

Научная статья  
УДК 691.116

## ИК-СПЕКТРОСКОПИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ФАНЕРНОГО ШПОНА ПОСЛЕ СТАРЕНИЯ

С.А. Мамонтов<sup>1,\*</sup>, А.А. Мамонтов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Тамбовский государственный технический университет, г. Тамбов, Россия.

\* E-mail: [kardinal61@mail.ru](mailto:kardinal61@mail.ru)

**Аннотация.** Фанера, как и другие древесно-полимерные композиты широко применяется в строительстве. Однако, недостаточная изученность процессов деградации полимерных компонентов древесины под действием агрессивных факторов внешней среды зачастую приводит к сокращению заявленного производителем срока службы. В связи с этим в работе поставлена задача выявить с помощью отражательной ИК-спектроскопии структурные изменения в молекулярном строении фанерного шпона после теплового старения, искусственного УФ-облучения и воздействия прямого солнечного света. Результаты исследования показали, что ИК-спектры всех образцов идентичны, но отличаются интенсивностью отдельных полос поглощения. Обнаружено, что под действием факторов старения происходит свободно-радикальный разрыв водородных, углеводородных и эфирных связей в различных функциональных группах целлюлозы, гемицеллюлозы и лигнина, образующих древесинное вещество. При этом тепловое старение вызывает структурные изменения по всему объему шпона, а искусственное и естественное УФ-облучение разрушают поверхностный слой шпона толщиной менее 0,7 миллиметра. Вскрытые механизмы деструкции позволяют повысить срок службы фанерных плит путем направленной модификации шпона стабилизаторами.

**Ключевые слова:** фанерный шпон, термическое старение, УФ-облучение, ИК-спектроскопия.

**Для цитирования:** Мамонтов С.А., Мамонтов А.А. ИК-спектроскопический анализ фанерного шпона после старения // Вестник науки и образования Северо-Запада России. 2023. Т.9. №1. С. 82–91.

## IR SPECTROSCOPIC ANALYSIS OF PLYWOOD AGING

S.A. Mamontov<sup>1,\*</sup>, A.A. Mamontov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Tambov State Technical University, Tambov, Russia.

\* E-mail: [kardinal61@mail.ru](mailto:kardinal61@mail.ru)

**Abstract.** Plywood, like other wood-plastic composites, is widely used in construction. However, insufficient knowledge of the degradation processes of polymer components of wood under the influence of aggressive environmental factors often leads to the reduction of the service life claimed by the manufacturer. In this regard, the task is to identify structural changes in the molecular structure of plywood after thermal aging, artificial UV irradiation, and exposure to direct sunlight using reflectance IR spectroscopy. The results of the study showed that the IR spectra of all samples are identical but differ in the intensity of some absorption bands. It was found that under

the influence of aging factors free-radical breaking of hydrogen, hydrocarbon and ether bonds occurs in various functional groups of cellulose, hemicellulose and lignin which form the wood substance. At the same time, thermal aging causes structural changes throughout the entire veneer, and artificial and natural UV radiation destroys the surface layer of the veneer with a thickness of less than 0.7 millimeters. Awareness of the revealed destruction mechanisms will enable increasing the service life of plywood boards by means of directed modification of the veneer with stabilizers.

**Key words:** *plywood veneer, thermal ageing, UV irradiation, IR spectroscopy.*

**For citation:** Mamontov S.A., Mamontov A.A. IR spectroscopic analysis of plywood aging. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2023. V.9. No1. pp. 82–91 (проставляется в журнале при публикации)

## Введение

С каждым годом в индивидуальном строительстве наблюдается увеличение объемов потребления древесных плит на полимерном связующем, в частности фанеры. Её относительно низкая стоимость, высокая прочность, легкий вес и технологичность позволяют значительно сократить материальные и временные затраты при строительстве малоэтажных зданий. К сожалению, заявляемый производителями срок службы фанеры и других древесных композитов зачастую оказывается завышенным, что приводит к преждевременной потере работоспособности конструкций. Это связано с тем, что при оценке их срока службы не в полной мере учитывается подверженность полимерных компонентов древесины к старению под действием внешних немеханических факторов, которые вызывают необратимые изменения её структуры [1-6].

ИК-спектроскопия является уникальным методом для установления характеристик строения и свойств молекулярных соединений, определяемых природой и системой внутри- и межмолекулярного взаимодействия. Метод является информативным для исследования древесины и материалов на её основе [7-16], поэтому в работе поставлена цель оценить влияние факторов искусственного и естественного старения на структурные изменения фанерного шпона с помощью ИК-спектроскопии.

## Методы исследования

В качестве объекта исследования выбраны фанерные плиты ФК на карбамидоформальдегидном связующем толщиной 4,2 мм, изготовленные методом горячего прессования по ГОСТ 3916.1-96.

Накопленный к настоящему времени экспериментальный материал и его анализ позволили нам выявить наиболее агрессивные виды воздействий на полимерные композиционные материалы: температуру и солнечное излучение, особенно его ультрафиолетовую часть [17-19]. В связи с этим основными факторами ускоренного старения приняты ультрафиолетовое излучение, производимое ртутной лампой высокого давления (ДРТ1000) с лучистым потоком 128 Вт в диапазоне длин волн 240-320 нм, и повышенная температура 80°C, создаваемая в установке для термического старения. Продолжительность воздействия составила 300 часов.

