treatments on the surface properties of ligno-cellulosic substrates // *Holzforschung.* 2016. 70 (1). P. 55-61.
16. Zanini S., Riccardi C., Canevali C., Orlandi M., Zoia L., Tolppa E.L. Modifications of lignocellulosic fibers by Ar plasma treatments in comparison with biological treatments // *Surface and Coatings Technology.* 2005. 200 (1). P. 556-560.
17. Inari G.N., Mounquengui S., Dumarcay S., Petrissans M., Gerardin P. Evidence of char formation during wood heat treatment by mild pyrolysis. *Polym. Degrad. Stabil.* 2007. 92. P. 997-1002.
18. Kral P., Rahel J., Stupavska M., Šrajcar J., Klímek P., Mishra P.K., Wimmer R. XPS depth profile of plasma-activated surface of beech wood (*Fagus sylvatica*) and its impact on polyvinyl acetate tensile shear bond strength // *Wood Sci. Technol.* 2015. 49. P. 319-330.
19. Abdullin I.Sh. Modification of sawdust with a low-pressure high-frequency discharge for the creation of wood-composite materials // *Herald of Kazan Technological University.* 2002. № 1-2. P. 63-68.
20. Aminov L.I. Composite materials based on modified sawdust treated with HF plasma // *Derevoobrabativalushaya promishlennost' (Woodworking industry).* 2009. № 1. P. 24-26.

References