

УДК 621.373.826

DOI 10.22213/2413-1172-2017-4-31-37

В. А. Алексеев, доктор технических наук, профессор, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова**А. В. Усольцева**, соискатель, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова**В. П. Усольцев**, кандидат технических наук, ИжГТУ имени М. Т. Калашникова

ИССЛЕДОВАНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТИ ОБУГЛИВАЕМЫХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКЕ

В современном производстве качество продукции обеспечивается выполнением соответствующих требований к качеству составляющих, точности выполнения технических условий, соблюдения технологических режимов, обеспечения заданных размеров, отклонений от формы, взаимного расположения, состояния обработанных поверхностей.

Повышение качества поверхностного слоя является актуальной проблемой технологии, решение которой требует опережающего подхода в условиях быстрого технического развития и рыночной экономики, породившей острую конкуренцию среди производителей. Рассматривая поверхность материала как границу между материалом и окружающей средой, состояние поверхности можно представить моделью поверхности, содержащей множество параметров (шероховатость, волнистость, пористость, фактура, рельеф, твердость и т. д.), связанной с природой материала и условиями образования поверхности, полученной после обработки. Применяемые ранее широко распространенные технологии нанесения изображений на плоские поверхности художественно-промышленных изделий (гравирование, маркирование, чеканка, ударная набивка, клеймение и т. д.) не обеспечивали высокой производительности и качества, в том числе факсимильного (разрешающей способности, воспроизведения полутонов, опознаваемости знаков и др.). В настоящее время наиболее распространена обработка поверхности (гравирование и т. д.) на фрезерных станках с ЧПУ, имеющих традиционное векторное управление. Однако в этом случае производительность процесса остается низкой, а управляющая программа является сложной и большой по объему. Одной из новых технологий, которая может обеспечить высокую производительность при резком уменьшении объема управляющей программы, является лазерное компьютерное станочное растровое гравирование плоских изделий [1].

Для этого применяются лазерные гравировально-резательные станки с летающей оптикой и формированием изображения на изделии растровым методом. Все эти станки являются двухкоординатными, а третья координата в лучшем случае воспроизводится как пассивная следящая система, т. е. третья координата неуправляема и определяется энерговременными параметрами лазерного излучения. Точка контакта лазерного луча с поверхностью материала подвергается быстрому изменению в зависимости глубины поверхностной обработки, вследствие чего происходит расфокусирование излучения и теряется качество обработки поверхности.

Большинство воздействий лазерного луча на материалы связано с нагревом материала до температуры фазового изменения. В этом случае оптимальной длиной волны излучения является, исходя из закона Вина, длина волны максимального значения кривой Планка для данной температуры. По закону Кирхгофа эта длина волны максимума излучения и максимума поглощения.

В промышленном производстве используются различные материалы; одними из наиболее распространенных, используемых во многих сферах с учетом эстетической и экологической точек зрения в первую очередь выделяются натуральные материалы. В процессе термического воздействия эти материалы подвергается обугливанию – процессу изменения органических остатков, сопровождающемуся их почернением, уменьшением содержания водорода и кислорода и увеличением углерода. Основными из таких материалов являются древесина, натуральная кожа, кость, органическое стекло. В производстве наибольшее распространение получила древесина – данный материал используется в производстве более чем двадцати тысяч видов товаров. При изготовлении художественно-промышленных изделий художественные изделия из дерева составляют 17 %, из кости – 3 %, из кожи – 2 % от всех художественных изделий [2].

Тем не менее для поверхностной обработки материалов с обугливанием лазерное излучение применяется недостаточно широко из-за отсутствия апробированных методик, наличия дополнительных требований по эстетическим свойствам, таким как форма, рисунок, фактура, цвет. Ряд теоретических и практических вопросов остаются недостаточно изученными. Действующие нормативные документы опускают процедурные вопросы, связанные с организацией и проведением объективной оценки качества поверхности при обработке органических материалов. Различное толкование терминов при производстве художественно-промышленных изделий вносит дополнительную путаницу и имеет весьма серьезные последствия, сдерживающие широкое применение лазерных технологий для обработки органических материалов. Использование нормативных документов из смежных областей промышленности, в частности полутонного клина, предназначенного для испытания факсимильной аппаратуры типа 2, подгруппы 1 по ГОСТ 12922–77, хотя она и совместима программно и аппаратно с лазерными установками, не всегда обосновано из-за возникновения дополнительных трудностей в реализации.

