

К ВОПРОСУ ОБ ОЦЕНКЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТВЕРДОСТИ БИОКОМПОЗИТА ПОСЛЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

ON THE QUESTION OF ASSESSING THE CHANGES IN THE BIOCOMPOSITE HARDNESS
AFTER EXPOSURE TO A PULSED MAGNETIC FIELD

Камалова Н.С., кандидат физико-математических наук, доцент, доцент, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Kamalova N.S., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Associate professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Матвеев Н.Н., доктор физико-математических наук, профессор, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Matveev N.N., DrSc in Physics and Mathematics, Professor, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Евсикова Н.Ю., кандидат физико-математических наук, доцент, заведующий кафедрой общей и прикладной физики, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Evsikova N.Yu., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Head of the General and Applied Physics Department, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Лисицын В.И., кандидат физико-математических наук, доцент, профессор, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова», Воронеж, Россия

Lisitsyn V.I., PhD in Physics and Mathematics, Docent, Professor, Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov, Voronezh, Russia

Аннотация. В статье приводятся данные экспериментов по исследованию влияния импульсного магнитного поля на торцевую твёрдость образцов модифицированной уплотнённой древесины берёзы. Качественный анализ результатов многочисленных измерений позволяет с достаточной уверенностью утверждать, что в лингоуглеводной матрице модифицированной древесины импульсами магнитного поля стимулируются процессы, которые целесообразно моделировать в рамках классической термодинамики.

Ключевые слова: импульсное магнитное поле, торцевая твёрдость древесины, лингоуглеводная матрица, надмолекулярная структура древесины.

Abstract. The article presents data from experiments on the study of the effect of a pulsed magnetic field on the end hardness of samples of modified compacted birch wood. A qualitative analysis of the results of numerous measurements allows us to state with sufficient confidence that in the lignocarbhydrate matrix of modified wood, magnetic field pulses stimulate processes that are appropriate to model within the framework of classical thermodynamics.

Keywords: pulsed magnetic field, end grain hardness of wood, lignocarbohydrate matrix, supramolecular structure of wood.

Современный рынок деталей для поддержания вращающихся компонентов механизмов представлен широким ассортиментом втулок и подшипников скольжения, изготовленных из различных материалов. Наибольшей износостойкостью отличаются детали, выполненные из цветных и чёрных металлов (чугун, бронза, баббит и др.) [1-3]. Однако, при использовании в узлах трения различных механизмов металлические подшипники довольно быстро изнашиваются. Поэтому в современном физическом материаловедении остается актуальной задача расширения сферы сравнительно дешёвых неметаллических материалов, способных эффективно заменить активно используемые дорогостоящие металлические аналоги [3, 4]. Как показывает практика, в качестве такого материала целесообразно рассматривать уплотнённую древесину, поскольку неоспоримым преимуществом последней, по сравнению с другими конструкционными материалами, является постоянное возобновление её запасов [3, 4]. Особенно это выгодно для нашей страны, значительная часть которой покрыта лесами. Природная древесина отличается малой плотностью, относительно высокой прочностью и жёсткостью и вместе с тем лёгкой, по сравнению с другими материалами, обрабатываемостью. Для изменения её механических свойств в соответствии с целями эксплуатации выполненных из неё изделий довольно давно разработаны различные способы обработки: уплотнение, пропитка, сушка, облучение и их различные комбинации. Кроме того, использование древесины вместо металлических материалов позволяет существенно снизить стоимость деталей, что в любое время будет восприниматься как существенное преимущество. В настоящий момент наибольший интерес вызывают физические способы обработки природной и модифицированной древесины. Одна из таких технологий – обработка импульсным магнитным полем. Однако, структура древесины, по сравнению с металлами, является слабо упорядоченной. Из всех её составляющих лишь целлюлоза обладает частичной кристалличностью [6, 7]. Поэтому выявление механизма изменений надмолекулярной структуры этого сложного композита природного происхождения крайне затруднено.

Цель данной работы – провести анализ экспериментальных данных об изменении торцевой твёрдости модифицированной древесины берёзы после обработки импульсным магнитным полем и сформулировать вербальную модель механизма формирования новой надмолекулярной структуры её лингоуглеводной матрицы, обуславливающей эти изменения.