Чтобы сравнить результаты лабораторных испытаний с фактическими условиями эксплуатации, серия образцов была подвергнута естественной климатической выдержке в умеренном климате (под прямыми солнечными лучами) в течение июня-августа на широте 52,7 с. ш.

ИК-спектры записывались с использованием метода FT-IR (полное внутреннее отражение) на ИК-Фурье-спектрометре Jasco FT/IR-6700typeA со спектральным разрешением 4 см<sup>-1</sup> и углом отражения 45 градусов.

Чтобы оценить глубину развития процессов деградации по толщине шпона, образцы отбирались послойно. Толщина слоев составляла около 0,7 мм.

## Обсуждение результатов

Сегодня большая часть фанерных плит производится методом пьезотермообработки с применением карбамидоформальдегидных связующих. При этом в плите на границе склеиваемых шпонов образуются адгезионные связи химической и физической природы [20, 21].

Известно, что фанерный шпон получается лущением заготовок после их гидротермального размягчения. В процессе среза тонкого слоя древесины происходит разрушение клеток древесины с образованием большого числа функциональных реакционноспособных групп: гидроксильных, карбоксильных, карбонильных и прочих. Таким образом, адгезионное взаимодействие клея и древесного шпона осуществляется не только за счет механического зацепления, затвердевшего в порах древесины клея, но и за счет межмолекулярного взаимодействия на химическом уровне с образованием простых и сложных эфирных связей [20, 21].

Под воздействием повышенной температуры и УФ-части солнечного света в компонентах древесины протекают необратимые физико-химические превращения, отражающиеся на эксплуатационных свойствах фанерных плит [22].

Термо- и фотоокисление ведут к нарушению сплошности поверхностного слоя фанеры, повышая его шероховатость и пористость. Кислород воздуха, проникающий через наружные поры во внутренние, окисляет составляющие древесины изнутри. При этом атмосферная влага способствует интенсификации процессов окисления, увеличивая подвижность макромолекулярных цепей лигнина, целлюлозы и гемицеллюлозы [2].

Процессы термо- и фотоокисления протекают по свободно-радикальному механизму. Под действием повышенной температуры, либо высокой энергии УФ-части солнечного света, инициируется цепь разрывов химических связей в полимерных макромолекулах. Как правило, разрывы начинаются вблизи свободных углеводородных радикалов, поскольку прочность С-Н связи в 7 раз меньше, чем прочность скелетных С-С связей в основной цепи полимера [2, 23].

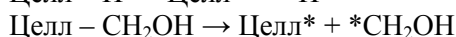
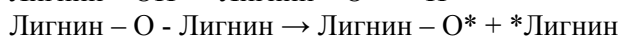
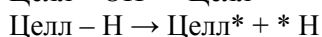
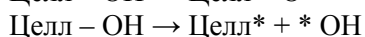
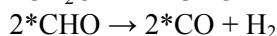
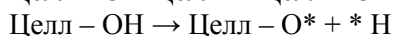
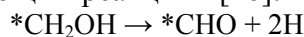
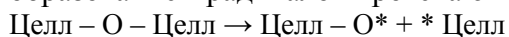
Далее образовавшийся свободный углеводородный радикал окисляется кислородом воздуха, превращаясь в нестабильный пероксидный радикал, который тут же по радикальному механизму отрывает атом водорода от соседней полимерной молекулы [2, 23].

Таким образом возникает гидропероксидный радикал и новый углеводородный свободный радикал, который снова окисляется кислородом и отрывает атом водорода от соседней полимерной молекулы, продолжая тем самым цепь разрыва связей. В это время гидропероксидный радикал также распадается на два новых свободных радикала [2, 23].

Все реакции, ведущие к образованию свободных радикалов, обратимы, и многие первичные макроалкильные радикалы воссоединяются внутри- или межмолекулярно, что ведет к ветвлению и сшиванию. Иногда это приводит к кратковременному улучшению свойств полимерного материала, но в итоге происходит снижение молекулярной массы и полная деструкция полимерных макромолекул [2, 23].

Так, например, деструкция лигнина практически всегда происходит через его конденсацию. Сначала образуются новые углерод - углеродные связи с редкой пространственной сеткой. Затем, за счет водородных связей и периферийных группировок макромолекул формируется трехмерная структура, которая впоследствии разрушается окисленными свободными радикалами соседних молекулярных цепочек [2].

При облучении солнечным светом деструкция целлюлозы (Целл.) и лигнина с образованием радикалов протекают по следующим реакциям [26]:



Проследим с помощью ИК-спектроскопии, какие изменения структуры происходят в фанерном шпоне под действием факторов старения.

Принимая во внимание, что фанерный шпон представляет собой тонкий слой древесины, сначала ознакомимся с кратким описанием ИК-спектра древесины, представленным в работе И.А. Котляровой [12].