Центральное место в лазерной поверхностной обработке занимают физико-химические процессы. Параметры физико-химических процессов находятся в прямой зависимости от характеристик лазерного луча как инструмента, свойств обрабатываемого материала, условий взаимодействия лазерного излучения с материалом. Процессы лазерной поверхностной обработки являются многофакторными и многокритериальными. Управлять процессом, меняя все факторы, невозможно. Поэтому из всех названных факторов выделены основные, которые названы управляющими. К таким факторам относятся:

- мощность лазерного излучения (энергия лазерного излучения, частота следования импульсов, длительность импульса, форма импульса);
- время облучения (непрерывное излучение – скорость обработки, импульсное излучение – частота и длительность импульса);
- диаметр пятна фокусирования;
- распределение мощности по облучаемой поверхности.

При использовании систем управления пространственным перемещением лазерного луча для получения максимальной передачи энергии излучения появляется еще ряд управляющих параметров:

- закон пространственного перемещения лазерного луча;
- частота импульсов управления;
- амплитуда управляющего импульса;
- поглощательная способность материала;
- угол падения лазерного излучения на материал.

Все остальные факторы необходимо учитывать при разработке конкретного технологического процесса. Для этого надо их измерять, знать закономерности их изменения в различных условиях. При этом возможны различные алгоритмы управления. Основой системы управления являются математические модели (статистические), отражающие функциональные связи параметров поверхности с параметрами лазерного нагрева, параметрами лазерного луча, условий обработки и материала. На базе математических моделей, задаваясь значениями ограничивающих факторов (диапазона глубин поверхностного слоя, диапазона проникновения лазерного излучения, диапазона отклонений глубин, шероховатости поверхности и т. д.), производится расчет основных управляющих технологических параметров и осуществляется корректировка параметров лазерного излучения.

Качество поверхностного слоя при лазерной обработке, как и при других видах обработки, характеризуется шероховатостью обрабатываемой поверхности и состоянием материала поверхностного слоя. Шероховатость поверхности определяется высотой и формой микронеровностей, а состояние материала – его физико-химическими изменениями, микроструктурой и остаточными напряжениями. В процессе статистических исследований определяется глубина причинно-следственной связи между явлениями, что позволяет выявить факторы, оказывающие основное влияние на вариацию изучаемых явлений и процессов.

С использованием метода корреляционно-регрессионного анализа связь качества поверхностного слоя с технологическими параметрами лазерной обработки можно выразить аналитически:

$$R_m(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = \varphi[R_j(Y_1, Y_2, \dots, Y_j)], \quad (1)$$

где R_m – параметры качества поверхностного слоя; R_j – параметры режимов лазерного гравирования; Q_1, Q_2, \dots, Q_m – виды параметров качества поверхностного слоя; Y_1, Y_2, \dots, Y_j – уровни режимов лазерного гравирования; m – количество параметров качества поверхностно-

го слоя; j – количество уровней режимов лазерного гравирования; φ – функция, связывающая физические параметры лазера, определяющие воздействие квантовой энергии на материал, и показатели качества поверхностного слоя при лазерной обработке.

Взаимодействие лазерного излучения с веществом адекватно описывается тепловой моделью, согласно которой количество энергии, требуемой для обработки излучением лазера, существенно зависит от оптических свойств материалов. Основными физическими параметрами лазера, определяющими воздействие квантовой энергии на ту или иную мишень, являются длина генерируемой волны, плотность потока энергии, время воздействия и угол падения лазерного луча.

Связь между режимами лазерного гравирования и оптическими свойствами материала в общем случае можно описать следующим выражением:

$$R_j(Y_1, Y_2, \dots, Y_j) = f[R_i(X_1, X_2, \dots, X_i)], \quad (2)$$

где R_j – параметры режимов лазерного гравирования; R_i – изменения параметров оптической свойств материала; X_1, X_2, \dots, X_i – виды оптических свойств материала; Y_1, Y_2, \dots, Y_j – уровни режимов лазерного гравирования; i – количество оптических свойств материала; j – количество уровней режимов лазерного гравирования; f – функция, связывающая физические параметры лазера, определяющие воздействие квантовой энергии на материал, и оптические свойства материала, учитывающие микроструктуру, химический состав и физико-механические характеристики.

