

Научная статья

УДК 674.048.5

DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-151-163

Применение лазерной перфорации для повышения декоративных свойств древесины пихты сибирской (*Abies sibirica*)

С.Г. Елисеев, канд. техн. наук; ResearcherID: [ABF-2131-2020](https://orcid.org/0000-0002-7746-0158),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>

В.Н. Ермолин, д-р техн. наук, проф.; ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

Д.В. Дук[✉], лаборант; ResearcherID: [AIF-4170-2022](https://orcid.org/0000-0001-9821-0927),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9821-0927>

Сибирский государственный университет науки и технологий им. М.Ф. Решетнёва, просп. им. газеты «Красноярский рабочий», д. 31, г. Красноярск, Россия, 660031; vnermolin@yandex.ru, s-555s@yandex.ru, danil211199ler@mail.ru[✉]

Поступила в редакцию 29.07.22 / Одобрена после рецензирования 27.10.22 / Принята к печати 02.11.22

Аннотация. Представлены результаты исследования возможности применения лазерной перфорации для повышения декоративных свойств древесины пихты сибирской (*Abies sibirica*). Древесина пихты имеет относительно низкие физико-механические свойства и невыразительный внешний вид, из-за чего не пользуется высоким спросом. Повышение декоративных свойств пихтовой древесины позволит производить из нее отделочные материалы. Обзор научной литературы установил, что существующие технологии крашения древесины мало подходят для труднопропитываемой древесины пихты. Поэтому с учетом одновременной возможности повышения проницаемости древесины и ее контролируемого окрашивания для формирования текстуры была использована лазерная перфорация древесины. В ходе исследования изучены особенности окрашивания перфорированной лазером древесины пихты в зависимости от режимных параметров пропитки и структуры древесины. Для этого в образцах древесины пихты (165×65×32 мм) при помощи лазера были прожжены каналы диаметром до 0,2 мм и глубиной 15 мм. Затем образцы древесины пропитывались в автоклаве. Режимные параметры пропитки определены в соответствии с планом 2-факторного эксперимента: давление 0,2; 0,5 и 0,8 МПа, продолжительность пропитки 30; 225 и 480 мин. Показано, что при пропитке перфорированной древесины окрашивающий раствор в первую очередь проникает через прожженные лазером каналы и в основном продвигается вдоль волокон. В зависимости от продолжительности пропитки и давления краситель проходит от прожженных каналов вдоль волокон на расстояние от 10,9 до 24,6 мм. Поперек волокон краситель проникает незначительно и суммарно в обе стороны от отверстий окрашенные зоны в зависимости от давления и продолжительности пропитки имеют ширину от 1,3 до 1,7 мм. Установлено, что режимные параметры пропитки значительно влияют на размеры окрашенных зон вдоль волокон и в абсолютных значениях мало влияют на поперечное окрашивание. При пропитке перфорированной древесины большее воздействие на размер окрашенных участков древесины из двух изученных факторов оказывает давление. Практически доказана возможность применения разработанной технологии для формирования искусственной текстуры древесины, в том числе имитирующей ценные породы древесины.

Ключевые слова: пихта, пихта сибирская, *Abies sibirica*, древесина, лазер, лазерная перфорация, пропитка, автоклавная пропитка, текстура древесины, крашение, декоративные свойства древесины

Для цитирования: Елисеев С.Г., Ермолин В.Н., Дук Д.В. Применение лазерной перфорации для повышения декоративных свойств древесины пихты сибирской (*Abies sibirica*) // Изв. вузов. Лесн. журн. 2023. № 5. С. 151–163. <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-151-163>

Original article

Using Laser Perforation to Enhance Decorative Properties of Siberian Fir (*Abies sibirica*) Wood

Sergey G. Eliseev, Candidate of Engineering; ResearcherID: [ABF-2131-2020](https://orcid.org/0000-0002-7746-0158),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7746-0158>

Vladimir N. Ermolin, Doctor of Engineering, Prof.; ResearcherID: [X-9597-2019](https://orcid.org/0000-0002-2113-4142),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2113-4142>

Danil V. Duk[✉], Laboratory Assistant; ResearcherID: [AIF-4170-2022](https://orcid.org/0000-0001-9821-0927),

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9821-0927>

Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarskiy Rabochiy Ave., 31, Krasnoyarsk, 660037, Russian Federation; vnermolin@yandex.ru, s-555s@yandex.ru, danil2111991er@mail.ru[✉]

Received on July 29, 2022 / Approved after reviewing on October 27, 2022 / Accepted on November 2, 2022