На рисунке 1а представлен фрагмент поперечного среза типичного образца так называемой неделовой древесины берёзы, которая после модифицирования часто используется для изготовления подшипников скольжения [1, 2]. Легко заметить годовичные слои, сосуды, повышающие сопротивляемость упругому деформированию в радиальном направлении по сравнению с тангенциальным, сердцевинные лучи и состоящий из клеток и придающий ей прочность и твёрдость либриформ [6, 7]. Таким образом, уникальность механических свойств древесины во многом определяется сложностью её микроструктуры. Исследования воздействия на химический состав, структуру и свойства древесины оснований, кислот, окислителей и агрессивных физических факторов (например, радиации) позволяют моделировать её строение как лингоуглеводную матрицу, представляющую из себя

взаимопроникновение сеток углеводов и лигнина (см. Рис. 1б и 1в) [8]. Таким образом, сложно представить надмолекулярную структуру древесины некоей моделью, подобно кристаллической решетке металлов. Это сильно затрудняет процесс выявления механизмов влияния на неё импульсного магнитного поля.

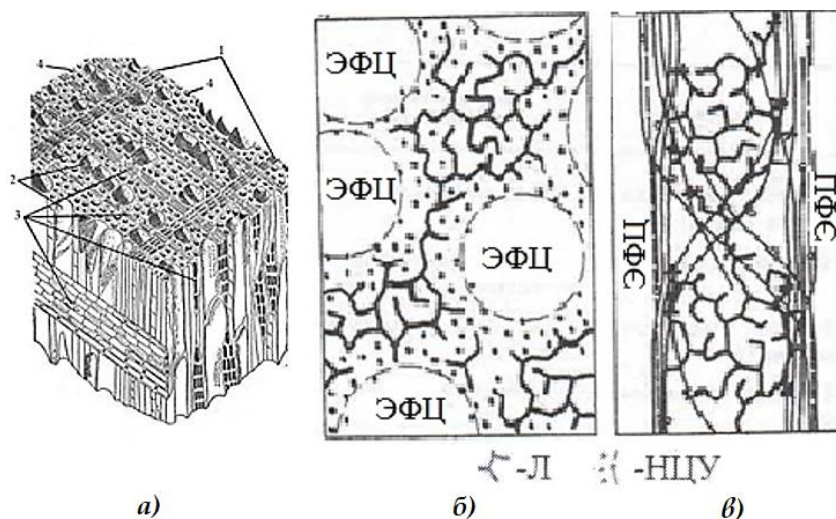


Рисунок 1 – Особенности микроструктуры древесины.

а) Фрагмент поперечного среза древесины берёзы:

1 – годовичные слои; 2 – сосуды; 3 – сердцевинные лучи; 4 – либриформ [4].

Схема строения древесинного вещества вторичной оболочки клеточных стенок древесины берёзы: б) – поперечный срез, в) продольный срез; условные обозначения: ЭФЦ – элементарные фибриллы целлюлозы; Л – лигнин; НЦУ — нецеллюлозные углеводы (гемицеллюлозы) [1]

