

DOI: 10.58168/TBiEc2025_331-337

УДК 674

ИННОВАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОТДЕЛКИ ДРЕВЕСИНЫ С УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МОДИФИКАЦИЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

INNOVATIVE TECHNOLOGY OF WOOD FINISHING WITH ULTRASONIC SURFACE MODIFICATION

Соколова В.А., к.т.н., доцент ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет промышленных технологий и дизайна», Санкт-Петербург, Россия.

Sokolova V.A., candidate of Technical Sciences, Associate Professor FGBOU VO «St. Petersburg State University of Industrial Technology and Design», St. Petersburg, Russia.

Аннотация: в статье представлена инновационная технология отделки древесины с применением ультразвуковой обработки, направленная на повышение качества лакокрасочных покрытий и снижение материалоемкости процесса. Экспериментально исследовано влияние ультразвуковой предобработки на адгезионные и физико-механические характеристики защитно-декоративных покрытий. Установлено, что обработка ультразвуком позволяет уменьшить расход лакокрасочных материалов на 18-22% при одновременном увеличении адгезии на 25-30% и повышении износостойкости покрытий на 35-40% по сравнению с традиционной технологией. Проведен экономический анализ внедрения технологии в производство деревянных изделий. Технология представляет практический интерес для мебельной и деревообрабатывающей промышленности, обеспечивая ресурсосбережение и повышение конкурентоспособности продукции.

Abstract: the article presents an innovative technology for finishing wood using ultrasonic treatment, aimed at improving the quality of paint and varnish coatings and reducing the material intensity of the process. The effect of ultrasonic pretreatment on the adhesive and physical and mechanical characteristics of protective and decorative coatings was experimentally studied. It was found that ultrasonic treatment allows reducing the consumption of paint and varnish materials by 18-22% while increasing adhesion by 25-30% and increasing wear resistance of coatings by 35-40% compared to traditional technology. An economic analysis of the implementation of the technology in the production of wooden products was carried out. The technology is of practical interest for the furniture and woodworking industries, ensuring resource conservation and increasing the competitiveness of products.

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, модификация древесины, лакокрасочные покрытия, адгезия, ресурсосберегающие технологии.

Keywords: ultrasonic treatment, wood modification, paint coatings, adhesion, resource-saving technologies.

На заседании Президиума Государственного Совета 4 мая 2023 года, где обсуждались перспективы промышленного развития России в условиях санкционных ограничений, Президент РФ В. В. Путин подчеркнул важность быстрой разработки комплексных мер поддержки для ускоренного роста обрабатывающей промышленности. Особое внимание было уделено необходимости создания отечественных производств критически важной продукции, углубленной переработки сырья, а также внедрения инновационных технологий и материалов. Реализация этих задач имеет ключевое значение для трансформации экономики страны, поскольку от эффективности промышленной политики зависит формирование новых рынков труда, развитие науки и спрос на российские технологии [1].

В рамках государственной программы, направленной на повышение конкурентоспособности промышленности (утвержденной Постановлением Правительства РФ №328 от 15 апреля 2014 г. с последующими изменениями от 16 февраля 2023 г.), особое место занимает развитие лесопромышленного комплекса. Основные цели включают расширение отечественных производств, повышение качества древесной продукции и снижение зависимости от импорта.

В данном контексте особую значимость приобретает совершенствование технологий отделки древесины, поскольку улучшение защитно-декоративных покрытий напрямую влияет на долговечность изделий и рациональное использование ресурсов. Эти меры соответствуют приоритетному направлению «Рациональное природопользование», закрепленному в Указе Президента РФ №899 от 7 июля 2011 года.

Таким образом, развитие современных методов обработки древесины не только способствует импортозамещению, но и поддерживает экологическую устойчивость и инновационное развитие промышленности.

Целенаправленное улучшение характеристик древесины и защитных покрытий представляет собой перспективное направление в строительной сфере. Благодаря применению инновационных технологий и специализированных составов удаётся значительно повысить эксплуатационные качества древесных материалов.

Сегодня научные исследования в области модификации древесины переходят из теоретической плоскости в практическое применение. Особую популярность приобретает модифицированная древесина, отличающаяся повышенной устойчивостью к биологическому разрушению и увеличенным сроком службы [2].

Среди передовых методик обработки особого внимания заслуживают технологии физического и акустического воздействия. Применение звуковых волн и физических полей открывает новые возможности для изменения структуры древесины, позволяя придавать материалу уникальные свойства. Развитие данного направления способствует созданию высокотехнологичных строительных материалов с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Ультразвуковая обработка представляет собой сложный физико-химический процесс, в основе которого лежит воздействие мощных ультразвуковых колебаний на жидкую среду.

Этот метод вызывает комплекс взаимосвязанных явлений, существенно изменяющих свойства обрабатываемого материала [3].

Основу процесса составляют первичные механические эффекты:

- кавитация (образование и схлопывание микропузырьков);
- переменное звуковое давление;
- радиационное давление;
- акустические потоки.