Abstract. This paper presents research into the possibilities of using laser perforation to enhance the decorative properties of Siberian fir (*Abies sibirica*) wood. Fir wood is characterized by fairly modest physical and mechanical properties and featureless appearance, which is why it is in low demand. With enhanced decorative properties, fir wood could find its use in the production of finish materials. The literature review reveals that the existing wood dyeing technologies are not really effective for the hard-to-impregnate fir wood. Therefore, laser perforation was used to achieve higher wood impregnation and its controlled coloring to form the texture. The study also explored the features of dyeing laser-perforated fir wood, depending on the set parameters of impregnation and wood structure. To do so, the fir samples (with the size of 165×65×32 mm) were laser perforated to form slots up to 0.2 mm in diameter and 15 mm deep. Then the samples were impregnated in an autoclave. The set parameters were determined in accordance with the two-factor experiment schedule: the pressure standing at 0.2, 0.5 and 0.8 MPa, with the impregnation time of 30, 225 and 480 min. The study showed that when perforated wood is impregnated, the dyeing solution penetrates the laser-cut slots first and mainly spreads along the wood fibers. Depending on the impregnation time and pressure applied, the dye moves from the perforated slots along the wood fibers covering a distance of 10.9 mm to 24.6 mm. The dye does not spread as well across the fibers, only coloring a total width of 1.3 to 1.7 mm both ways from the slot depending on applied pressure and time of impregnation. It was found that, first and foremost, the set parameters affect the size of colored areas along the wood fibers and make little difference to lateral coloring in absolute values. Pressure applied to perforated wood during impregnation was determined to have the biggest impact on the size of colored areas. The study proves it possible to use the developed technology in forming artificial wood textures, including those that imitate valuable wood species.



Keywords: fir, Siberian fir, *Abies sibirica*, wood, laser, laser perforation, impregnation, autoclave impregnation, wood texture, dyeing, wood decorative properties

For citation: Eliseev S.G., Ermolin V.N., Duk D.V. Using Laser Perforation to Enhance Decorative Properties of Siberian Fir (*Abies sibirica*) Wood. *Lesnoy Zhurnal* = Russian Forestry Journal, 2023, no. 5, pp. 151–163. (In Russ.). <https://doi.org/10.37482/0536-1036-2023-5-151-163>

Введение

Пихта сибирская (*Abies sibirica*) является одной из широко распространенных лесообразующих пород в Сибирском федеральном округе. Только на территории Красноярского края (по данным лесного плана) пихтовые леса занимают площадь 5770,8 тыс. га (7,3 % площади хвойных в регионе) с общим запасом древесины 972,895 млн м³ (10,2 % запаса хвойной древесины в регионе). В отличие от востребованных на внешнем и внутреннем рынках хвойных пород, таких как сосна, лиственница и ель, пихтовая древесина имеет весьма ограниченный спрос. Это в первую очередь объясняется относительно низкими физико-механическими свойствами древесины данной породы, а также ее невыразительным внешним видом.

Одним из путей расширения сфер использования пихтовой древесины может стать ее применение в производстве декоративных и отделочных материалов, где, как правило, внешний вид древесины ценится больше, чем высокие физико-механические свойства. Однако в естественном виде древесина пихты мало подходит для указанной цели, поскольку имеет светлую окраску и невыразительную текстуру. Без существенных изменений внешнего вида пихтовой древесины трудно представить ее применение в производстве изделий, в которых важны декоративные свойства древесины.

Декоративные свойства древесины зависят от таких физических показателей, как цвет и текстура. Древесина ценных пород в большинстве случаев имеет насыщенную окраску и контрастные по цвету элементы строения, формирующие выраженную текстуру. При этом древесина основных лесообразующих пород, произрастающих в северных и умеренных широтах (в том числе и пихта), в естественном виде не отличается высокими декоративными свойствами. Поэтому такая древесина низко ценится или практически не используется в производстве товаров, к которым предъявляются повышенные эстетические требования [20].

В настоящее время существует большое количество методов окрашивания и проявления естественной или формирования искусственной текстуры древесины. С учетом принципиальных особенностей их можно условно разделить на поверхностное и глубокое крашение древесины. При поверхностном крашении имеется возможность не только изменять цвет древесины, но и проявлять ее естественную текстуру за счет различной пористости ранней и поздней зон годичного слоя и формирования «эффекта негатива». Также текстура на поверхности древесины может формироваться и за счет нанесения красителя различными способами печати. В целом методы поверхностного облагораживания древесины, как правило, достаточно технологичны и производительны, но не всегда обеспечивают естественный внешний вид окрашенного материала, а

верхний слой может легко стираться и повреждаться в процессе эксплуатации. Кроме того, при поверхностном крашении заготовки не могут подвергаться дальнейшей механической обработке, а в изделиях обновляться путем шлифования или циклевания [5, 11, 18, 22, 24].

Указанных выше недостатков лишены изделия из глубоко окрашенной древесины. Глубокое крашение древесины производят при помощи красителя в автоклаве при избыточном давлении, такой вид пропитки даже бывает сквозным. При этом в ходе пропитки древесине придают не только желаемый цвет, но и за счет неравномерного распределения проводящих капилляров, по которым проникает окрашивающая жидкость, проявляют ее естественную текстуру [5, 7–10, 14, 15, 17–19].

При всех преимуществах возможности окрашивания за счет автоклавной пропитки древесины красителем без ее специальной подготовки имеется ряд ограничений. Формируемая таким способом текстура в большинстве случаев ограничивается зонами годичного слоя, что не позволяет создавать более сложные и разнообразные рисунки. Кроме того, автоклавная пропитка подходит только для хорошо пропитываемых заболонных пород. Ядровые и спелодревесные породы в соответствии с ГОСТ 20022.2–80 относятся к труднопропитываемым. При автоклавной пропитке такой древесины глубина продвижения пропиточного раствора весьма ограничена и в зависимости от породы составляет не более 2–5 мм поперек волокон и 200–300 мм вдоль волокон [7].

В настоящее время разработан целый ряд способов избирательного окрашивания древесины, позволяющих не только проявить естественную текстуру древесины, но и с учетом технических ограничений сформировать искусственную [1–3, 12, 13, 18]. Перечисленные способы крашения по большей части не получили распространения ввиду низкой технологичности, ограниченных возможностей по формированию различных текстур, а также практически неприменимы для труднопропитываемой древесины.