Часто необходимо проводить лазерную обработку поверхности готового изделия, когда конкретные характеристики материала, из которого оно изготовлено, неизвестны. Анализ влияющих факторов на оптические свойства материала свидетельствует, что на светопропускание влияют отклонение толщины в партии аналогичных изделий (от 5 до 30 %), склонность к поверхностным повреждениям из-за отклонения твердости (до 5 %), появление внутренних напряжений при формовке, что ведет к последующему появлению микротрещин, большая чувствительность к концентрации напряжений. Это определяет отклонения плотности, твердости, теплостойкости, теплопроводности, электропроводности, вязкости, теплоемкости и т. д., которые в каждом случае становятся случайной

величиной, из-за чего оптические свойства материала в конкретном случае применения становятся случайной функцией. Существование корреляционных связей между оптическими свойствами материала и микроструктурой, химическим составом и физико-механическими характеристиками стекла можно представить выражением

$$R_i(X_1, X_2, \dots, X_i) = \eta(Z_1, Z_2, \dots, Z_k), \quad (3)$$

где R_i – изменения параметров оптических свойств материала; X_1, X_2, \dots, X_i – виды оптических свойств материала; i – количество оптических свойств материала; Z_1, Z_2, \dots, Z_k – характеристики микроструктуры, химического состава и физико-механических свойств материала; k – количество характеристик микроструктуры, химического состава и физико-механических свойств материала; η – функция, связывающая параметры оптических свойств материала и характеристики микроструктуры, химического состава и физико-механических свойств материала.

Выражения (1)–(3) можно привести к виду

$$R_m(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = \varphi\{f[\eta(Z_1, Z_2, \dots, Z_k)]\}. \quad (4)$$

Заменив функциональные зависимости φ, f, η обобщенной корреляционной функцией ψ , выражение (4) можно привести к виду

$$R_m(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = \psi(Z_1, Z_2, \dots, Z_k).$$

С использованием выражений, приведенных в [3], описывающих взаимодействие лазерного излучения с материалом, если лазерный луч имеет гауссов профиль, а плотность поглощенного на поверхности потока энергии постоянна и равна F_0 , распределение температуры в твердом материале и ее изменение во времени описывается выражением

$$T(r, z, t) = \frac{d^2 \chi^{1/2} F_0}{K \pi^{1/2}} \times \int_0^t \frac{\exp\left(\frac{-z^2}{4\chi t}\right) \exp\left[\frac{-r^2}{4\chi t + d^2}\right]}{t^{1/2} (4\chi t + d^2)} dt + T_0, \quad (5)$$

где F_0 – плотность потока энергии, поглощенного на поверхности, Вт/м²; r – расстояние от центра нагреваемого пятна, м; z – глубина нагрева, отсчитываемая от поверхности, м; T – температура, К; χ – температуропроводность, м²/с; K – теплопроводность, Вт/(м·К); t – временной ин-

тервал от начала воздействия лазерного излучения, с; d – диаметр лазерного луча на поверхности материала, м.

Для определения температуры в материале при одинаковых и фиксированных расстояниях от центра нагреваемого пятна и глубины нагрева, отсчитываемой от поверхности, вычисление интеграла, в подынтегральное выражение которого входит показательная функция, используя для интегрирования способ сведения с помощью замены переменной к интегралу, содержащему степенную и алгебраическую функции, выражение (1) преобразуем к виду

$$T(t) = \frac{F_0 d}{K \pi^{1/2}} \operatorname{ctg} \left(\frac{4\chi t}{d^2} \right)^{1/2}. \quad (6)$$

В результате разложения тригонометрической функции $\operatorname{ctg}(x)$ в ряд и использования трех первых членов ряда, что вносит погрешность менее 5 %, но существенно упрощает вычисления, получено выражение

$$T(t) = \frac{F_0 d}{K \pi^{1/2}} \left[\left(\frac{4\chi t}{d^2} \right)^{1/2} - \frac{\left(\frac{4\chi t}{d^2} \right)^{3/2}}{3} + \frac{\left(\frac{4\chi t}{d^2} \right)^{5/2}}{5} \right]. \quad (7)$$

Используя соотношение для описания зависимости между основными параметрами излучения и материала, получим выражение для определения глубины проникновения излучения в материал:

$$h = \frac{4P}{C_p \rho T \pi d^2}, \quad (8)$$

где P – мощность излучения, Вт; C_p – теплоемкость материала, Дж/К; ρ – плотность материала, кг/м³; h – глубина проникновения излучения в материал, м; d – диаметр лазерного луча на поверхности материала, м; $T(t)$ – изменение температуры материала при нагреве, К.