ИК-спектр древесины достаточно сложен и насыщен полосами поглощения, соответствующими функциональным группам и связям в целлюлозе, лигнине и гемицеллюлозе. Тем не менее, выделяют несколько областей: область  $3700\text{--}3100\text{ см}^{-1}$ , которая характеризует валентные колебания различных типов гидроксильных групп, вовлеченных в водородные связи; область  $3100\text{--}2750\text{ см}^{-1}$  – область симметричных и асимметричных валентных колебаний С-Н групп метильных, метиленовых, метинных группировок компонентов древесного композита; область  $1800\text{--}1000\text{ см}^{-1}$  (область «отпечатков пальцев») – область валентных колебания групп с кратными связями (С=О, С=C, C<sub>Ar</sub>-C<sub>Ar</sub>), валентных колебаний С-С и С-О связей, а также деформационных колебаний С-Н связей и ОН-групп лигнина и целлюлозы и гемицеллюлоз; область  $1000\text{--}650\text{ см}^{-1}$  – область внеплоскостных деформационных колебаний С-Н-связей ароматического кольца лигнина, колебаний глюкопиранозного кольца целлюлозы и гемицеллюлоз, внеплоскостных деформационных колебаний ОН-групп целлюлозы и гемицеллюлоз [12].

Опираясь на приведенное описание, сопоставим ИК-спектры фанерного шпона до и после его старения (рис. 1).

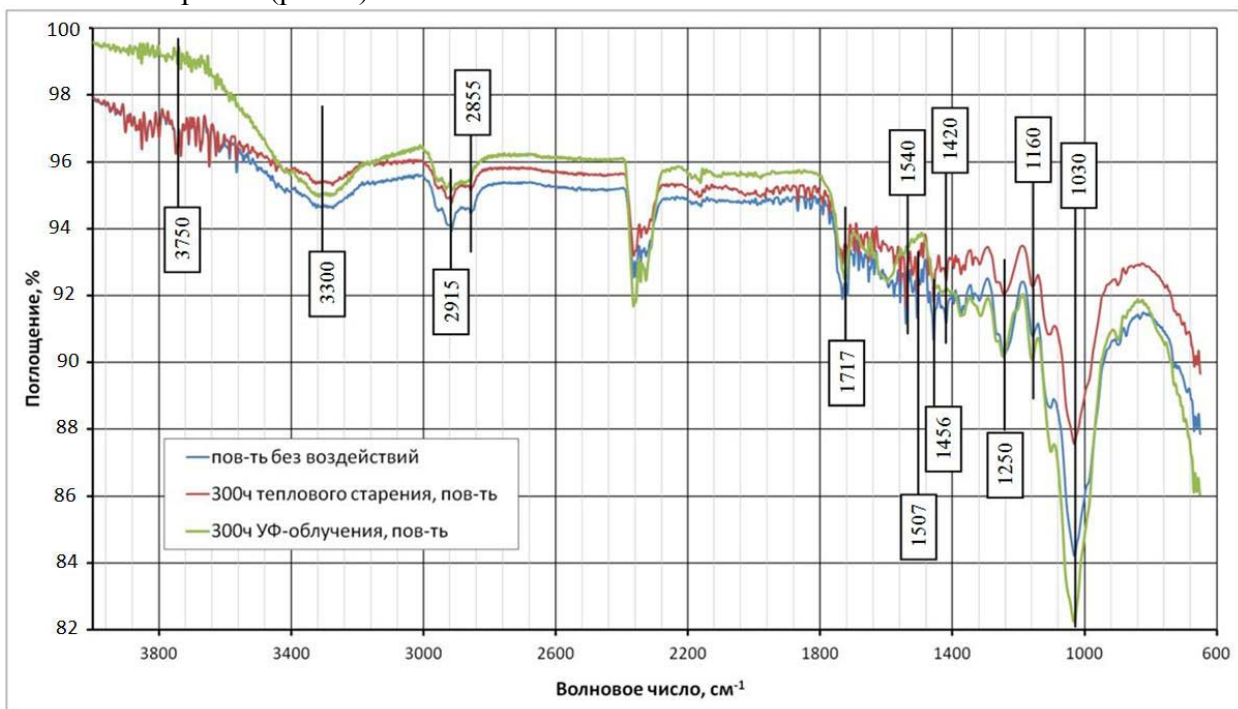


Рисунок 1 – ИК-спектры поверхности образцов фанерного шпона: исходных, после УФ-облучения (ДРТ1000) и теплового старения в течение 300 часов

Будем рассматривать следующие характерные для древесных композитов полосы  $3750, 3300, 2915, 2855, 1717, 1540, 1507, 1456, 1420, 1250, 1160 - 1030\text{ см}^{-1}$  [14 - 16].

В интервале  $3800\text{--}3100\text{ см}^{-1}$  с максимумом в полосе  $3330\text{ см}^{-1}$  наблюдается широкая полоса валентного колебания свободных и связанных гидроксильных ОН-групп, участвующих в межмолекулярных и внутримолекулярных водородных связях (рис. 1) [12, 14, 24].

В молекулах целлюлозы гидроксильные группы ОН образуют два типа водородных связей в зависимости от их положения в глюкозных звеньях. Внутримолекулярные

водородные связи образуются между ОН - группами соседних звеньев одной макромолекулы целлюлозы. Эти связи придают жесткость молекулярной цепи [25, 26].