Из проведенного анализа литературных данных мы видим, что определяющим фактором при глубоком крашении труднопропитываемой древесины выступает ее проницаемость. Поэтому было принято решение подойти к проблеме глубокого крашения пихтовой древесины с позиции повышения ее проницаемости.

Существует широкий спектр методов повышения проницаемости древесного сырья: путем накалывания [4], использования переменного давления [7], предварительного заражения древоокрашивающими грибами [4], повышения температуры [9], обработки сверхвысокими частотами [23, 25, 26, 30, 32] или ультразвуком [21] и т. д. Большинство из перечисленных методов не получили распространения, поскольку нарушают целостность древесины, энергозатратны, технически сложны при реализации в промышленных условиях, имеют неприемлемо длительную продолжительность процесса и др., что является серьезными недостатками.

Из рассмотренных вариантов повышения проницаемости древесины наибольший интерес вызывает метод с использованием лазера. В ходе исследований [27–29, 31, 33] изучалась возможность применения лазерного луча для создания каналов, позволяющих повысить проницаемость древесины. Исследователями было установлено, что в результате обработки CO₂-лазером лигнин и целлюлоза разлагаются при мгновенном росте температуры из-за излучения мощного

инфракрасного света. В результате изменяется пористая структура древесины. Глубокие отверстия, образованные лазерным лучом, формируют каналы, обеспечивающие введение пропиточной жидкости в глубь заготовок, и количество поглощаемой жидкости увеличивается. Данный метод позволяет достичь сквозного проникновения пропиточного раствора на всю толщину заготовки. А глубина прожигаемых каналов может достигать 100 мм и более.

Из представленных в работах [27–29, 31, 33] данных следует, что прожигаемые лазером в древесине каналы позволяют повысить ее проницаемость на отдельных локальных участках. Поэтому для равномерного пропитывания заготовок раствором прожигаемые отверстия размещают по схеме, способствующей смыканию фронтов пропитки.

С учетом указанной информации было выдвинуто предположение, что особенности локализации пропиточного раствора в древесине и малый диаметр прожигаемых отверстий – до 0,2 мм – могут иметь хороший потенциал для формирования искусственной текстуры древесины. Предложено создавать текстуру древесины за счет чередования окрашенных и неокрашенных зон, а разнообразие рисунков обеспечить разными схемами размещения отверстий. Для подтверждения выдвинутого предположения проведены предварительные исследования, которые доказали принципиальную возможность использования лазерной перфорации для избирательного окрашивания древесины [6, 16].

В целях дальнейшего изучения применимости данной технологии для формирования искусственной текстуры древесины пихты сибирской было принято решение провести исследования, направленные на анализ влияния параметров автоклавной пропитки на особенности локализации красителя в древесине.

Объекты и методы исследования

На 1-м этапе работ требовалось установить особенности распространения фронтов окрашивающего состава в пихтовой древесине в зависимости от давления и продолжительности пропитки. С этой целью из древесины пихты сибирской влажностью 9 % были изготовлены образцы размерами 165×65×32 мм (длина вдоль волокон×ширина×толщина). В полученных образцах при помощи лазерного луча последовательно в шахматном порядке прожигались отверстия диаметром до 0,2 мм на расстоянии друг от друга поперек волокон 10 мм и вдоль волокон 20 мм (рис. 1). Расстояние между отверстиями было определено исходя из полученных ранее предварительных экспериментальных данных с учетом необходимости обеспечения несмыкания фронтов пропитки древесины. Глубина прожигаемых отверстий составляла 15 мм. Продолжительность лазерного импульса – 0,25 с на одно отверстие. В каждом образце прожжено 45 отверстий.

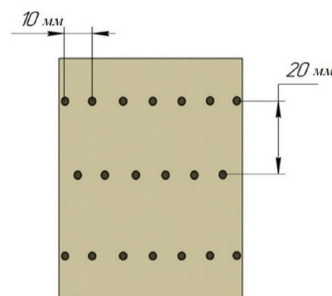


Рис 1. Схема размещения прожигаемых каналов в образцах древесины

Fig. 1. Pattern of laser-cut slots in wood samples

После лазерной перфорации заготовки помещались в автоклав, где при варьируемом избыточном давлении (0,2; 0,5; 0,8 МПа) пропитывались 3%-м водным раствором красителя «Совелан коричневый М». Продолжительность опытных пропиток составляла: 30, 255 и 480 мин. Перед пропитыванием торцы образцов были подвергнуты гидроизоляции в целях предотвращения проникновения пропиточного раствора вдоль волокон через поперечный разрез древесины. Режимные параметры пропитки были определены в соответствии с планом 2-факторного эксперимента.

После пропитки для перераспределения красителя образцы выдерживались 24 ч при нормальных условиях. Затем они помещались в сушильный шкаф, где высушивались до влажности 9 ± 3 %.

Для проявления фронтов пропитки высушенные образцы строгались на рейсмусовом станке на глубину 2 мм. После этого при помощи микроскопа МБС-10, оснащенного камерой Scopetek DCM-310, с использованием программного обеспечения ScorePhoto производилось измерение длины и ширины фронта пропитки с точностью до 0,1 мм.