Учитывая, что температуропроводность неметаллических материалов порядка 10^{-8} м²/с, в выражении (7) можно ограничиться первым членом ряда, и, подставив (7) в выражение (8), получим

$$h = \frac{2PK}{C_p \rho F_0 d \pi^{1/2} \chi^{1/2} t^{1/2}}; \quad (9)$$

обозначив $\frac{2K}{C_p \rho F_0 d \pi^{1/2} t^{1/2}}$ как γ , получим

$$h = \frac{\gamma P}{\chi^{1/2}}. \quad (10)$$

Это свидетельствует, что температуропроводность как физическая величина, характеризующая скорость изменения температуры материала в неравновесных тепловых процессах, позволяет комплексно учесть нелинейное изменение термических свойств материалов, вызванных изменением физических, механических, химических, эстетических свойств материалов из-за неоднородности микроструктуры, вызванной объемной неопределенностью и многовариантностью реализаций характеристик используемого материала. Выделение комплексного показателя значительно упрощает выбор параметров лазерного излучения.

В результате математических расчетов, анализа и экспертного опроса определено, что для получения наиболее четкого и контрастного изображения необходима глубина проникновения лазерного излучения в материал на 0,3-0,5 мм.

Для имитационного моделирования была использована обобщенная вероятностная математическая модель изменения коэффициента пропускания в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра. Любую случайную функцию можно центрировать, т. е. привести к такому виду, когда ее математическое ожидание равно нулю. Поэтому в дальнейшем будут рассматриваться только центрированные элементарные случайные функции.

Используя метод канонических разложений, случайную функцию предварительно представим в виде суммы так называемых элементарных случайных функций

$$W(x) = V\beta(x), \quad (11)$$

где $W(x)$ – случайная функция; V – обычная случайная величина; $\beta(x)$ – обычная (неслучайная) функция.

Приняв, что отклонения плотности, твердости, теплостойкости, теплопроводности, вязкости, теплоемкости, температуры горения имеют нормальное (или гауссово) распределение, проведем моделирование нормальной случайной величины на основе центральной предельной теоремы

$$V = \mu + \sigma \left(\sum_{i=1}^{12} P_i - 6 \right), \quad (12)$$

где μ – среднее нормального распределения; σ – среднеквадратическое отклонение; P – случай-

ное базовое число, для генерации которого использован генератор случайных чисел [4].

Обычную (неслучайную) функцию $\beta(X)$ опишем зависимостью коэффициента пропускания (светопропускаемости, %) в ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях спектра от длины волны оптического излучения.

На основании проведенных исследований для описания диапазона изменений выбрана аппроксимация полиномиальной функцией второго порядка:

$$\beta(\lambda_1) = -194,57\lambda^2 + 296,97\lambda - 19,961; \quad (13)$$

$$\beta(\lambda_2) = -127,41\lambda^2 + 249,33\lambda - 25,76, \quad (14)$$

где $\beta(\lambda_i)$ – аналитическая функциональная зависимость коэффициента пропускания от длины волны оптического излучения; λ – длина волны оптического излучения.

Разработанная модель использована для задания режимов лазерного гравирования материала с неизвестными персональными характеристиками, изменяющимися в некотором диапазоне.

Для определения аналитических выражений применен метод интерполяции с использованием аппроксимации по методу наименьших квадратов с выполнением условия

$$F = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta(x_i))^2 \rightarrow \min, \quad (15)$$

где F – минимизируемая функция; y_i – эмпирические точки статистической зависимости; $\beta(x_i)$ – аналитическая функциональная зависимость.

При направленном пропускании, когда рассеянием можно пренебречь, световой поток, падающий на образец, делят на три компоненты: отраженный, поглощенный, пропущенный. Приняв, что отраженный поток у всех разновидностей обугливаемого материала составляет 5-10 %, пропущенный поток рассчитывается по полученным выражениям. Разница между энергией падающего потока, отраженного и пропущенного потоков позволит рассчитать энергию, поглощенную (адсорбированную) веществом, израсходованную на нагревание.

Качество поверхностного слоя оценивалось по следующим параметрам: глубина проникновения излучения в материал, среднее значение микронеровностей, среднее квадратическое отклонение микронеровностей и коэффициент корреляции микронеровностей при ступенчатом изменении мощности лазерного излучения. Для примера рассмотрена зависимость качества поверхностного слоя от микроструктуры, химического состава и физико-механических свойств древесины при тангенциальном срезе.