Межмолекулярные Н-связи образуются между соседними макромолекулами, при этом в качестве доноров электронной пары выступают атомы кислорода пиранозного цикла, гликозидной связи и ОН-групп. Они отвечают за формирование надмолекулярной структуры целлюлозных волокон, обеспечивающих прочность фанерного шпона [25, 26].

Как правило, после горячего прессования в поверхностном слое плит содержание свободных ОН-групп незначительное. Об этом свидетельствует отсутствие для исходного материала явно выраженной полосы  $3750\text{ см}^{-1}$ . Действие факторов старения приводит к деструкции клеточных стенок древесных частиц и высвобождению связанных водородной связью ОН-групп целлюлозы, в результате чего наблюдается целая серия довольно интенсивных полос в области волнового числа  $3750\text{ см}^{-1}$  (рис. 1). Длительное действие теплового старения приводит к уменьшению интенсивности широкой полосы  $3300\text{ см}^{-1}$ , которая соответствует валентным колебаниям связанных гидроксильных групп.

В интервале  $3000\text{-}2600\text{ см}^{-1}$  наблюдаются две полосы средней интенсивности с максимумами при  $2915$  и  $2855\text{ см}^{-1}$ , соответствующие валентным колебаниям  $-\text{CH}_2$  и  $-\text{CH}$  групп целлюлозы и лигнина [13].

Под действием факторов старения их интенсивность незначительно снижается в результате разрыва углеводородных СН-связей. При этом фотоокисление оказывает более негативное воздействие, поскольку полоса валентных колебаний СН-групп практически полностью исчезает (рис. 1).

В интервале  $1800\text{-}1400\text{ см}^{-1}$  для исходного материала наблюдаются полосы, характерные для валентных колебаний  $\text{C}=\text{O}$  связей в карбонильных и  $\text{C}-\text{O}$  связей в карбоксильных группах лигноуглеводного комплекса древесины (рис.1). Здесь же расположены полосы, соответствующие валентным колебаниям двойных  $\text{C}=\text{C}$  бензольных и ароматических связей лигнина [12-14, 24].

В результате термо- и фотоокислительных процессов происходит увеличение числа карбонильных групп, что приводит к появлению серии полос малой интенсивности в этой области (рис. 1). Интенсивная полоса  $1717\text{ см}^{-1}$  свидетельствует о деградации химических  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  связей в молекулярной структуре целлюлозы [14, 15].

Ряд полос различной интенсивности наблюдается в интервале  $1600\text{-}1200\text{ см}^{-1}$  для образцов до и после теплового старения. Это интервал деформационных колебаний групп  $\text{CH}_3$ ,  $\text{CH}_2$  и  $\text{OH}$ , и ароматических скелетных вибраций лигнина ( $1507\text{ см}^{-1}$ ) [13, 24]. УФ-излучение лампы ДРТ1000 вызывает окисление лигнина, поэтому полосы  $1540$ ,  $1507$  и  $1460\text{ см}^{-1}$  пропадают из спектра.

Стоит обратить внимание на исчезновение полосы  $1420\text{ см}^{-1}$  после УФ-облучения. Это полоса кристалличности целлюлозы. Известно, что микрофибриллы целлюлозы включают в себя как кристаллические зоны, так и аморфные, которые плавно перетекают друг в друга. Исчезновение полосы кристалличности свидетельствует об аморфизации строения, т.е. появлении дефектов. Важно отметить, что окислительные процессы быстрее протекают именно в аморфных зонах, поскольку макромолекулы в них более доступны для кислорода и других агрессивных агентов [13, 25].

Полоса  $1250\text{ см}^{-1}$ , интенсивность которой под действием теплового старения падает сильнее, чем после УФ-облучения, характеризует скелетные колебания гваяцильного кольца лигнина, входящего в состав древесных волокон [24]. Снижение интенсивности полосы, по-видимому, связано с разрывами  $\text{C}-\text{O}$  связей в бензольном кольце в результате термоокисления.

В интервале  $1200\text{-}1000\text{ см}^{-1}$  для всех образцов можно наблюдать «отпечатки пальцев», т.е. наиболее характерные для целлюлозных материалов интенсивные полосы с максимумами при  $1160$ ,  $1100$  и  $1030\text{ см}^{-1}$ . Эти полосы обусловлены наличием ацетальных  $\text{C}-\text{O}-\text{C}$  и связей  $\text{C}-\text{O}$  в спиртах, эфирах и полисахаридах [13, 14, 24].



Снижение интенсивности определяющей полосы  $1030\text{ см}^{-1}$  под действием факторов старения связано с ослаблением углеродных связей в группах С-С и С-Н в результате окисления лигнина и гемицеллюлозы, которые являются более реакционноспособными по сравнению с целлюлозой, и поэтому более подвержены разложению [2, 24].

Для оценки глубины развития деградационных процессов по толщине плит образцы изымались послойно. Толщина слоев принималась около  $0,7\text{ мм}$ . ИК-спектры отдельных слоев шпона после старения представлены на рис. 2.