Результаты исследования и их обсуждение

После пропитывания, высушивания и снятия верхнего окрашенного слоя образцы перфорированной древесины пихты имели четко выраженные локально окрашенные участки (рис. 2).

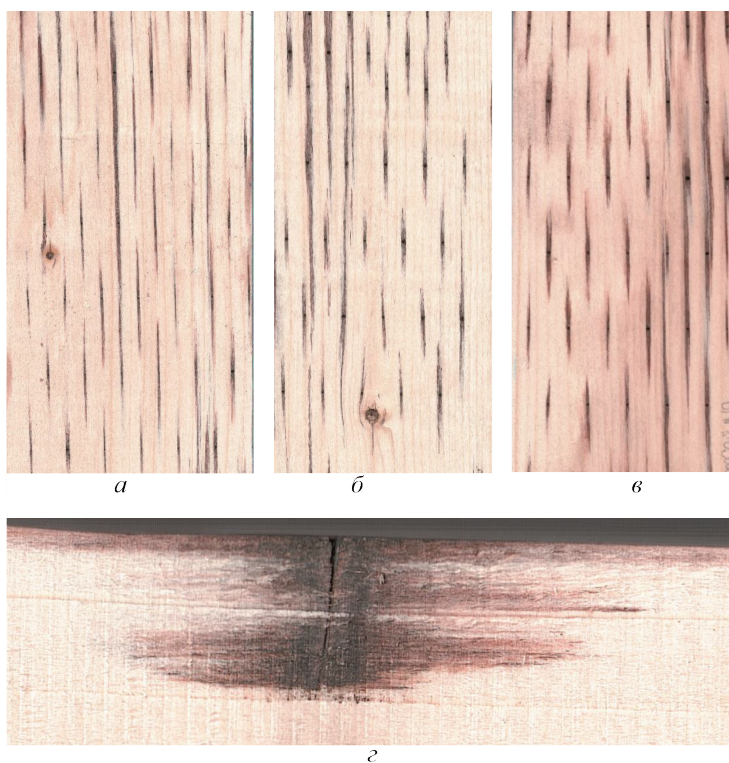


Рис. 2. Локальное окрашивание древесины пихты, перфорированной лазером: *а, б, в* – на пласти при давлении 0,2; 0,5 и 0,8 МПа соответственно; *г* – на радиальном разрезе

Fig. 2. Localized dyeing of laser-perforated fir wood: *a, b, v* – on the face under the pressure of 0.2, 0.5 and 0.8 MPa, accordingly; *z* – on the radial cut

При рассмотрении особенностей локализации красителя видно, что в процессе пропитки окрашивающий раствор проникал в заготовки сначала через прожженные в древесине отверстия, а затем перераспределялся преимущественно вдоль волокон и незначительно поперек волокон. В образцах древесины, пропитанных при высоком давлении, была отмечена бóльшая интенсивность окрашивания древесины, но по мере приближения к границе пропитанной зоны наблюдалось постепенное снижение насыщенности цвета. Образцы, пропитанные при давлении 0,2 МПа, имели более однородные по цвету локально окрашенные участки.

Результаты измерений окрашенных участков древесины вдоль волокон, представленные в табл. 1, позволили выявить следующие особенности. Максимальное продвижение фронта пропитки наблюдалось вдоль волокон при продолжительности пропитки 480 мин. При одинаковой длительности пропитки наибольшую протяженность окрашенные участки имели в образцах, пропитанных при давлении 0,8 МПа. С уменьшением давления пропитывания отмечалось и снижение размера окрашенной зоны. Наименьшая разница по длине пропитанных участков при различном давлении наблюдалась в первые 30 мин пропитки. Причем за 30 мин вне зависимости от давления пропитывалось более чем 50 % от общей длины окрашенного участка. В дальнейшем прирост фронтов пропитки предсказуемо замедлялся, и к 480 мин окрашенная зона увеличивалась примерно в 2 раза. Наибольшая разница по длине пропитанных зон наблюдалась при 255-минутной пропитке, а к 480 мин различие между вариантами пропитки уменьшалось. Наиболее низкая протяженность фронта пропитки вдоль волокон практически во всех случаях характерна для образцов, пропитанных при давлении 0,2 МПа. Образцы, пропитанные при давлении 0,8 МПа, превышали их по длине окрашенных участков на 31,0–81,5 %, а при 0,5 МПа – на 11,7–36,1 %. При сравнении образцов, пропитанных при давлении 0,8 и 0,5 МПа, обнаружено, что образцы, подвергнутые действию более высокого давления, имели пропитанные области больше в среднем на 6,9–33,5 %. Также необходимо отметить, что вне зависимости от режимных параметров пропитки при попадании прожигаемого участка в позднюю зону годичного слоя происходило увеличение протяженности окрашенной зоны до 1,5–2 раз в сравнении с ранней.

Таблица 1

Продвижение фронта пропитки вдоль волокон древесины пихты
Advancement of the impregnation front along the fibers

| Давление, МПа | Продолжительность пропитки, мин | Длина окрашенных участков, мм |
|---------------|---------------------------------|-------------------------------|
| 0,2 | 30 | 10,9±4,20 |
| | 255 | 12,9±4,14 |
| | 480 | 16,9±3,72 |
| 0,5 | 30 | 12,2±5,28 |
| | 255 | 17,6±6,09 |
| | 480 | 23,0±9,17 |
| 0,8 | 30 | 14,3±5,90 |
| | 255 | 23,5±9,80 |
| | 480 | 24,6±6,99 |

Помимо протяженности фронта пропитки вдоль волокон в ходе исследований фиксировалась и ширина пропитанной зоны. Поскольку размер окрашенных участков поперек волокон был небольшим и часто они имели эксцентричное размещение, то измерение ширины производилось суммарно по обе стороны отверстий. Результаты измерений фронтов пропитки поперек волокон представлены в табл. 2.