В результате моделирования получено выражение для функциональной зависимости:

$$h = 0,0015P^3 - 0,0098P^2 + 0,0158P - 0,0037. \quad (16)$$

Поскольку термические свойства материалов нелинейно изменяются с изменением температуры, для проверки корректности применения выражения (16) для расчета глубины проникновения лазерного излучения в материал экспериментально воспроизводился полутоновой клин от белого до черного поля (рис. 1).

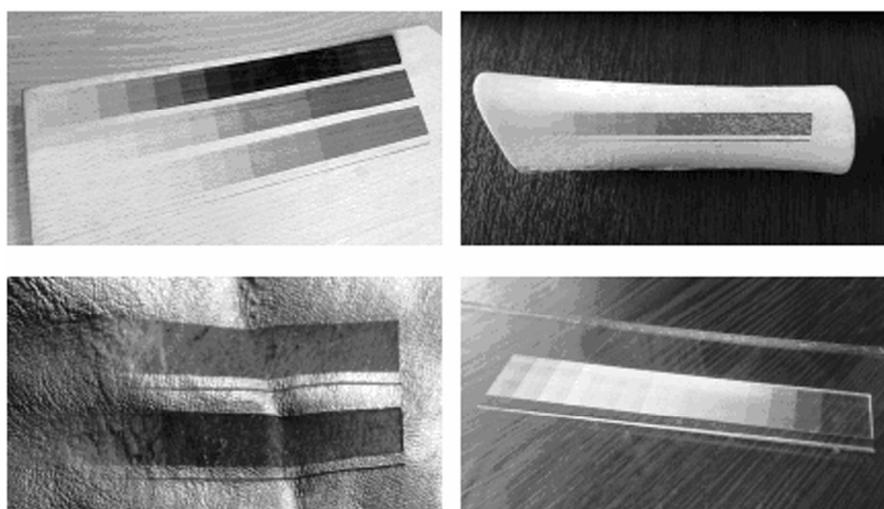


Рис. 1. Исследование режимов работы лазерной установки с использованием полутонowego клина на материалах дерево, кость, кожа, оргстекло

Для выбора длины волны лазерного излучения использовалась зависимость светопропускаемости от длины волны. Определение этой функциональной зависимости проведено на основании полученных и приведенных в литературе статистических данных. Для исследования использованы спектры оптического поглощения срезов древесины, ИК-спектры срезов древесины толщиной $0,12 \pm 0,04$ мм, записанных в диапазоне $4000 \dots 400$ см^{-1} при спектральном разрешении 4 см^{-1} и числе сканов 50 относительно воздуха [5].

В области спектра $0,76 \dots 1,4$ мкм характерно слабое поглощение и сильное рассеяние излучения. Оптические характеристики значительно зависят от толщины слоя материала, плотности, количественного содержания влаги, микроструктуры и условий облучения. Следствием сильного рассеяния является высокая отражательная способность древесины в данном диапазоне волн, которая увеличивается с ростом плотности и достигает 80-98 %. Характер функциональной зависимости пропускной способности от толщины материала близок к гиперболического и значительно отличается от экспоненциального.

В области спектра $1,5 \dots 2,5$ мкм древесина характеризуется средним и сильным поглощением и изменением рассеяния от сильного к среднему и даже слабому рассеяния.

В области спектра $2,8 \dots 15,0$ мкм древесина характерна сильным поглощением и слабым рассеиванием излучения. Максимальные различия в оптических свойствах материалов наблю-

даются в области спектра $1,50 \dots 5,0$ мкм и указывают на различие в протекании тепло- и массообменных процессов при облучении одним и тем же источником инфракрасного излучения.

Наиболее оптимальным для рассматриваемого случая является использование CO_2 -лазера, длина волны излучения которого $10,6$ мкм, управляемого компьютером. Для гравирования выбран лазерный гравер серии Speedy фирмы Trotec (Австрия) с использованием программных продуктов CORELDRAW, JOBCONTROL. Мощность лазерного излучения изменялась от 0 до 9,6 Вт с шагом 0,64 Вт. Остальные режимы работы лазера были постоянными: скорость лазерного гравирования 18 см/сек., разрешающая способность 500 dpi, частота импульсов 1000 Гц, диаметр сфокусированного лазерного луча на материале 0,1 мм.