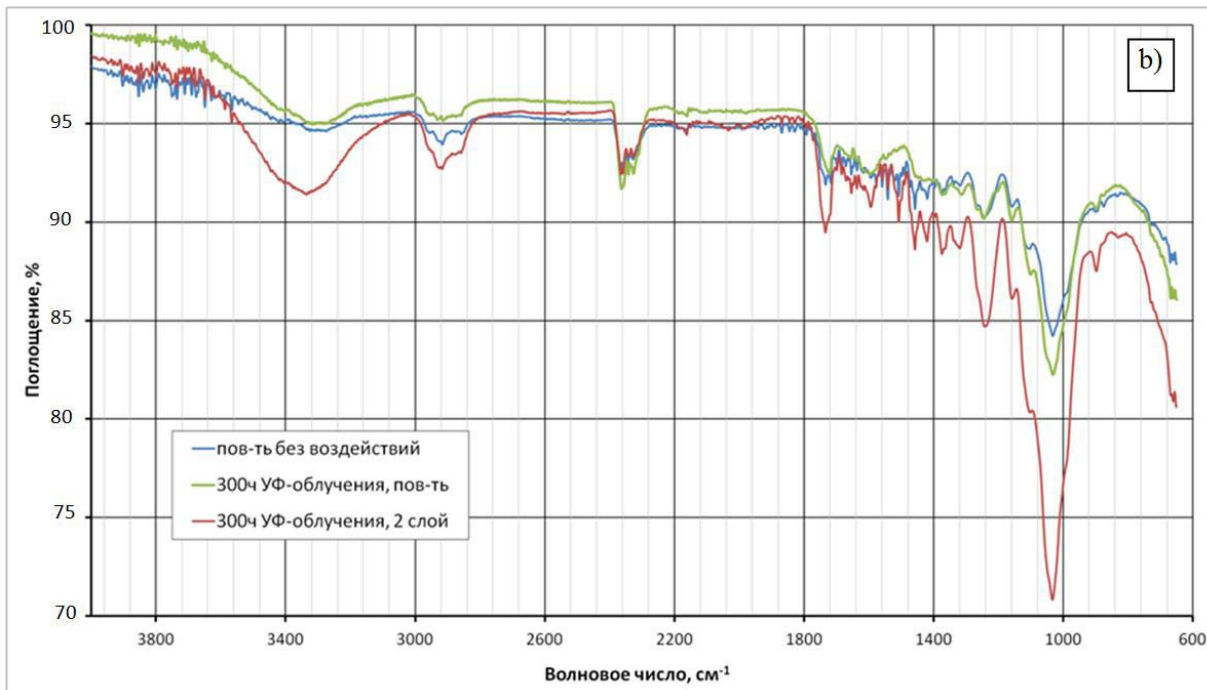
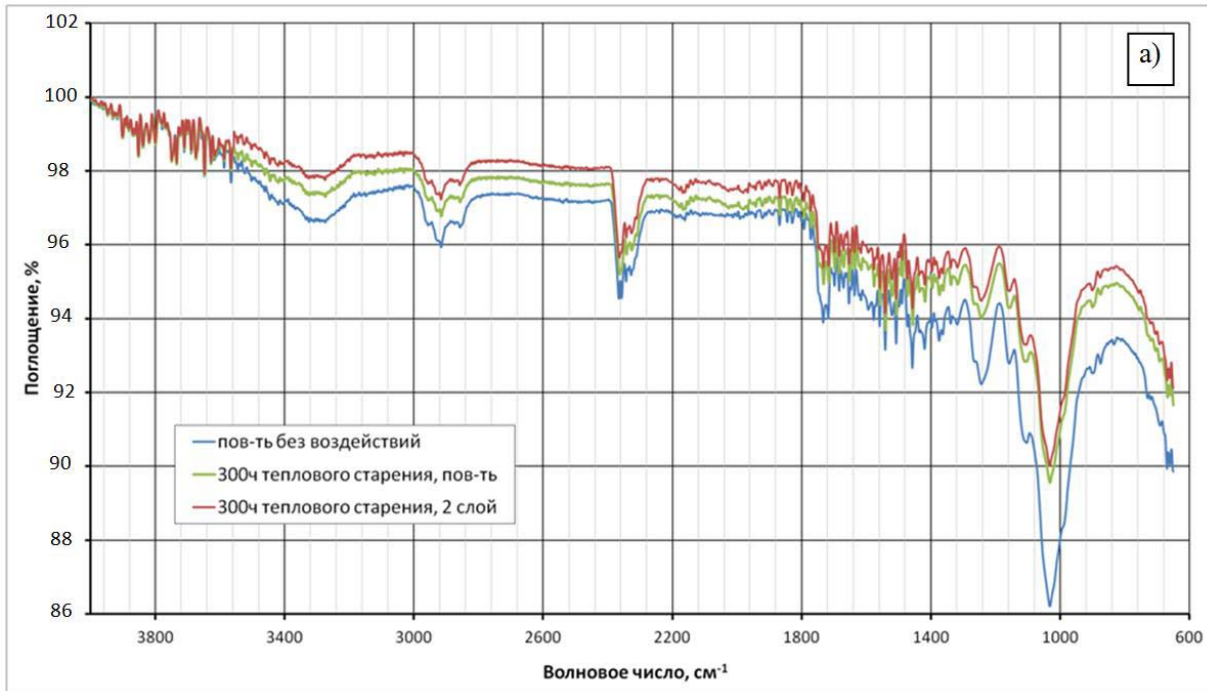


Рисунок 2 – ИК-спектры поверхности и внутренних слоев фанерного шпона после теплового старения (а) и УФ-облучения лампой ДРТ1000 (б)

Важно отметить, что УФ-облучение и тепловое старение не вызывают смещения полос поглощения для внутренних слоев композита ни в область малых, ни в область больших частот колебаний. Отличие состоит в том, что тепловое старение инициирует деструктивные процессы по всему объему плиты, о чем свидетельствует полная идентичность спектров (рис. 2а).