Эти первичные явления порождают вторичные эффекты:

- локальный нагрев материала
- процессы диспергирования и коагуляции
- ускорение окислительных реакций
- интенсификацию химических процессов.

Особенностью ультразвуковой обработки является синергетический характер взаимодействия этих эффектов, что позволяет достигать уникальных результатов при модификации материалов. Комбинация механического и теплового воздействия с химическими процессами открывает новые возможности в области обработки различных веществ, в том числе древесных материалов.

Современные исследования [4-6] подтверждают высокую эффективность данного метода, особенно в сочетании с другими физико-химическими способами обработки, что делает его перспективным направлением в материаловедении.

При ультразвуковой обработке суммарное давление P_T , которое воздействует на неотвержденный лакокрасочный материал, определяется уравнением:

$$P_T = P_h + P_a \quad (1)$$

где P_h - внешнее атмосферное давление в жидкости, P_a - акустическое давление звуковых колебаний:

$$P_a = P_A \sin(2\pi ft) \quad (2)$$

где P_A - максимальная амплитуда акустического давления [119].

Звуковое давление распространяется в виде волны сквозь жидкую среду и вызывает колебания молекул, увеличивая мгновенное значение их кинетической энергии:

$$V = \frac{dx}{dt} = 2\pi f x_0 \cos(2\pi ft) \quad (3)$$

Часть энергии теряется вследствие наличия определенной вязкости, обусловленной трением молекул друг о друга, а также вследствие теплового эффекта, сопровождающегося переносом тепла из области высокой кинетической энергии в область низкую. При этом волновая энергия уменьшается при увеличении расстояния отдалении от источника ультразвуковых волн. Степень ослабления описывается уравнением:

$$I = I_0 \exp(-2al) \quad (4)$$

где a - коэффициент поглощения колебаний средой, I_0 - начальная интенсивность звуковой волны, I - интенсивность на расстоянии l от источника.

Суммарно структурные и термические потери дают общую поглощающую способность среды:

$$a = \frac{2\pi^2 f^2}{\rho c^3} \left(\frac{4}{3} \eta + \frac{(\gamma-1)K}{\gamma C_v} \right) \quad (5)$$

где η - вязкость среды; f - частота колебаний; K - коэффициент теплопроводности среды; γ - отношение молярных теплоемкостей среды; C_v - молярная теплоёмкость при постоянном объеме.

Согласно формуле (5) с увеличением вязкости или частоты колебаний поглощающий эффект среды возрастает, снижая развитие кавитации.

Экспериментальные данные [7,8] свидетельствуют, что применение высокоинтенсивных ультразвуковых колебаний существенно активизирует химические процессы в высоковязких и концентрированных средах, к которым относятся лакокрасочные материалы.

Ключевые эффекты ультразвукового воздействия:

1. Интенсификация полимеризации - ультразвуковая обработка способствует более полному и быстрому протеканию процессов отверждения ЛКМ;
2. Оптимизация структуры покрытия - за счет активации химических реакций улучшаются физико-механические характеристики образуемой полимерной пленки;

Критические параметры технологического режима:

- Пороговая мощность - минимальный уровень энергии, необходимый для инициирования кавитационных процессов;
- Оптимальный диапазон - существует верхний предел мощности, превышение которого не приводит к дальнейшему ускорению полимеризации.

Практическая значимость исследований заключается в возможности точного подбора режимов обработки для конкретных лакокрасочных систем. Это позволяет сократить время отверждения покрытий, повысить качество защитно-декоративных слоев, оптимизировать энергозатраты технологического процесса.

Перспективы применения ультразвуковой обработки в лакокрасочной промышленности связаны с разработкой энергоэффективных установок, позволяющих точно контролировать параметры воздействия для различных типов покрытий.

В Университете промышленных технологий и дизайна разработана перспективная технология предварительной ультразвуковой обработки древесины, позволяющая существенно улучшить качество последующего лакокрасочного покрытия [9,10].

Ключевыми преимуществами технологии являются экономия материалов - снижение расхода ЛКМ до 20-30%, улучшение адгезии, улучшение эксплуатационных характеристик: увеличение износостойкости покрытия, повышение устойчивости к механическим воздействиям, улучшение декоративных свойств.

Как подтверждают проведенные исследования, предварительная ультразвуковая обработка древесины демонстрирует значительные преимущества по сравнению с традиционной технологией нанесения лакокрасочных покрытий:

1. Качественные показатели: образцы, прошедшие ультразвуковую подготовку, показали улучшенную адгезию покрытия (на 25-30%), повышенную износостойкость (на 35-40%), улучшенные декоративные характеристики. Все параметры качества покрытий превышают показатели образцов без обработки.

2. Экономический эффект:

- Снижение расхода лакокрасочных материалов на 18-22%;
- Экономия на отделке 10 000 усл.ед. продукции составляет 1,8 млн руб.
- Чистая прибыль при годовом объеме 10 000 стеллажей составляет 13,2 млн руб.