Аппроксимация зависимости глубины проникновения лазерного излучения в материал (рис. 2) при изменении мощности излучения лазера, полученной в результате эксперимента, оптимально описывается полиномиальной функцией четвертого порядка:

$$h = 0,0001P^4 - 0,0005P^3 - 0,001P^2 + 0,0052P - 0,0014. \quad (17)$$

Полученные аналитические выражения не противоречат результатам имитационного моделирования и результатам эксперимента. Согласованность теоретических и статистических результатов проверена с использованием критерия согласия, критерия χ^2 Пирсона.

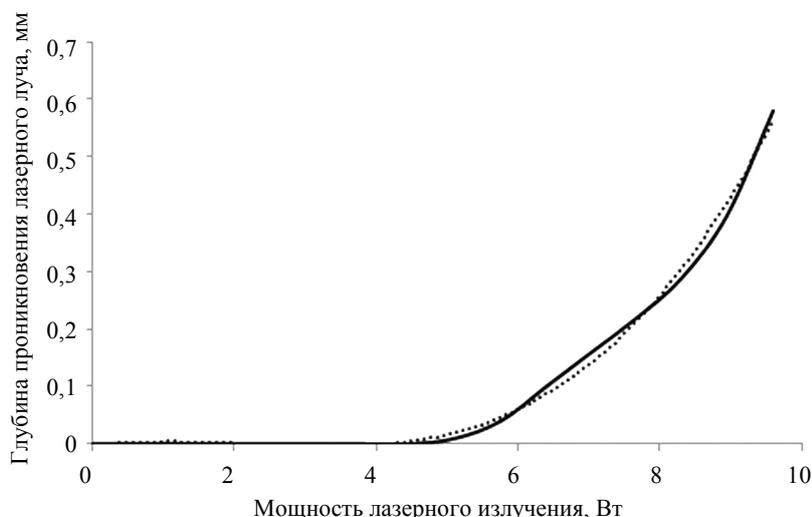


Рис. 2. Расчетная глубина проникновения лазерного излучения в материал (точечная кривая) и полученная в результате эксперимента (сплошная кривая)

Практическая значимость работы определяется полученными теоретическими и экспериментальными предложениями, применимыми к решению актуальных задач создания художественно-промышленных изделий с учетом химических и физико-механических особенностей материалов, позволяющих подчеркнуть их природную уникальность и компенсировать неоднородность их свойств.

Библиографические ссылки

1. Гравирование растровых изображений на обугливаемых материалах лазером / М. М. Черных, А. Э. Дрюкова, А. В. Усольцева, В. П. Усольцев, А. И. Степанова, А. Д. Ардашева // Дизайн. Материалы. Технология. 2015. № 4(39). С. 74–77.
2. Народные художественные промыслы России: история, география и культура / Д. А. Аманжолова [и др.]. М., 2012. 291 с.
3. Григорьянц А. Г., Шиганов И. Н., Мисюров А. И. Технологические процессы лазерной обработки. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 664 с.

4. Патент RUS 1226451 на изобретение. Генератор последовательности случайных чисел / В. П. Усольцев. Зарегистрировано 01.10.1984.

5. Оценка содержания лигнина в древесине методом ИК фурье-спектроскопии / С. С. Хвиюзов, К. Г. Боголицын, М. А. Гусакова, И. Н. Зубов // Фундаментальные исследования. 2015. № 9-1. С. 87–90.

References

1. Chernykh M. M., Dryukova A. E., Usol'tseva A. V., Usol'tsev V. P., Stepanova A. I., Ardasheva A. D. (2015). *Dizain. Materialy. Tekhnologiya* [Design. Materials. Technology], no. 4(39), pp. 74-77 (in Russ.).
2. Amanzholova D. A. (1012). *Narodnye khudozhestvennye promysly Rossii: istoriya, geografiya i kul'tura* [National art crafts of Russia: history, geography and culture]. Moscow (in Russ.).
3. Grigor'yants A. G., Shiganov I. N., Misyurov A. I. (2006). *Tekhnologicheskie protsessy lazernoj obrabotki* [Technological processes of laser processing]. Moscow, MSTU them. N. E. Bauman (in Russ.).
4. V. P. Usol'tsev. Patent RUS 1226451, 01.10.1984.
5. Khviuzov S. S., Bogolitsyn K. G., Gusakova M. A., Zubov I. N. (2015). *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], no. 9-1, pp. 87-90 (in Russ.).

Получено 23.11.2017