УФ-облучение от искусственного источника света затрагивает слой композита толщиной много меньше 0,7 мм. Видно, что интенсивность полос ИК-спектра для второго слоя больше даже, чем для исходного шпона (рис. 2б). Это объясняется наличием структурных дефектов в поверхностном слое в результате пьезотермообработки шпона.

Старение под прямыми солнечными лучами на широте 52,7 с. ш. вызывает схожие изменения в структуре композита (рис. 3). ИК-спектр облученной поверхности в целом совпадает с остальными спектрами, но отличается степенью изменения интенсивности полос.

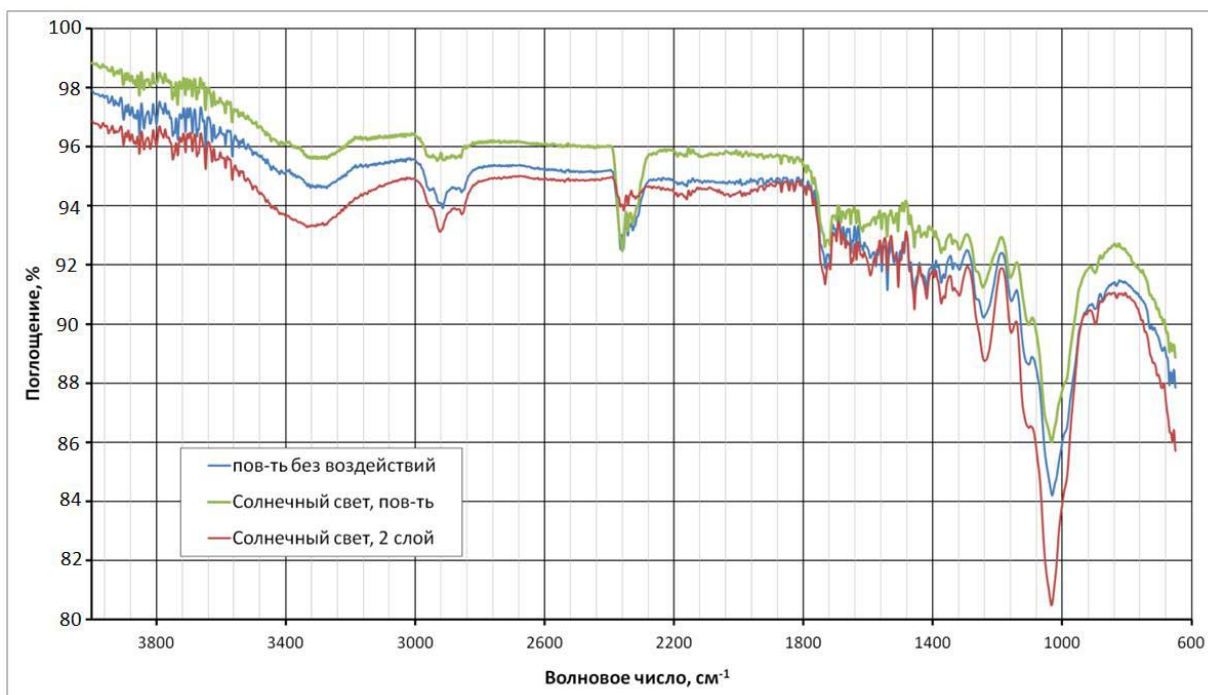


Рисунок 3 – ИК-спектры поверхности и внутренних слоев фанерного шпона после облучения солнечным светом в течение июня-августа

На спектре заметно, как уменьшается интенсивность полосы  $3300\text{ см}^{-1}$  в результате разрыва водородных связей и высвобождения гидроксильных групп под действием УФ части солнечного света.

Как и в случае с искусственным источником УФ-облучения для поверхности шпона наблюдается значительное снижение интенсивности (практически исчезновение) двух полос  $2915$  и  $2855\text{ см}^{-1}$  в результате деструкции СН связей.

Низкая стойкость лигнина к солнечной радиации в результате наличия в нём большого числа хромофорных групп, хорошо поглощающих УФ-излучение, приводит к разрушению ароматических скелетных связей и скелетных связей кольца в его макромолекулах, в результате чего значительно снижается интенсивность полос поглощения  $1540$ ,  $1507$ ,  $1460$  и  $1250\text{ см}^{-1}$  соответственно.

Увеличение числа карбоксильных и карбонильных групп в результате фотоокисления лигнина и гемицеллюлозы снижает интенсивность полос в интервале  $1800\text{--}1580\text{ см}^{-1}$ . Как и в случае с лампой ДРТ1000 наблюдается пожелтение шпона (рис. 4).