Таблица 2

Продвижение фронта пропитки поперек волокон древесины пихты
Advancement of the impregnation front across the fibers

| Давление, МПа | Продолжительность пропитки, мин | Ширина окрашенных участков, мм |
|---------------|---------------------------------|--------------------------------|
| 0,2 | 30 | 1,20±0,06 |
| | 255 | 1,32±0,03 |
| | 480 | 1,72±0,08 |
| 0,5 | 30 | 1,39±0,07 |
| | 255 | 1,49±0,06 |
| | 480 | 1,73±0,08 |
| 0,8 | 30 | 1,41±0,04 |
| | 255 | 1,60±0,04 |
| | 480 | 1,72±0,05 |

Из данных табл. 2 мы видим, что в зависимости от параметров давления и продолжительности пропитки ширина фронта пропитки варьировала следующим образом. Наименьшее продвижение пропиточного раствора было отмечено при 0,2 МПа. В сравнении с 0,5 и 0,8 МПа при 30-минутной пропитке показатели были ниже на 13,7–14,9 %, а при 255-минутной – на 11,4–17,5 %. При пропитке древесины в течение 480 мин вне зависимости от давления ширина пропитанной зоны была примерно одинаковой – 1,7 мм. Наибольшее продвижение фронта пропитки поперек волокон было зафиксировано при продолжительности пропитки 480 мин. Несмотря на существенную относительную разницу по ряду испытаний, в целом абсолютные значения продвижения фронта пропитки поперек волокон оказались незначительными – в пределах 1,2–1,7 мм, что в 10–14 раз меньше размеров пропитанных участков вдоль волокон (см. табл. 1).

Учитывая полученные результаты по пропитываемости древесины пихты вдоль и поперек волокон, был сделан промежуточный вывод, что режимные параметры пропитки в первую очередь влияют на размеры окрашенных зон вдоль волокон. В целях выявления влияния варьируемых факторов (табл. 3) при автоклавной пропитке перфорированной древесины пихты на продвижение фронта пропитки вдоль волокон была построена диаграмма Парето (рис. 3).

Таблица 3

Варьирование факторов автоклавной пропитки

Levels of variation of factors

| Фактор | Обозначение | Уровни варьирования | | |
|---------------------------------|-------------|---------------------|-----|-----|
| | | -1 | 0 | 1 |
| Давление, МПа | А | 0,2 | 0,5 | 0,8 |
| Продолжительность пропитки, мин | В | 30 | 255 | 480 |

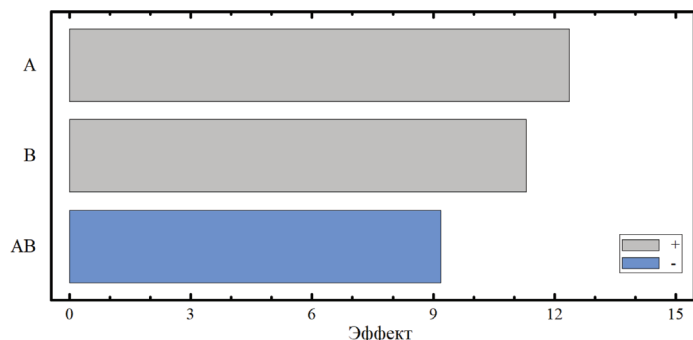


Рис. 3. Уровень влияния факторов на продвижение фронта пропитки вдоль волокон (обозначения – см. табл. 3)

Fig. 3. Level of influence of various factors on impregnation front advancement along fibers (signs – look at Table 3)

Из рис. 3 мы видим, что наибольшее влияние на продвижение пропиточного раствора вдоль волокон оказывает применяемое избыточное давление, в то время как длительность пропитки имеет несколько меньшее значение.

С учетом полученных зависимостей для апробации разрабатываемой технологии было решено изготовить образцы древесины с искусственной текстурой. В качестве прототипа выступила текстура древесины «Зебрано», пользующаяся большой популярностью при производстве мебели и отделочных материалов. В заготовках из древесины пихты прожигались отверстия глубиной 15 мм. Расстояние между отверстиями определялось по исходному образцу текстуры «Зебрано» с использованием полученных зависимостей распространения фронтов пропитки, расстояние обеспечивало их разделение или смыкание. Пропитка осуществлялась в автоклаве при избыточном давлении 0,8 МПа в течение 480 мин. После высушивания и снятия 2 мм верхнего окрашенного слоя производилось сравнение полученных образцов с образцом натуральной древесины. Из рис. 4 мы видим, что перфорированная окрашенная древесина пихты получила текстуру, имеющую схожий вид с оригинальным «Зебрано».