3. Технологические преимущества включают сокращение времени технологического цикла, уменьшение брака при нанесении покрытий, возможность снижения себестоимости конечной продукции.

Перспективы внедрения:

- Технология особенно эффективна для серийного производства мебели и строительных конструкций;
- Позволяет предприятиям получить конкурентное преимущество за счет повышения качества продукции, снижения производственных издержек, увеличения рентабельности производства.

Экспериментально подтвержденная эффективность технологии демонстрирует ее практическую значимость для мебельного и строительного производства.

Технологический процесс отличается простотой интеграции в существующие производственные линии и может быть адаптирован под различные породы древесины и типы лакокрасочных материалов. Применение ультразвуковой предобработки представляет собой экономически обоснованное технологическое решение, сочетающее улучшение качества продукции с существенной финансовой выгодой для производителей деревянных изделий.

Данная разработка представляет собой значимый шаг в развитии экологичного производства, позволяя одновременно сократить расход материалов и повысить качество готовой продукции.

Список литературы

1. Заседание Президиума Государственного совета. – URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/70860>.

2. Хасаншин Р.Р., Гаянова А.Р., Габдуллин Т.И. Актуальность производства и применения модифицированной древесины // Наука и инновации в XXI веке: Актуальные вопросы, открытия и достижения. Сборник статей XIII Международной научно-практической конференции. Пенза: Наука и Просвещение, 2019. С.107-109.

3. Сундуков С.К. Особенности технологии нанесения лакокрасочных покрытий на изделия машиностроения с использованием ультразвука. Диссерт. канд. техн. наук: Москва. МАДИ, 2013. 191 с.
4. Абрамов В.О. Мощный ультразвук в металлургии и машиностроении. Москва: Янус-К. 2006. 688 с.
5. Шутилов В.А. Основы физики ультразвука: Учебное пособие. Ленинград: Изд-во Ленингр. Ун-та. 1980. 280 с.
6. Сиротюк М.Г. Экспериментальные исследования ультразвуковой кавитации // Мощные ультразвуковые поля. Москва, 1968. С. 167-220.
7. Хмелев В.Н. Многофункциональные ультразвуковые аппараты и их применение в условиях малых производств, сельском и домашнем хозяйстве. Барнаул: АлтГТУ. 1997. 160 с.
8. Розенберг Л.Д. Физика и техника мощного ультразвука // Физические основы ультразвуковой технологии. Москва: Наука, 1970. 689 с.
9. Соколова В.А., Беленький Ю.И., Угрюмов С.А. Повышение эффективности формирования защитно- декоративного покрытия древесины с помощью ультразвуковой обработки // Системы. Методы. Технологии. 2023. № 4 (60). С. 129-135.
10. Sokolova V., Markov V., Rzhavtsev A. (2019) Improvement of technology of formation of coatings with metal effect by modified water-dispersion paints. *New Materials and Technologies in Mechanical Engineering: Key Engineering Materials*, DOI: doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.822.745.

References

1. Meeting of the Presidium of the State Council. – URL: <http://www.kremlin.ru/events/president/transcripts/70860>.
2. Khasanshin R.R., Gayanova A.R., Gabdullin T.I. Relevance of production and use of modified wood // *Science and innovation in the 21st century: Actual issues, discoveries and achievements. Collection of articles of the XIII International scientific and practical conference.* Penza: Science and Education, 2019. Pp. 107-109.
3. Sundukov S.K. Features of the technology of applying paint and varnish coatings to mechanical engineering products using ultrasound. Dissertation. Cand. of Technical Sciences: Moscow. MADI, 2013. 191 p.
4. Abramov V.O. Powerful ultrasound in metallurgy and mechanical engineering. Moscow: Janus-K. 2006. 688 p.
5. Shutilov V. A. Fundamentals of the Physics of Ultrasound: A Textbook. Leningrad: Publishing House of the Leningrad University. 1980. 280 p.
6. Sirotyuk M. G. Experimental Studies of Ultrasonic Cavitation // *Powerful Ultrasonic Fields.* Moscow, 1968. Pp. 167-220.

7. Khmelev V. N. Multifunctional Ultrasonic Devices and Their Application in Small-Scale Industries, Agriculture and Households. Barnaul: Altai State Technical University. 1997. 160 p.

8. Rosenberg L.D. Physics and technology of powerful ultrasound // Physical foundations of ultrasonic technology. Moscow: Nauka, 1970. 689 p.

9. Sokolova V.A., Belenkiy Yu.I., Ugryumov S.A. Improving the efficiency of forming a protective and decorative coating of wood using ultrasonic treatment // Systems. Methods. Technologies. 2023. No. 4 (60). P. 129-135.

10. Sokolova V., Markov V., Rzhavtsev A. (2019) Improvement of technology of formation of coatings with metal effect by modified water-dispersion paints. New Materials and Technologies in Mechanical Engineering: Key Engineering Materials, DOI: doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.822.745.