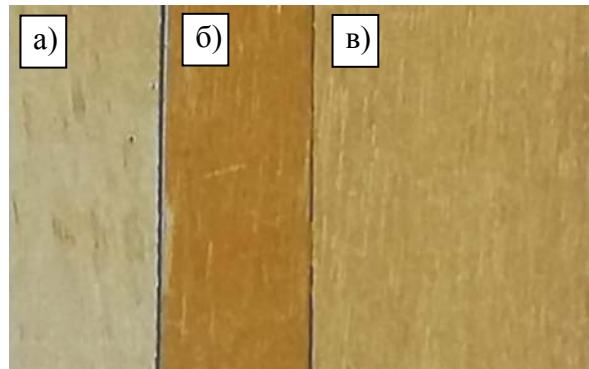


Рисунок 4 – Изменение цвета поверхности фанерного шпона (а) после 300 часов облучения лампой ДРТ1000(б) и после 3 месяцев облучения солнечным светом (в).

Деструкция химических связей в углеводородной части полисахаридов под действием солнечной радиации подтверждается снижением интенсивности характеристической полосы  $1030\text{ см}^{-1}$ .

В случае облучения композита солнечным светом толщина поврежденного фотоокислительными процессами слоя также составляет менее 0,7 мм. Наблюдаемая высокая интенсивность полос поглощения для глубины более 0,7 мм. связана с сохранением внутреннего строения и структуры шпона в результате экранирующего эффекта.

### Заключение

Проведенное исследование показывает, что ИК-спектроскопия является информативным методом, позволяющим выявить изменения в молекулярной структуре шпона фанерных плит, вызванные процессами термо- и фотоокисления. Длительное действие повышенной температуры и УФ-облучения инициирует свободно-радикальные реакции разрыва водородных и углеводородных связей в различных функциональных группах макромолекул целлюлозы и лигнина, что приводит к изменению цвета поверхности шпона и повышению его шероховатости. Данные процессы подтверждаются изменением интенсивности соответствующих полос поглощения.

Искусственное и естественное УФ-облучение вызывают деградацию материала на глубине менее 0,7 миллиметра. В случае с тепловым старением деструктивные изменения наблюдаются по всему объему композита.

Полученные результаты ИК-спектроскопии фанерного шпона позволяют лучше понять на химическом уровне процессы деструкции древесного шпона и выбрать способ модификации, повышающий стойкость фанерных плит к старению.

### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Mayandi K., Rajini N., Ayrilmis N., Devi M.P. I., Siengchin S., Mohammad F., Al-Lohedan H. A. An overview of endurance and ageing performance under various environmental conditions of hybrid polymer composites. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. V.9, Iss.6, pp. 15962-15988.
2. Friedrich D. Effects from natural weathering on long-term structural performance of wood-polymer composite cladding in the building envelope. *Journal of Building Engineering*. 2019. V. 23, pp. 68-76.
3. Moreno D.D.P., Hirayama D., Saron C. Accelerated aging of pine wood waste/recycled LDPE composite. *Polymer Degradation and Stability*. 2018. V. 149, pp. 39-44.