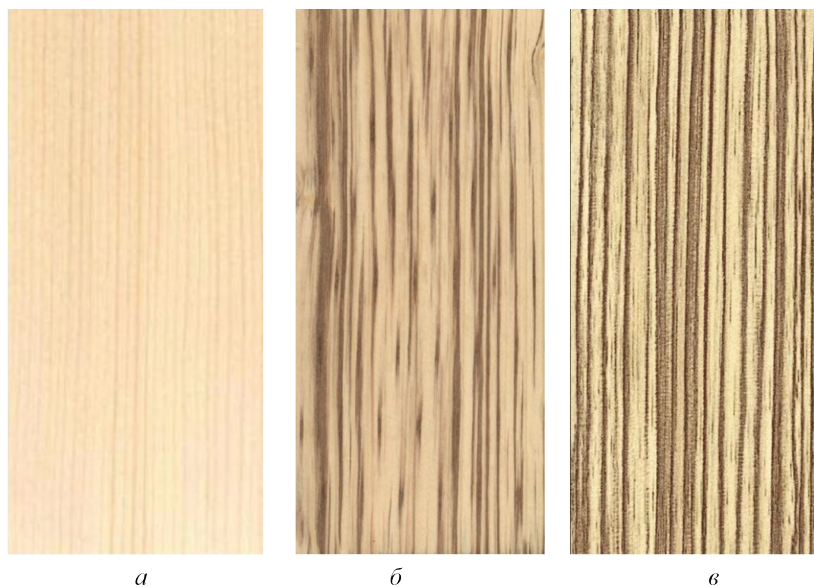


Рис. 4. Внешний вид древесины: *a* – древесина пихты; *b* – древесина пихты, перфорированная лазером и окрашенная; *c* – натуральная древесина «Зебрано»

Fig. 4. Wood appearance: *a* – fir wood; *b* – fir wood perforated by laser and colored with dye; *c* – natural Zebrano wood

Выводы

1. Результаты работы свидетельствуют о том, что предлагаемый способ формирования текстуры древесины пихты сибирской за счет ее перфорации лазером с последующей автоклавной пропиткой красителем позволяет эффективно и управляемо окрашивать труднопропитываемую древесину на заданных участках, тем самым формируя искусственную текстуру.

2. Формируемая рассматриваемым способом текстура имеет естественный вид благодаря проявлению при окрашивании естественных неоднородностей древесины.

3. Режимные параметры пропитки перфорированной древесины необходимо определять в зависимости от планируемых размеров окрашиваемых вдоль волокон участков в соответствии с требованиями к конечному результату крашения:

если не нужна высокая точность воспроизведения исходного изображения, допускается (необходима) вариация итоговой текстуры древесины (с учетом естественных особенностей) и требуется обеспечить наименьшее количество прожигаемых отверстий, то следует применять давление – от 0,5 до 0,8 МПа, продолжительность пропитки – от 225 до 480 мин;

для детального воспроизведения типового рисунка рекомендуется давление от 0,2 до 0,8 МПа и продолжительность пропитки не более 30 мин.

4. Из-за различной проницаемости ранней и поздней зон годичного слоя при создании текстур, требующих более высокой точности воспроизведения заданного рисунка, необходимо использовать заготовки тангенциального раскроя.

5. Финишная отделка перфорированной и окрашенной пихтовой древесины позволяет сделать прожженные лазером отверстия практически незаметными для невооруженного глаза.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ / REFERENCES

1. А. с. 54011 А1 СССР, МПК В05D 7/06 (1995.01), В27К 5/02 (1995.01). Способ улучшения текстуры древесины: № 693: заявл. 23.02.1937: опубл. 31.10.1938 / Г.Л. Элькишек.

El'kishek G.L. *Method for Improving the Texture of Wood*. Certificate of Authorship USSR, no. SU 54011, 1938. (In Russ.).

2. А. с. 164108 А1 СССР, МПК В27К 3/10 (1995.01). Устройство для пропитки срубленной древесины: № 829507/29-14: заявл. 06.04.1963: опубл. 30.07.1964 / С.А. Черненко.

Chernenko S.A. *Device for Impregnation of Felled Wood*. Certificate of Authorship USSR, no. SU 164108 А1, 1964. (In Russ.).

3. А. с. 1471988 А1 СССР, МПК А01G 7/06 (2006.01). Способ окрашивания древесины на корню: № 4216231: заявл. 09.02.1987: опубл. 15.04.1989 / Е.Ф. Нагорный.

Nagornyj E.F. *Method of Wood Coloring at the Root*. USSR, no. SU147988 А1, 1989. (In Russ.).

4. Баракс А.М., Никифоров Ю.Н. Пропитка древесины путем применения наколов. М.: Лесн. пром-сть, 1969. 176 с.

Baraks A.M., Nikiforov J.N. *Impregnation of Wood by Application of Pricks*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1969. 176 p. (In Russ.).

5. Беляев Е.Ю., Ермолин В.Н., Мелешико А.В., Соколов В.Л. Крашение древесины (обзор) // Химия раст. сырья. 1999. № 2. С. 5–18.

Belyaev E.J., Ermolin V.N., Meleshko A.V., Sokolov V.L. Wood Dyeing (Overview). *Chemistry of plant raw materials*, 1999, no. 2, pp. 5–18. (In Russ.).

6. Елисеев С.Г., Ермолин В.Н., Дук Д.В. Повышение декоративных свойств древесины пихты сибирской (*Abies sibirica*) // Лесной и химический комплекс–проблемы и решения: сб. материалов по итогам Всерос. науч.-практ. конф., Красноярск, 29 окт. 2021 г. Красноярск, 2022. С. 206–208.