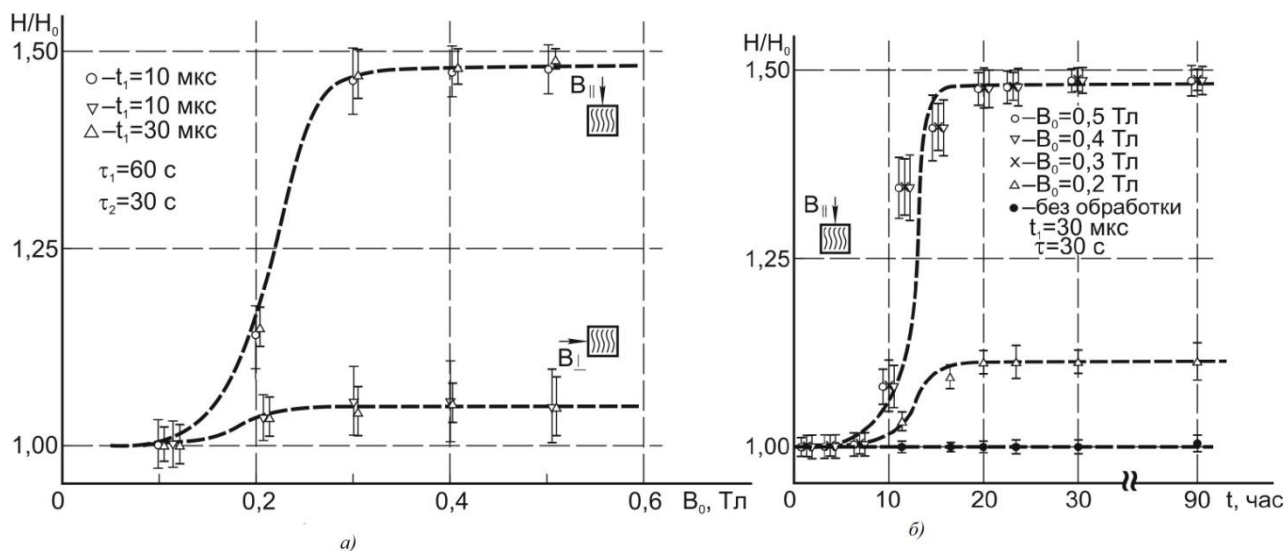


Рисунок 2 – Зависимость относительной твёрдости модифицированной древесины берёзы:

а) от амплитуды импульса B_0 ; б) от времени выдержки после обработки импульсным магнитным полем [5]

В экспериментах исследовалось влияние характеристик импульсного магнитного поля (ИМП) на относительную торцевую твёрдость образцов модифицированной древесины берёзы. Определение статической твёрдости осуществлялось по Роквеллу согласно стандарту (ГОСТ 13338-86) для модифицированной древесины [1]. Во время экспозиции образцы обрабатывались при параллельном расположении силовых линий поля и древесных волокон треугольными импульсами через одинаковые промежутки времени. В процессе исследований выяснялось влияние амплитуды магнитного поля (B_0), длительности обработки (τ) и импульса (Δt_i), а также времени выдержки после воздействия ИМП (t) на отношение их твёрдости после обработки к начальной (H/H_0).

Проведенные исследования показали, что относительная торцевая твердость образцов модифицированной берёзы H/H_0 после обработки импульсным магнитным полем повышается, если амплитуда индукции магнитного импульса B_0 превышает 0,2 Тл, а после достижения 0,3 Тл достигает максимума (увеличивается практически в 1,5 раза). Дальнейшее увеличение амплитуды практически не влияет на результат (см. Рис. 2а). Влияние времени обработки τ при условии, что B_0 больше 0,3 Тл, оказалось взаимосвязанным с длительностью импульса Δt_i . Например, при длительности импульса $\Delta t_i = 10$ мкс максимальное увеличение относительной твердости наблюдалось при $\tau \approx 60$ с, а при $\Delta t_i = 30$ мкс τ уменьшалось почти в 3 раза. После обработки импульсным магнитным полем у всех без исключения образцов модифицированной древесины относительная твердость увеличивалась и достигала максимума примерно через 24 часа (см. Рис. 2б).

Для проверки, происходит ли наблюдаемое увеличение относительной торцевой твёрдости в приповерхностном слое или по всему объёму, импульсным магнитным полем обрабатывался образец увеличенного размера (до 100 мм), а перед измерением твёрдости по Роквеллу из него нарезались стандартные (толщией по 15 мм) образцы. Данные измерения торцевой твёрдости показали, что отношение H/H_0 увеличивается в 1,35÷1,55 раз, что не противоречит результатам, полученным ранее [5].

Вербальный анализ проведённых экспериментов, в первую очередь, поражает повторяемостью полученных результатов, это подтверждает их достоверность. Наличие порогового характера изменения относительной торцевой твёрдости при варьировании параметров обработки импульсным магнитным полем говорит о процессах перестройки надмолекулярной структуры модифицированной древесины берёзы. Особенно интересен тот факт, что максимальное изменение относительной твёрдости практически одинаково для различных по сути экспериментов. Наличие времени выдержки после обработки можно объяснить завершением внутренних изотермических процессов в лингоуглеводной матрице модифицированной древесины.