4. Friedrich D., Luible A. Investigations on ageing of wood-plastic composites for outdoor applications: A meta-analysis using empiric data derived from diverse weathering trials. *Construction and Building Materials*. 2016. V. 124, pp. 1142-1152.
5. Vedrtnam A., Kumar S., Chaturvedi S. Experimental study on mechanical behavior, biodegradability, and resistance to natural weathering and ultraviolet radiation of wood-plastic composites. *Composites. Part B: Engineering*. 2019. V. 176. ID 107282.
6. Kuka E., Andersons B., Cirule D., Andersone I., Kajaks J., Militz H., Bicke S. Weathering properties of wood-plastic composites based on heat-treated wood and polypropylene. *Composites. Part A: Applied Science and Manufacturing*. 2020. V. 139, ID 106102.
7. Sharma V., Yadav J., Kumar R., Tesarova D., Ekielski A., Kumar Mishra P. On the rapid and non-destructive approach for wood identification using ATR-FTIR spectroscopy and chemometric methods. *Vibrational Spectroscopy*. 2020. V. 110. ID 103097.
8. Durmaz S., Özgenç Ö., Boyacı İ.H., Yıldız Ü.C., Erişir E. Examination of the chemical changes in spruce wood degraded by brown-rot fungi using FT-IR and FT-Raman spectroscopy. *Vibrational Spectroscopy*. 2016. V. 85, pp. 202-207.
9. Huiwen Cai, Fangni Du, Lingyun Li, Bowen Li, Huahong Shi. A practical approach based on FT-IR spectroscopy for identification of semi-synthetic and natural celluloses in microplastic investigation. *Science of The Total Environment*. 2019. V. 669, pp. 692-701.
10. Stewart D. Lignin as a base material for materials applications: Chemistry, application and economics. *Industrial Crops and Products*. 2008. V. 27, Iss. 2, pp. 202-207.
11. Liao J.J., Latif N.H.A., Trache D., Brosse N., Hussin M.H. Current advancement on the isolation, characterization and application of lignin. *International Journal of Biological Macromolecules*. 2020. V. 162, pp. 985-1024.
12. Alharbi M.A.H., Hirai S., Tuan H. A., Akioka Sh., Shoji W. Dataset on mechanical, thermal and structural characterization of plant fiber-based biopolymers prepared by hot-pressing raw coconut coir, and milled powders of cotton, waste bagasse, wood, and bamboo. *Data in Brief*. 2020. V. 30, ID 105510.
13. Popescu C., Jones D., Kržišnik D., Humar M. Determination of the effectiveness of a combined thermal/chemical wood modification by the use of FT-IR spectroscopy and chemometric methods. *Journal of Molecular Structure*. 2020. V. 1200, ID 127133.
14. Nicole M.S., Laurent M.M. Characterization of weathered wood-plastic composite surfaces using FTIR spectroscopy, contact angle, and XPS. *Polymer Degradation and Stability*. 2007. V. 92, Iss. 10, pp. 1883-1890.
15. Li D.F., Li L., Zhou J.C. Applications of Infrared Spectroscopy in the Study of Wood Plastic Composites. *Advanced Materials Research*. 2010. V. 113-116, pp. 2003-2006.
16. Fateh T., Rogaume T., Luche J., Richard F., Jabouille F. Kinetic and mechanism of the thermal degradation of a plywood by using thermogravimetry and Fourier-transformed infrared spectroscopy analysis in nitrogen and air atmosphere. *Fire Safety Journal*. 2013. V. 58, pp. 25-37.
17. Kychkin A.K., Startsev O.V., Lebedev M.P., Polyakov V.V. Effect of solar radiation and synergism of the effect of UV radiation, temperature and moisture on the distraction of polymer composite materials in a cold climate. *Procedia Structural Integrity*. 2020. V. 30, pp. 71-75.
18. Startsev V.O., Lebedev M.P., Khrulev K.A., Molokov M.V., Frolov A.S., Nizina T.A. Effect of outdoor exposure on the moisture diffusion and mechanical properties of epoxy polymers. *Polymer Testing*. 2018. V. 65, pp. 281-296.
19. Lebedev M.P., Startsev O.V., Kychkin A.K. Development of climatic tests of polymer materials for extreme operating conditions. *Procedia Structural Integrity*. 2019. V. 20, pp. 81-86.
20. Kopač J, Šali S. Wood: an important material in manufacturing technology. *Journal of Materials Processing Technology*. 2003. V. 133, Issues 1-2, pp. 134-142.
21. Bekhta P., Salca E.-A. Influence of veneer densification on the shear strength and temperature behavior inside the plywood during hot press. *Construction and Building Materials*. 2018. V. 162, pp. 20-26.

22. Tomak E.D., Ustaomer D., Yildiz S., Pesman E. Changes in surface and mechanical properties of heat treated wood during natural weathering. *Measurement*. 2014. V. 53, pp. 30-39.

23. Friedrich D.. Comparative study on artificial and natural weathering of wood-polymer compounds: A comprehensive literature review. *Case Studies in Construction Materials*. 2018. V. 9, ID e00196.

24. Peng Y., Liu R., Cao J. Characterization of surface chemistry and crystallization behavior of polypropylene composites reinforced with wood flour, cellulose, and lignin during accelerated weathering. *Applied Surface Science*. 2015. V. 332, pp. 253-259.

25. Zbankov R.G, Firsov S.P., Buslov D.K., Nikonenko N.A., Marchewka M.K., Ratajczak H. Structural physico-chemistry of cellulose macromolecules. Vibrational spectra and structure of cellulose. *Journal of Molecular Structure*. 2002. V. 614, Iss. 1-3, pp. 117-125.

26. Liu Y., Shao L., Gao J., Guo H., Chen Y., Cheng Q., Via B.K.. Surface photo-discoloration and degradation of dyed wood veneer exposed to different wavelengths of artificial light. *Applied Surface Science*. 2015. V. 331, pp. 353-361.

#### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

*Мамонтов Семен Александрович* – кандидат технических наук, доцент, Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106, e-mail: [kardinal61@mail.ru](mailto:kardinal61@mail.ru))

*Мамонтов Александр Александрович* – кандидат технических наук, доцент, Тамбовский государственный технический университет (392000, Россия, г. Тамбов, ул. Советская, 106, e-mail: [sansanich1409@yandex.ru](mailto:sansanich1409@yandex.ru))

#### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

*Mamontov Semyon Alexandrovich* – Ph.D. (Eng), Assoc. Prof., Tambov State Technical University (392000, Russia, Tambov, Sovetskaya str. 106, e-mail: [kardinal61@mail.ru](mailto:kardinal61@mail.ru))

*Mamontov Aleksandr Alexandrovich* – Ph.D. (Eng), Assoc. Prof., Tambov State Technical University (392000, Russia, Tambov, Sovetskaya str. 106, e-mail: [sansanich1409@yandex.ru](mailto:sansanich1409@yandex.ru))

Статья поступила в редакцию 10.02.2023; одобрена после рецензирования 18.02.2023, принята к публикации 22.02.2023.

The article was submitted 10.02.2023; approved after reviewing 18.02.2023; accepted for publication 22.02.2023.