Eliseev S.G., Ermolin V.N., Duk D.V. Increasing the Decorative Properties of Siberian Fir Wood (*Abies sibirica*). *Mezhvuz. Sbor. Lesnoj i himicheskij kompleksy-problemy i resheniya*, Krasnoyarsk, 2022, pp. 206–208. (In Russ.).

7. Ермолин В.Н. Основы повышения проницаемости жидкостями древесины хвойных пород: дис. ... д-ра техн. наук. Красноярск, 2001. 332 с.

Ermolin V.N. *Fundamentals of Increasing the Permeability of Coniferous Wood Liquids*: Doc. Eng. Diss. Krasnoyarsk, 2001. 332 p. (In Russ.).

8. Каргашина Е.В. Исследование влияния насыщенности красителей на пропитываемость древесины // Науч. вестн. МГУ. 2010. № 8. С. 38–40.

Kargashina E.V. The Influence of Saturating Composition to the Penetrating Power of Wood. *Scientific Bulletin of the Moscow State Mining University*, 2010, no. 8, pp. 38–40. (In Russ.).

9. Клупт Ф.Б., Бродоцкий А.И. Глубокая прокраска древесины в автоклавах. М.; Л.: Гослбумиздат, 1958. 68 с.

Klupt F.B., Brodockij A.I. *Deep Staining of Wood in Autoclaves*. Moscow, Leningrad: Goslebumizdat Publ., 1958. 64 p. (In Russ.).

10. Кушнирская М.Ц. Крашение древесины в производстве мебели. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 116 с.

Kushnirskaya M.C. *Wood Dyeing in Furniture Production*. Moscow, Lesnaya promyshlennost' Publ., 1973. 116 p. (In Russ.).

11. Лукаш А.А. Формирование фактуры с ярко выраженной текстурой на поверхности древесины // Актуал. проблемы лесн. комплекса. 2020. № 58. С. 183–187.

Lukash A.A. Formation of a Texture with a Pronounced Grain on the Wood Surface. *Mezhvuz. Sbor. Aktual'nye problemy lesnogo kompleksa*, 2020, no. 58, pp. 183–187. (In Russ.).

12. Патент 2014994 С1 РФ, МПК В27К 3/10 (2006.01). Устройство для пропитки под давлением: № 5009582/05: заявл. 23.08.1991: опубл. 30.06.1994 / В.И. Бычин, А.А. Прошкин.

Buchin V.I., Proshkin A.A. *Pressure Impregnation Device*. Patent RF, no. RU 2014994 C1, 1994. (In Russ.).

13. Патент 2375171 С2 РФ, МПК В27К 5/02 (2006.01). Способ окрашивания круглого лесоматериала: № 2007104971/02: заявл. 09.02.2007: опубл. 10.12.2009 / Э. Липшанс, Я. Маковскис.

Lipshas E., Makovskis Y. *Method for Coloring Round Timber*. Patent RF, no. RU 2375171 C2, 2009. (In Russ.).

14. Патент 2470770 С1 РФ МПК В27К 5/02 (2006.01), В27К 3/08 (2006.01). Способ облагораживания древесины: № 2011128459/13: заявл. 08.07.2011: опубл. 27.12.2012 / В.Л. Соколов, М.А. Баяндин, П.П. Звонарева.

Sokolov V.L., Bayandin M.A., Zvonareva P.P. *Method of Wood Refinement*. Patent RF, no. RU 2470770 C1, 2012. (In Russ.).

15. Патент 2726556 С1 РФ МПК В27К 3/02 (2006.01), В27К 5/04 (2006.01). Способ получения древесины с измененной текстурой: № 2019119572: заявл. 21.06.2019: опубл. 14.07.2020, бюл. № 20 / В.А. Шамаев, Д.А. Паринов, И.Н. Медведев, Е.В. Поздняков, А.М. Волганкин.

Shamaev V.A., Parinov D.A., Medvedev I.N., Pozdnyakov E.V., Volzhankin A.M. *Method of Obtaining Wood with a Modified Texture*. Patent RF, no. RU 2726556 C1, 2020. (In Russ.).

16. Патент 2764696 С1 РФ, МПК В27К 3/08 (2006.01). Способ формирования текстуры древесины: № 2021113108: заявл.: 05.05.2021. опубл.: 19.01.2022 / В.Н. Ермолин, С.Г. Елисеев, Д.В. Дук.

Ermolin V.N., Eliseev S.G., Duk D.V. *Wood Texture Formation Method*. Patent RF, no. RU 2764696 C1, 2022. (In Russ.).

17. Соколов В.Л. Автоклавная технология глубокого крашения древесины хвойных пород: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Красноярск, 2000. 20 с.

Sokolov V.L. *Coniferous Wood Deep Dyeing Autoclave Technology*: Cand. Eng. Diss. Krasnoyarsk, 2000. 20 p. (In Russ.).

18. Трубников Н.А. Разработка технологии улучшения текстуры древесины мягких лиственных пород избирательным окрашиванием и прессованием: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2009. 16 с.

Trubnikov N.A. *Development of Technology for Improving the Texture of Soft Hardwoods by Selective Staining and Pressing*: Cand. Eng. Diss. Voronezh, 2009. 16 p. (In Russ.).

19. Трубников Н.А. Анализ декоративных признаков древесины и модельное исследование изменения текстуры древесины // Лесотехн. журн. 2011. № 3(3). С. 31–37.