Таким образом, механизм изменения надмолекулярной структуры лингоуглеводной матрицы необходимо рассматривать в рамках классической термодинамики. При таком подходе устойчивое (стационарное) состояние древесины, как термодинамической системы, соответствует минимуму функции Гиббса (G). С учетом практически неизменной температуры в условиях эксперимента можно записать, что

$$dG = m \left(\frac{dP}{\rho} - P \frac{d\rho}{\rho^2} \right) - T_k dS = 0 ,$$

где T_k – температура окружающей среды; S – энтропия; m – масса образца; P – давление текущего состояния; вместо объема используется его определение через массу и плотность ρ).

Таким образом, изменение торцевой твёрдости модифицированной древесины после обработки импульсным магнитным полем во многом вызвано внутренними процессами самоорганизации в лингоуглеводной матрице, стимулированными воздействием на её надмолекулярную структуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Камалова, Н.С. Физические основы модифицирования древесины : монография / Н.С. Камалова, В.В. Постников. – Воронеж: Воронежский государственный лесотехнический университет им. Г.Ф. Морозова, 2019. – 164 с.
2. Матвеев, Н.Н. Поляризационные явления в кристаллизующихся полимерах и биокмпозиционных материалах в неоднородном температурном поле : монография / Н.Н. Матвеев, Н.С. Камалова, Н.Ю. Евсикова. – Воронеж: М-во науки и высшего образования РФ, ФГБОУ ВО «ВГЛТУ». – 2022. – 311 с.
3. Скуратов, Н. Модифицирование древесины / Н. Скуратов // Лесная индустрия. – 2016. – № 5 (97). – С. 34-39.
4. Шамаев, В.А. Химико-механическое модифицирование древесины : монография / В.А. Шамаев. – Воронеж: ВГЛТА, 2003. – 260 с.
5. Кальченко, С.В. Упрочнение модифицированной древесины после воздействия ультразвука и импульсного магнитного поля : автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 01.04.07 / Кальченко Сергей Владимирович; ВГУ. – Воронеж, 2011. – 18 с.
6. Вихров, В.Е. Строение и физико-механические свойства древесины : моногр. / В.Е. Вихров. – Москва : Изд. АН СССР, 1954. – 264 с.
7. Уголев, Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения : учеб. пособие / Б.Н. Уголев. – Москва : МГУЛ, 2001. – 340 с.
8. Wood as a multicomponent, crosslinked polymer system / P. Erins, V. Cinite, M. Jakobsons, J. Gravitis // Journal of applied polymer science. Applied polymer symposium. – 1976. – № 26. – P. 1117-1138.

REFERENCES

1. Kamalova, N.S. Physical foundations of wood modification: monograph / N.S. Kamalova, V.V. Postnikov. – Voronezh: Voronezh State Forest Engineering University named after G.F. Morozov, 2019. – 164 p.
2. Matveev, N.N. Polarization phenomena in crystallizing polymers and biocomposite materials in a non-uniform temperature field: monograph / N.N. Matveev, N.S. Kamalova, N.Yu. Evsikova. – Voronezh: Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, FSBEI HE "VSTU". – 2022. – 311 p.
3. Skuratov, N. Wood modification / N. Skuratov // Forest industry. – 2016. – No. 5 (97). – P. 34-39.

4. Shamaev, V.A. Chemical-mechanical modification of wood: monograph / V.A. Shamaev. – Voronezh: VGLTA, 2003. – 260 p.
5. Kalchenko, S.V. Strengthening of modified wood after exposure to ultrasound and pulsed magnetic field: author's abstract. diss. candidate of physical and mathematical sciences: 01.04.07 / Kalchenko Sergey Vladimirovich; VSU. – Voronezh, 2011. – 18 p.
6. Vikhrov, V.E. Structure and physical-mechanical properties of wood: monograph. / V.E. Vikhrov. – Moscow: Publ. USSR Academy of Sciences, 1954. – 264 p.
7. Ugolev, B.N. Wood science with the basics of forest commodity science: textbook / B.N. Ugolev. – Moscow: MGUL, 2001. – 340 p.
8. Wood as a multicomponent, crosslinked polymer system / P. Erins, V. Cinite, M. Jakobsons, J. Gravitis // Journal of applied polymer science. Applied polymer symposium. – 1976. – № 26. – P. 1117-1138.