Trubnikov N.A. Analysis of Decorative Features of Wood and Model Study of Wood Texture Changes. *Lesotekhnicheskij Zhurnal*, 2011, no. 3, iss. 3, pp. 31–37. (In Russ.).

20. Уголев Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение. М.: МГУЛ, 2007. 351 с.

Ugolev B.N. *Timber Science and Forestry Merchandising*. Moscow, Moskovskij gosudarstvennyj universitet lesa Publ., 2007. 351 p. (In Russ.).

21. Шамаев В.А. Воздействие ультразвукового и импульсного магнитного поля на древесину // Технология и оборудование деревообработки в XXI веке: межвуз. сб. науч. тр. Воронеж: ВГЛТА, 2008. Вып. 4. С 38–44.

Shamaev V.A. The effect of Ultrasonic and Pulsed Magnetic Fields on Wood. *Mezhvuz. Sbor. Tekhnologiya i Oborudovanie Derevoobrabotki v XXI veke*, 2008, no. 4, pp. 38–44. (In Russ.).

22. Шетько С.В., Игнатович Л.В., Гайдук С.С., Чуиков А.С. Применение технологии печати для имитации текстуры ценных пород древесины при производстве мебели // Тр. БГТУ. Сер. 1: Лесн. хоз-во, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2020. № 2(234). С. 217–222.

Shet'ko S.V., Ignatovich L.V., Haiduk S.S., Chuikov A.S. Application of Printing Technology to Imitate the Texture of Precious Wood in the Furniture Production. *Trudy BGTU = Proceedings of BSTU*, 2020, no. 2(234), pp. 217–222. (In Russ.).

23. Dömény J., Koiš V., Dejmal A. Microwave Radiation Effect on Axial Fluid Permeability in False Heartwood of Beech (*Fagus sylvatica* L.). *BioResources*, 2014, vol. 9, no. 1, pp. 372–380. <https://doi.org/10.15376/biores.9.1.372-380>

24. Fukuta S., Nomura M., Ikeda T., Yoshizawa M., Yamasaki M., Sasaki, Y. UV-laser Incisions to Apply Wood-plastic Compositions to Wood Surfaces. *Journal of Wood Science*, 2018, vol. 64, no. 1, pp. 28–35. <https://doi.org/10.2488/jwrs.64.28>

25. He S., Lin L., Fu F., Zhou Y., Fan M. Microwave Treatment for Enhancing the Liquid Permeability of Chinese Fir. *BioResources*, 2014, vol. 9, no. 2, pp. 1924–1938. <https://doi.org/10.15376/biores.9.2.1924-1938>

26. Hong-Hai L., Qing-Wen W., Lin Y., Tao J., YingChun C.A.I. Modification of Larch Wood by Intensive Microwave Irradiation. *Journal of Forestry Research*, 2005, vol. 16, no. 3, pp. 237–240. <https://doi.org/10.1007/BF02856823>

27. Islam M.M., Ando K., Yamauchi H., Kamikawa D., Harada T., Khalil A., Hattori N. Impregnation of Laser Incised Wood of Douglas Fir, and Japanese Cedar by Dipping (Passive Impregnation) in Solutions of Copper Azole (CuAz-B) and a Fire Retardant (PPC). *Wood Research*, 2013, vol. 68, no. 3, pp. 353–360. <https://doi.org/10.1515/hf-2013-0140>

28. Islam M.N., Ando K., Yamauchi H., Kobayashi Y., Hattori N. Comparative Study between Full Cell, and Passive Impregnation Method of Wood Preservation for Laser Incised

Douglas Fir Lumber. *Wood Science and Technology*, 2008, vol. 42, no. 4, pp. 343–350. <https://doi.org/10.1007/s00226-007-0168-z>

29. Islam N., Ando K., Yamauchi H., Hattori N. Effects of Species and Moisture Content on Penetration of Liquid in Laser Incised Lumber by the Passive Impregnation Method. *European Journal of Wood and Wood Products*, 2009, vol. 67, no. 2, pp. 129–133. <https://doi.org/10.1007/s00107-008-0292-y>

30. Li X.J., Lu K.Y., Lin L.Y., Zhou Y.D., Cai Z.Y., Fu F. Fundamental Characteristics of Microwave Explosion Pretreatment of Wood I. Properties of Temperature Development. *Forestry Studies in China*, 2010, vol. 12, no. 1, pp. 9–13. <https://doi.org/10.1007/s11632-010-0004-7>

31. Listyanto T., Ando K., Yamauchi H., Hattori N. Microwave and Steam Injection Drying of CO₂ Laser Incised Sugi Lumber. *Journal of Wood Science*, 2013, vol. 59, no. 4, pp. 282–289. <https://doi.org/10.1007/s10086-013-1331-9>

32. Terziev N., Daniel G., Torgovnikov G., Vinden P. Effect of Microwave Treatment on the Wood Structure of Norway Spruce and Radiata Pine. *BioResources*, 2020, vol. 15, no. 3, pp. 5616–5626. <https://doi.org/10.15376/biores.15.3.5616-5626>

33. Wang Y., Ando K., Hattori N. Changes in the Anatomy of Surface and Liquid Uptake of Wood after Laser Incising. *Wood Science and Technology*, 2013, vol. 47, no. 3, pp. 447–455. <https://doi.org/10.1007/s00226-012-0497-4>

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов
Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest